

9. 地球科学部会報告

9-1. はじめに

20 世紀の地球科学は、変動する地球の駆動力が地球深部に蓄積された熱エネルギーの宇宙への放出と、太陽エネルギーと月の潮汐力であることを明らかにした。さらに、我々陸上生物は、電離圏やオゾン層等からなる地球大気と強い地球磁場のバリアーによって、太陽紫外線や放射線帯粒子や宇宙線から守られていることも解明されつつある。一方、急速な人間圏の拡大によって、我々の活動が地球環境に大きな影響を及ぼすようになり、それが局地的なものに留まらず国境を越えた問題となっていることも顕在化しつつある。

人為的なものであるかどうかは別にして、地球システムの複雑な変動原理の徹底解明は、安全で安心な 21 世紀の人類社会を構築する上で、避けて通れない緊急の課題である。地球環境変動は、歴史に学ぶまでもなく、世界規模の民族大移動や紛争を引き起こした根本原因であるが、個人や特定の国家だけが逃れられるような性質の問題ではなく、人類は全て運命共同体という宿命を持つ。その変動原理を解明し、未来を予測し、対策を講じ、もし可能ならば制御する努力は、先進国の義務である。特に、科学・技術・経済立国を標榜する日本が世界に大きく貢献する、またとない場でもある。

本報告では、このような認識の下に、先ず地球システムの理解とは何を意味するかについて述べ、次に地球科学的視点から見た地球観測の現状と課題をまとめ、それに基づいて本部会としての重点課題を列挙し、最後に在るべき推進体制について提言する。

9-2. 地球システムの理解

9-2-1. 地球科学の目的と使命

地球科学は、固体地球とそれを取り巻く大気・海洋及び電離圏・磁気圏の現在の姿と変動のメカニズムを理解し、その理解に基づいて太陽系の形成から現在に至る地球・生命進化の過去の歴史を明らかにするとともに、多圏複雑系としての地球の未来変動予測を目的とした、人類社会にとって不可欠の学問分野である。

現在の地球科学が対象とする領域は、地殻・マントル・コアから成る固体圏、大気・海洋から成る流体圏、様態変化の早い雪氷圏、固体圏と流体圏の境界領域に広がる生命圏、更には中層大気、電離圏・磁気圏から宇宙空間にまで及んでいる。またその研究手法も、自然の多様性・複雑性を認識する調査・観測、多様性・複雑性の中から普遍性を抽出する実験・解析・理論、そして全体のシステムを統一的に理解するためのモデリングやシミュレーションと多岐に亘っている。

このように時間的にも領域的にも手法的にも非常に広範で多様な地球科学の研究を効果的に推進するためには、多圏複雑系としての地球の理解に基づ

く、専門諸分野を融合した総合的研究戦略が重要となってくる。実際、現在の地球科学は、固体圏から電磁気圏までを相互に作用し合う一つの複合システムとして捉え、太陽系の形成から現在に至る地球と生命の共進化の歴史を一連の時間発展過程として捉えることを可能にしつつある。一方、地球科学と人間社会との関わりは、従来にも増して密接なものとなりつつある。地震の発生や火山の噴火に関連した自然災害科学・予測科学としての側面、地球の温暖化や砂漠化、エルニーニョによる気候変動、或いはオゾンクライシスといった環境科学としての側面などがその代表例である。人間社会に重大な影響を及ぼすこれらの問題の究明は、地球科学に課された使命でもあり、未だ不完全ではあるが、全地球規模での取り組みが既に始まっている。

9-2-2. システムとしての地球

人間活動の環境への影響が 20 世紀後半になると特に顕在化してきたが、科学者が環境変動を見る空間スケールも、局地から地域そしてグローバルへと広がってきた。しかし、グローバルな地球システムの理解に基づいて地域的或いは局地的な環境変動を見直すという視点が十分でないため、地球環境問題に個人の生活がどう関わっているかが見えにくく、問題の深刻さの認識を妨げている。一方、時間スケールについて見ると、過去 100 年間の地球観測に重点を置いた現在の地球環境研究は、様々な時間・空間スケールで包括的に地球システムの挙動を理解しようとする視点に欠けている。

地球は、いくつものサブシステムから構成される複合システムである。地球システムは、地球外及び地球内部からのエネルギーの流れにより駆動され、各サブシステムの状態(環境)は、サブシステム間でのエネルギー・物質循環により動的に維持されている。システムの駆動力としてのエネルギーの流れやサブシステム間のエネルギー・物質循環が何らかの原因で乱されると、ある場合は、その変化を抑制する負のフィードバックが働き、システムは安定化する。しかし、変化を増幅させる正のフィードバックが働く場合は、システムは不安定化し、サブシステムの状態の著しい変化を引き起こす。そして時には、連鎖的に別のサブシステムの変動を引き起こすこともある。

擾乱が引き起こす状態の変化は、連続的とは限らない。擾乱がある閾値を超えると、突然、ある状態から別の状態への急激な遷移が起こる。それは地震、火山などの自然災害に限らない。古気候記録やそれに基づく数値シミュレーションは、現在進行している人為的環境擾乱により地球規模での急激な状態遷移(気候モードジャンプ)が起こり得ること、また、そうした急激な状態遷移は気温や氷河、降雪・降水量の地理的分布パターンの劇的な変化を伴うことを

示唆している。考古学的記録は、こうした気温や水循環の地理的分布の急激な変化が、文明崩壊、都市放棄につながったことを示している。一方、地質記録は、今から 5500 万年前に、堆積物中のハイドレートの崩壊により、現在に匹敵する規模、速度での二酸化炭素の放出が進み、急激な地球温暖化が引き起こされたことを示している。

我々はまだ、地球システムを構成するサブシステム間の相互作用やフィードバック過程のごく一端を理解しているに過ぎない。その全容を理解するには、古気候・古環境の復元を含む統合的な地球観測によりサブシステム間のあらゆる相互作用やフィードバック過程を把握し、そのメカニズムを解明する必要がある。

9-2-3. 地球変動の予測可能性

地球の進化の歴史は偶然と必然の産物である。地球が実際に辿ってきた進化の歴史は、過去の地球変動を記録した地質データの収集・解析により復元することができる。その時間分解能は、観測・分析機器の革新的進歩によって、飛躍的に向上している。一方、物理モデルに基づく地球システムの時間発展シミュレーションにより、様々な状況下での仮想的な地球史を再現することができるようになってきた。地質・地球物理データから復元された実際の地球史と、計算機シミュレーションによる仮想の地球史を比較することにより、地球史上の大規模変動の偶然性と必然性の検証と地球システムの安定性/不安定性を支配する要因の特定が可能となる。こうした地球システムの安定性/不安定性の検証の上に立って初めて、支配法則や時空間スケールが桁違いに異なる諸過程が複雑に絡み合う地球システムの変動の予測可能性が明らかになる。

こうした視点に立って地球システムの進化の歴史と変動のメカニズムを明らかにし、未来の変動を予測するためには、フィールド調査・観測、リモートセンシング、室内実験からモデリング・シミュレーションまで、多様な研究手法を総動員する必要がある。地球を一つのシステムとして総合的に理解し、その未来変動の定量的予測を通じて人類社会存続のための将来設計に貢献することは、地球科学に課せられた基本的使命である。

9-3. 地球科学観測の現状と課題

9-3-1. 外部起源の地球システムの変動

地球システムの外部起源駆動力である太陽からのエネルギーの内、地球表層環境システムへ直接届く可視光の時間変動は比較的小さいが、成層圏オゾンに吸収される紫外線や、超高層大気を電離する極端紫外線や X 線の変動は極めて大きいことが分かってきた。これらの広い波長域の変動と対流圏から超高層大気までの大気間結合を考慮した場合、従来未解明であった太陽放射変動と地表付近の気温変動が定量的に説明できるかは、気候変動の解明するために

極めて重要である。

一方太陽から放出される荷電粒子も地球システム、特にジオスペース(超高層大気、電離圏、磁気圏という地球周辺空間)に多大な影響を与える。太陽表面でフレア等が発生すると、高エネルギーの荷電粒子や巨大なプラズマ雲が放出される。これらが地球に到達すると、磁気嵐のような大規模な擾乱現象を引き起こす。地球システムの外縁部を成すジオスペースに到達したこれら荷電粒子群は、地球固有磁場との複雑な相互作用の結果、著しい加速を受け、極域において活発なオーロラ活動を生じるとともに、電離圏や約 4~6 倍の地球半径の赤道面に巨大な電流系を発達させ、一部の粒子は相対論的な高いエネルギーにまで加速される。これらの現象は時として衛星運用や通信等の実用宇宙利用インフラ、地上の給電等の社会基盤に甚大な被害を与える。

大気圏、水圏、雪氷圏、生物圏から成る地球の表層環境システムの変動は、上記の太陽からの放射による熱エネルギーの他、太陽月に起因する潮汐(力学)エネルギーにも起因している。地球は、太陽から短波として受ける熱エネルギーを長波の形で宇宙空間に放出し、全体として熱平衡の状態にある。しかし、水蒸気、二酸化炭素などの大気組成成分の温室効果により、全球平均した地表の温度は、温室効果を無視した場合の放射平衡温度(-18℃)よりも遙かに高い状態に保たれている。実際の地球の平均的な対流圏の温度分布は、相対湿度が一定に保たれると仮定すれば、放射に対流の効果も考慮した平衡を考えることで理解することができる。

緯度による違いを見ると、年間を通して低緯度では過剰な太陽エネルギーの供給を受け、高緯度では過剰に宇宙空間に熱エネルギーを放出しているため、これを補償すべく大気や海洋の循環が低緯度から高緯度に熱を運んでいる。この循環の水平・鉛直構造は、基本的には角運動量の保存則に支配されるが、同時に比熱の大きく異なる陸地と海洋の分布にも強く影響される。特に、南北半球における海陸分布の偏在化は重要な要素である。大気の循環は海洋の表層循環を駆動するが、一方で海洋の表層循環に伴う海面水温分布は大気の循環に影響を及ぼす。海面水温はその上空に生じる雲の放射特性にも影響する。対流圏の温度分布は地域によって異なるのである。海洋潮汐による鉛直混合は重力場にあって密度成層をなす海洋にミクロスケールからの仕事をしていると考えるならば、海洋は深層循環によってこの位置エネルギーを開放している側面もある。一般には極域の冷却効果による対流が深層循環を駆動すると考えられているが、最近の知見は、これが必ずしも妥当ではないことを示している。例えば、2000 年程度の周期の気候変動に関係づけて世界海洋を巡る深層循環の描像がよく使われるが、これは海洋化学の断片的な結果を繋げたものであって、風によって駆動されることが明らかなインドネシア通過流の部分などは明らかに問題がある。

地軸の傾きは太陽からの熱エネルギーの供給の緯度分布に季節変化を与えているが、これは水の相変化による潜熱の放出を伴う大気・海洋結合システムの正のフィードバック機構により増幅され、大気・海洋の循環に強い季節性をもたらす。海洋や海水、氷床の熱容量は大きく、この季節性は単年度では解消せず残差として残るために、これを解消すべく大気・海洋システムに経年変動やより長期の変動が生まれる。よく知られているエルニーニョは、赤道域太平洋に過剰に蓄積された熱を大気や中緯度海洋に解放する経年変動のメカニズムということができるといえる。

(a) 太陽によるジオスペース環境の変動

地球環境をより正確に予測するためには、太陽からのエネルギー(放射と粒子)や宇宙線が地球表層付近の大気に与える影響を定量的に評価する必要がある。そのためには、太陽起源・人為起源・地球自然起源の三者間の相互作用を解明し、各起源の影響を定量的に評価しなければならない。

太陽からの放射エネルギー強度自体は 11 年の太陽活動周期やそれより長い周期で変動していることが知られている。しかし地球表層へ直接届く可視光の時間変動は比較的小さく、その変動だけで地球表層の気温などの大気変動を量的に説明できるかについては否定的な見方が多い。一方、成層圏オゾンに吸収される紫外線や、80km 以上の超高層大気を電離して電離圏を生成している極端紫外線や X 線の変動は大変大きく、数 10 % から 100 % 以上にもなることが衛星観測により分かってきた。これらの可視光から X 線までの変動に対する対流圏、成層圏から超高層大気までの複合領域の応答及び大気間結合(領域間での物質やエネルギーの移動・循環)を考慮した場合、太陽放射変動が地表付近の気温変動を定量的に説明できるかどうかは、過去の気候変動の解明や将来の気候変動予測上基本的かつ重要である。これに加えて、太陽磁場と地球磁場が弱くなると(強くなると)地球へ侵入しやすくなり(しにくくなる)宇宙線が、雲の生成については気候変動に関わる可能性も指摘されており、相関関係や因果関係の有無について評価することは極めて重要である。これらの解明のためには、太陽放射の観測、地表から超高層にいたる各領域でのグローバルかつ長期的な観測を基にモデリング・シミュレーションも駆使して因果関係の解明を行うことが必須である。

また、過去数千年から数万年の時間スケールで地球環境が変動してきているので、太陽活動に対する地球表層付近の大気の応答や気候変動の因果関係を、様々な時間スケールで定量的に評価することが重要である。湖底掘削データなどの古環境データから得られる、地球磁場の逆転や極端な減少との関連も考慮しつつ、人為起源の影響が無い環境下で生成されたアイスコアや年輪の解析から、過去の太陽変動や火山噴火等の地球自然起源の変化と、大気変動の

関係を明らかにすることが可能となる。

一方、地球システムから地球外部へのエネルギーと物質の流出も同様に重要である。下層大気から超高層大気へ、大気重力波や潮汐として運動エネルギーが放出されており、また、スプライトと呼ばれる積乱雲から高度 80km 付近への放電現象によって電磁気的なエネルギーの放出も起こっている。さらに極域電離圏からは大量のイオンが宇宙空間に散逸していることも分かっている。このような地球表層環境システムから地球システム最外部までの間のエネルギーと物質の輸送は、従来の観測手法では測定が難しいことから、今後解明すべき課題である。

一方、太陽から放出される荷電粒子は地球システム、特に地球システムの外縁部「ジオスペース」に決定的な影響を与える。この領域の科学である太陽地球系物理学は IGY 以降 1991 年より 5 年間にわたって実施された太陽地球系エネルギー国際協同研究計画(STEP)まで、地上観測、ロケット・科学衛星観測を通じて進展してきた。我が国では独自の手法やアイデアを活かした南極観測、北極観測、共役点観測、地上レーダ観測、地上観測点群観測やロケットやあけぼの衛星、ジオテイル衛星、ようこう衛星をはじめとする科学衛星を用いた飛翔体観測を進展させ、ジオスペース環境に関する基礎科学としての理解は深まりつつある。

磁気嵐は様々な物理機構を経て、地球をドーナツ状に取り巻く放射線帯の粒子分布や超高層大気の組成・構造を激変させる。放射線帯は、近年従来の予測に反して放射線量が激しく変動し、極めて高いエネルギーの粒子の生成を起す等、物理的見地から大きな注目を集めている。さらに社会的には、大きな磁気嵐は気象衛星や通信衛星、測地衛星、地球観測衛星などの障害を引き起こし、宇宙飛行士や航空機搭乗員の被爆量増加や地上の停電の原因となる可能性がある。更に衛星・地上間の電波伝搬の経路である電離圏の激しい変動を引き起こし、GPS、VLBI などを用いた衛星測位システムの使用不能、あるいは測位精度の低下といった事態を引き起こす可能性もあり、社会基盤を脅かすものである。

これらの現象の科学的な解明とともに、予測のための方法の研究、観測網の設置が必要である。具体的には、観測・理論両面から粒子加速が起こる放射線帯で広いエネルギー帯を網羅する荷電粒子、電場・磁場、プラズマ波動の総合観測を実現することが必要不可欠である。また、プラズマ波動と電磁場を地上から多点で観測できる、地磁気・電波観測ネットワークやレーダ観測が必要とされている。また日本が主体となりアジア・オセアニア域での観測に先導的な役割を果たすことも、この地域の社会基盤の安定した発展のための重要な課題である。

これらの太陽と地球周辺空間(ジオスペース)が地球システム全体に与える影響は太陽地球系科学においても中心的な課題で、その解明のために国際共同観測計画 CAWSES (Climate And Weather of the

Sun-Earth system:太陽地球系の気候と天気)が開始された。

(b) 冷源としての極域の変動

太陽の入射角度が大きい極域では、日射の吸収量よりも宇宙空間への赤外放射量の方が多いため、地球放射収支はマイナスとなる。その結果、極域は大気と海洋の冷源域となり、放射収支がプラスとなる低緯度の熱源域と間で、エネルギーバランスを解消するように大規模な循環が生じる。さらに極域は、氷床、氷河、海氷、積雪など反射率(アルベド)の高い雪氷圏の存在により、冷源の効果が強化されている。地球温暖化が進行すると、海氷や積雪域が融解し、アルベドの低い開水面や陸面が露出するため、アルベド・フィードバックによりその減少は急激に進むと考えられる。過去数十年、地球上で最も顕著な温暖化が進行している北極域では、北極振動と極渦の盛衰に関連し暖かな北大西洋水の流入による北極海の高氷の減少がアルベド・フィードバックを引き起こしているとの考えが有力である。

北極海が南極周辺の海域と大きく異なる点は、海洋成層構造にある。北極海では、混合層の下には冷たい塩分躍層が存在し、また冷たい塩分躍層の下には、大西洋起源の高温・高塩の大西洋水が存在する。すなわち、北極海は熱的に不安定成層状態になっている。このため、冷たい塩分躍層が消滅すると深い対流により暖かな大西洋水が湧昇し、海氷が著しく減少し、大規模な気候変化を引き起こす可能性がある。

極域海洋が地球規模の気候に及ぼす役割は、熱塩循環で形成される北大西洋深層水や南極底層水が2000年で地球を巡る「海洋ベルトコンベア」を駆動することである。しかし、極域の海洋で起っている熱塩循環は、北極海ではユーラシア大陸や北米大陸の大河からの淡水供給、南極海では氷床からの淡水供給により、大きな影響を受けることになる。極域の大気-雪氷-海洋システムの変化は、海洋の熱塩循環と海洋のベルトコンベアの消長を通じ、地球規模の気候変化に大きな役割を果たす。

極域海洋は、温室効果ガスである二酸化炭素の循環では、吸収源として重要な役割を果たしている。この吸収プロセスとして、冷たい海水による二酸化炭素の溶解度の増加による「溶解ポンプ」、熱塩循環に伴う栄養塩に富んだ深層水の湧昇により繁殖した植物プランクトンが二酸化炭素を吸収することによる「生物ポンプ」や「アルカリポンプ」、「シリコン仮説」などの諸プロセスが提案されている。

極域では、海氷下に付着する形でアイスアルジーと呼ばれる藻類が夏季に大繁殖し、この高い一次生産を食物連鎖の起点とした豊かな海洋生態系をつくり出している。アイスアルジー起源の植物プランクトンは、海水中の硫酸イオンを取り込み、体内で有機硫黄化合物である硫化ジメチルに還元される。生理作用で排出されたDMSは難溶性かつ揮発性である

ため、大気へ放出されOHラジカルと反応し、メタンスルホン酸(MSA)、さらに硫酸に酸化される。大気中に放出されたMSAや硫酸はエアロゾルとして、凝結核として雲を形成し、気候を寒冷化すると効果が指摘されている。

極域の大気は、冬季に発達する極渦で特徴付けられる。この極渦は、下層から伝搬してくるプラネタリー波によりゆがめられ、特に北極域では突然昇温と呼ばれる急激な気温上昇を伴うことがある。また、下部成層圏では、発達した極渦の中で、低温下で形成される極域成層圏雲(PSC)を触媒とした光化学反応によりオゾンの破壊が進行するが、オゾンホールは、極渦がより強く、より寒冷化する南極上空で顕著に起る。寒冷化は、中間圏でも進んでおり、夏に現れる極中間圏雲やPMSE(極域中間圏夏季エコー)の発生頻度の永年変化が上昇傾向にあることは指摘されて久しい。この極中間圏雲は、産業革命以降に出現するようになったと考えられているため、地球気候変動のカナリアとも言われる。しかし、このような極域の成層圏と中間圏の気温は気候モデルでは再現が難しく、大気大循環を駆動する極域での大気重力波が重要な役割を果たしている可能性が強い。夏極の中間圏界面(高度95-100 km)での温度極小は、下層から伝わる大気重力波運動量が砕波によって背景東西風に移り、夏極から冬極に向かう南北循環を生成することによるとされている。しかし、このような重力波の中間圏大気循環への大きな役割について極域での定量的検証は未だなされておらず、鉛直成分を含む風の精密な観測が可能な大型大気レーダーなどによりはじめて可能となる。また、夏季のPMSEエコーの発生が北極に比べ南極のほうが少ないこと、さらに冬季の極域中間圏界面は南極のほうが北極よりおよそ20°程度低いことなど、南北両極での非対称性が最近の観測で示唆されている。これらが、南北極域の重力波活動の差異による可能性も指摘されており、このようなバイポーラーの視点は極域から気候変動の解明を探るのに欠くことができない。極域の中間圏からさらに上側の熱圏でも寒冷化による大気の収縮による電離層F層のピーク高度やオーロラ発光高度などの沈下が見られ、また一方太陽活動や地磁気の変化に起因する熱圏の変動が地球規模のプラネタリー波を介して冬の極域成層圏循環に影響するとの考えもあり、相互に繋がった極域中層・超高層大気を複合システムとして捉え、解明してゆくことが不可欠である。

南極には高度3000 mを超える氷床が存在するため、下層大気は北極より低温になるとともに、特異な大気の循環場が現れる。放射収支はほぼ年間を通じて負となり、放射冷却により氷床上で冷やされた空気塊は、重力の作用により斜面下降風となる。この補償流として、対流圏上部では極に向かう風系が卓越するとともに、安定した南極高気圧は氷床内陸部の上空で下部成層圏からの沈降流を引き起こしている。こうした南極の特異な大気の循環場は、物質

循環を理解する上で重要である。

南半球高緯度では、数年周期の環状の気候モードである南極振動が見られる。特に南極大陸は高緯度に孤立し、中緯度は平坦な海で囲まれていることから、北極に比べより環状的となる。南半球の平均東西風に亜熱帯ジェットが1つある状態と2つある状態との振動現象とも捉えられている。

北極振動は、冬季北半球の循環で卓越する変動パターンで、北極域と中緯度の気圧のほぼ環状のシーソー的変動である。地表から、下部成層圏まで関連する。高緯度ジェットの強さの変動でもあり、極渦の強弱を表す変動とも言える。さらに、気温偏差とも関係し、北極振動指数が正の時、ユーラシア大陸北部を中心に高温偏差となり、日本の気候にも関連すると言われている。

北半球高緯度における対流圏の循環場は、北太平洋のアリューシャン低気圧と北大西洋のアイスランド低気圧が重要な役割を果たしている。アリューシャン低気圧とアイスランド低気圧とは、シーソー関係にある。北太平洋上空の循環偏差をきっかけとして、その影響が上空の大規模な波動(ロスビー波)として北大西洋へ伝播して形成されるためと考えられている。また、エルニーニョが東部熱帯太平洋に発生すると、熱帯の対流活動域も中・東部太平洋域に移動し、これにともない、北太平洋のアリューシャン低気圧が強化される。また、エルニーニョモードの時には、高気圧と低気圧の渦列の伝搬により、極域にも異常気象が起る。このように、大気や海洋の熱源域と冷源域は、テレコネクションで互いに作用しあい、地球規模の気候形成に重要な役割を果たしていると考えられるが、未解明な課題が多い。

(c) 熱源としての赤道域の変動

赤道域は、太陽から受ける放射エネルギーが宇宙に放出されるエネルギーより大きい地域で、熱源域として大気や海洋を駆動し、地球規模の気候形成に大きな役割を果たしている。赤道域では、貿易風や赤道海流などの影響で暖水の偏りが生じる。熱帯西太平洋海域では、地球上最も高温の暖水プールが形成される。この暖水プールが数年周期で通常より東に移動するのがエルニーニョ現象で、エルニーニョの時には、日本ばかりかテレコネクションにより極域の異常気象も引き起こす。逆に、暖水プールが西太平洋への偏りが強まる現象がラニーニャ現象である。暖水プール上では、スーパー・クラウド・クラスと呼ばれる巨大な積雲集団が作られ、その対流活動は重力波や赤道波と呼ばれる大気波動により大気上層に伝搬し、中層大気の大循環を引き起こす。また、暖水プール海域では、強い西風バーストが吹くことがあり、西風バーストがエルニーニョ現象の引き金の一つの可能性が指摘されている。西太平洋からインド洋東部の赤道海域では、発達した積雲対流に伴う強い降水が海表面に薄い淡水層を作るが、この淡水レンズ作用は、さらに海水温を高め、積雲

対流をさらに発達させることになる。

また、インド洋にもエルニーニョと同じようなインド洋ダイポールモード現象と呼ばれる現象があることが最近の研究で明らかになった。インド洋の赤道海域では、通常時には西風が吹き、海面水温は東西ほぼ一様であるが、ダイポールモード発生時には東風が卓越し、赤道海域の暖水プールは西に移動し、これに伴って対流の活動域が西も移動する。また、インド洋東部では湧昇により海面水温が低下し、強化された下降気流は、インドネシアでは降水量の減少が森林火災を誘発し、また、インドでは下層大気の南北循環の強化の結果として降水量の増加を引き起こす。インド洋ダイポールモード現象は太平洋のエルニーニョとは独立したインド洋の大気海洋現象と考えられているが、主要なIODイベントの多くは、エルニーニョ南方振動の warm phase と同じ年に発生しており、この二つは独立したモードではないとの考えもある。

西太平洋赤道海域での暖かい海水は、太平洋西岸を北上し、黒潮として日本沿岸を東進しながら、大気に水・熱を放出するとともに、偏西風によって冷却された海水は中層へと沈み込むが、黒潮に伴って生じる中規模渦による鉛直混合の効果によって、亜表層・中層水(亜熱帯モード水)を形成する。このように、熱帯海域の大気・海洋システムの変動特性の理解は、極向きの熱塩循環、北太平洋中層水の形成と二酸化炭素循環など、地球規模の気候変動に関連する中・高緯度帯での多くの現象を理解する上で、重要な貢献を果たすことが期待される。赤道海域の海洋と大気のダイナミックな挙動は、地球規模の気候形成に大きな影響を及ぼしているが、暖水プールの変動機構、エルニーニョの発生機構、アジアモンスーンの変動特性との関連、赤道海域における太平洋とインド洋を結ぶインドネシア通過流の役割など未解明な課題は多い。

9-3-2. 内部起源の地球システムの変動

固体地球の変動は、45億年前の地球形成時にコアに蓄えられた熱エネルギーと地球内部に存在する放射性元素の崩壊による熱エネルギーの地表への流れによって支配されている。地球内部の熱的非平衡状態の結果として生ずる重力的不安定は、コアやマントルに対流運動を引き起こす。鉄を主成分とするコアの対流運動は数年から数十万年の時間スケールで変動する地球磁場を作り出す。一方、数億年の時間スケールを持つマントルの熱対流運動は、海嶺でのマントル物質の化学分化を経て地球表面を覆うプレートを生成し、それらを水平方向に駆動する。固体地球表層部で生起する地震・火山活動や造山運動などの地殻活動現象の殆どは、根源的には、年間わずか数センチメートルの速さで相対運動するプレート同士の相互作用に起因する。このように時間・空間スケールの異なる物理・化学過程が複雑に相互作用する固体地球システムの変動現象を統一的に理解す

るためには、全地球から局域まで、様々なスケールでの多様な地球観測を継続的に展開する必要がある。こうした観測から得られる地球システムについての理解を予測のレベルにまで発展させ、自然災害の軽減に向けた具体的施策の立案を通じて社会へ還元するには、観測データと理論モデルを統合した大規模数値シミュレーションが不可欠である。

(a) コアの対流運動と地球磁場変動

地球の固有磁場は、地球中心部にあるコアの対流運動によって生成、維持されている。この地球磁場は惑星間空間まで広がり、地表にすむ生物にとって有害な、太陽からの荷電粒子の流れ(太陽風)や高エネルギーの銀河宇宙線等が地表に到達するのを妨げている。地球磁場は永遠に存在するわけではなく、遠い将来には、金星や火星と同様に消滅してしまうと予想されている。また、過去の磁場変動の記録から、磁場の主要成分である双極子磁場は現在のN極とS極が反転する逆転現象を幾度となく繰り返してきたこと、そして地磁気逆転の際には、磁場の強さは現在の10分の1以下に減少したことが知られている。最近でも、磁場強度は19世紀半ば以降の150年間に約10%減少しており、今後も地球磁場変動の観測を継続して行っていく必要がある。

地球磁場観測は数100年前から海洋での航海の必要性から行われるようになったが、19世紀半ばには世界各地に地磁気観測所が設置されて連続観測が開始され、現在では数100箇所の観測所で地磁気の変動を記録し続けている。これらの地磁気観測所のデータは、磁場の変動を監視する役割に加えて、地球磁場の起源の解明のために貴重な情報を与えてくれる。上記目的のためには、地磁気観測所を維持し、150年間のこれまでの磁場観測を継続して、さらに長期の記録をとり続けることが必須である。しかし一方で、人間活動の発展は人工的なノイズの急激な増大を引き起こしており、地磁気観測の継続には困難な状況が生じている。また、地磁気観測所は主に陸地にあり、太平洋を中心とする海半球には殆ど存在しないため、地球磁場の空間変動パターンを正確に知ることができなかった。このような状況を改善するため、1990年代後半には海半球ネットワーク計画等により、太平洋域の海洋島に地磁気観測のための施設が設置されてきた。また海底に設置できる無人の地球電磁気観測所の開発も行われ、現在は北太平洋に1箇所設置されているが、将来的には太平洋地域の海底に多くの海底観測所を設置することが望ましく、そのためには太平洋を取り囲む国々の連携・協力体制が必要となる。

こうした地表での地球磁場観測を補うものとして、全球的に均一な磁場観測を可能とする人工衛星観測が有効である。磁場観測衛星としては、これまでもMAGSAT, OERSTEDT等があったが、人工衛星は短寿命であるため、時間的にはスポット的な観測であり、長期的な連続観測の目処は立っていない。これまで

は衛星観測の面での日本の寄与はなかったが、今後は衛星による長期的な磁場観測を継続するために、国際的な連携・協力体制の中で、日本による地磁気観測衛星の打ち上げも必要となってくる。

地球磁場の逆転は、最近1000万年間を平均すると、ほぼ20万年に1回の頻度で起こっている。最後の地磁気逆転は80万年前であるから、統計的にはいつ起こってもおかしくない時期になっている。計器観測以前の磁場変動は、岩石に記憶された過去の磁場を読みとる古地磁気学的手法を用いて調べられている。特に連続的な磁場変動の様子を知る上では、海洋底や湖底の堆積物による情報が有用である。これらの調査は深海掘削計画等によって行われてきたが、近代の計器磁場観測に比べると、時間的にも空間的にも分解能の点で不十分な状況にある。堆積物からは磁場変動と同時に気候変動に代表される表層環境の変動についての情報も得ることができ、磁場変化と気候変動の関係を明らかにするためにも有効である。特に、近い将来起こる磁場逆転の際に、表層環境がどのように変化するかを予測するためには、過去の磁場逆転の際の記録を詳細に解析するとともに、堆積物コアを系統的に取得・分析する国際的な連携・協力体制を早急に整える必要がある。

上に述べた地球磁場観測の充実と並行して、数値シミュレーション研究を進展させることも、将来の磁場変動とそれに伴う環境変動を予測するためには必須である。日本においては、現在世界最速の計算機である地球シミュレータが数年前から稼働し、これまでにない解像度での地球ダイナモシミュレーション研究が開始され、今後数年以内には磁場逆転のメカニズム解明につながる成果が得られると期待される。しかし、複雑な地球磁場変動現象のシミュレーション研究のためには、より高速で大容量の計算機システムが必要となる。

(b) マントル対流と地球内部変動

地震の発生や火山噴火を引き起こす直接の原因であるプレート運動は、マントル全体に及ぶ熱対流運動の地球表層への現れにすぎない。このマントルの熱対流運動の全貌を解明し、全地球規模から地域規模までの様々な地球内部変動をマルチスケールの複雑な相互作用の連鎖として理解し、地震・火山活動や造山運動などの地殻活動の未来予測へとつなげていくことが、現在の固体地球科学の中心課題である。直接見ることでできない地球内部の情報を得るためには、地震学的・電磁気学的・測地学的なりリモートセンシング手法を用いる必要がある。こうした手法を用いることにより、現在、我々はマントルに沈み込む海洋プレートや全地球的な火山活動を引き起こすマントルブルームの描像を得つつある。また、観測から得られるこれらの情報と計算機シミュレーションを融合することにより、地球史を通じたマントルの進化や大陸の生成・分裂・統合の過程を再現し、プレート運動が駆動する大地震の発生や火山噴火の

メカニズムを明らかにしつつある。

地球内部の情報を得る最も有効な手段である地震観測に関しては、1896年に英国により第一世代の国際地震観測網が展開されて以来、1960年代に米国によって全世界約100点に展開された本格的な国際標準地震観測網 (WWSSN; World Wide Standard Seismograph Network) を経て、現在は、米国・ヨーロッパ諸国・日本・オーストラリア等が国際協力のもと維持しているグローバル地震観測網 (GSN; Global Seismographic Network) へと発展してきた。一方、測地観測に関しては、1957年の人工衛星打ち上げ以来、精密な衛星重力探査が行われており、ジオイド異常のパターンからマンツルの対流運動の様子が明らかにされている。精密なジオイドの決定は、衛星アルティメトリ観測で決定される海面高から海洋の動態を推定する上でも欠かせないものとなっている。近年の測地観測でもう一つ重要な点は、1990年代のGPS/VLBI等の宇宙観測技術の飛躍的発達により、従来は地質的時間スケールで推定されていたプレートの運動が、ほぼリアルタイムで直接的に観測されるようになったことである。また最近では、地球表層の物質移動にともなう重力場の微弱な時間変動を高精度・高頻度観測で捉えることを目的とした衛星観測も行われるようになってきた。例えば、現在、欧米の双子衛星システムGRACEを用いて氷・陸水等の水移動についての観測が行われているが、微弱な重力変動は地震・火山活動や地殻変動によっても引き起こされることを考えると、こうした高精度の衛星重力観測は地球内部変動の理解にとっても重要である。

このような定常的グローバル観測網の展開に加え、20世紀最後の20年間のデータ解析手法の飛躍的な進歩により、現在、我々は、地球内部の状態をマッピングしてマンツル対流のスナップショットを臆気ながら手にすることができるようになった。しかしながら、安定的なグローバル観測点の絶対数の不足、また、大部分の観測点が大陸または海洋島にあるという地域的偏りのため、得られたマンツル対流のイメージは高々500km程度の解像度しかなく、地震・火山活動を地殻・マンツル・システムのダイナミクスの一過程として理解するにまだ不十分である。

日本の研究者達は、こうした状況を打開すべく、「海半球ネットワーク計画」や「全地球ダイナミクス計画」を通じて、世界最大のプレート沈み込み帯である西太平洋域やスーパーブルーーム上昇域の南太平洋に長期的な地球内部観測網を構築してきたが、この観測網をさらに拡充・発展させていくことは、日本の責務であるといえよう。特に、海半球計画によって培われた(機動/長期)海底観測技術は世界をリードするものであり、地球内部観測の広大な空白域である太平洋に、海底ケーブルなども利用しつつ総合的地球観測網を構築し、21世紀の地球科学を日本主導で推進していくことを可能にするものである。

さらに、マンツル対流の下降域にあたる西南太平

洋の海陸プレート境界を、マンツル対流と地震・火山活動の直接的相互作用の場として位置づけ、アジア・オセアニア諸国と連携・協力しながら、地震、火山、測地、電磁気等の広域的基盤観測研究を推進していく必要がある。このような海陸プレートの境界領域では、単純なプレートテクトニクス理論からのずれが本質的に重要となるが、その詳細についてはまだ十分な理解は得られていない。広域的基盤観測による詳細なマッピングは、地震火山国として長年積み上げてきた日本の観測研究技術を生かし、各地域における自然災害予測を通じて国際貢献を行うという意味でも極めて重要である。

こうして得られた膨大な観測データを効率的に解析して有効な情報を抽出し、地球内部の変動現象をモデル化するためには、地球シミュレータ等の超高速計算機システムによる大規模シミュレーションが不可欠である。将来的には、次世代の地球シミュレータ(1ペタフロップス、1ペタバイトメモリ)を開発することにより、物理・化学的性質の異なる地殻、マンツル、コアをサブシステムとする複合的な地球内部変動シミュレーション・システムを構築し、全地球規模のコア・マンツル・プレート運動から日本列島規模の地殻活動までを統一的且つ定量的に再現することが可能となる。

(c) 地震・火山活動の予測可能性

1995年に発生した兵庫県南部地震による大災害を教訓として日本列島域に整備された地震・地殻変動の基盤観測網(HI-NET, K-NET, GEONET等)は、高精度・高感度な測器による均一かつ高密度な定常観測が地球科学のブレイクスルーを生み出すという意味において、地震・火山研究のみならず固体地球科学全般に対し、大きなインパクトを与えた。一例を挙げれば、マンツル対流の地表への現れとしてのプレート運動が引き起こす日本列島の時々刻々の地殻変形が捉えられるようになり、海溝沿いのプレート境界の巨大地震発生域の周辺では非地震性のゆっくりとした断層すべりが進行していることが分かるなど、地球科学的に第一級の研究成果が続々と得られている。

このように、現在日本列島域で行われている観測研究は世界の最先端を行くものであるが、学術研究レベルにとどまらず、地震・火山噴火の発生予測への応用を目指した研究を強力に推進し、世界をリードし続けるためには、既存の基盤観測網の拡充とともに、得られた膨大なデータの保存・解析・流通機能を持つデータベース・センターを創設する必要がある。また、広域基盤観測によって新たに見いだされた現象の理解を更に深めるための集中的基盤観測の実施、陸域に展開されている現在の基盤観測網をプレート境界地震が発生する周辺海域にまで拡張する海底基盤観測網(地震・地殻変動)の整備とそれに付随する新技術の開発に加え、基盤観測項目に必ずしも含まれていない活動的火山の定常的監視のため

の地震・測地観測網の集中展開及び 3 次元合成開口レーダ観測(複数個の合成開口レーダ衛星システムの運用による変位 3 成分観測)などの新技術の導入等を積極的に推進する必要がある。火山噴火予測という面からは、マントルから上昇してきたマグマの地殻内での蓄積過程や地表への移動に伴って起こる様々な地球物理化学現象を高精度でその場観測することも重要である。具体的には、活火山の中心への深部掘削によるマグマ試料の採取と掘削坑を利用したその場観測を行うことによって、地下で進行するマグマ過程を直接的に捉えることが可能となる。また、人工衛星や航空機を用いてマグマの上昇や火山噴火に伴う地殻変動・熱異常を面的に精度よく把握することも重要である。

こうした基盤観測に基づく理解を予測のレベルまで発展させるには、地震活動や地殻変動などの観測に基づいて現在の地殻の歪み/応力状態をリアルタイムで把握し、将来の大地震の発生とそれに至る一連のプロセスを定量的に逐次予測するためのシミュレーション・システムを開発する必要がある。このシミュレーション・システムは、膨大な観測データと高度な理論モデル計算を融合させるものなので、その開発には地球シミュレータ等の非常に大規模な並列計算機システムが不可欠である。

以上のことを踏まえ、地震・火山活動の予測に向けて今後 10 年間で特に推進すべき重要項目を列挙すると、1)地震観測については大深度での地震観測アレイの整備、2)地殻変動観測については陸域 GPS 観測網を補完する海底地殻変動観測システムの開発・整備と 3 次元合成開口レーダ観測の実施、3)データ解析及びシミュレーションについては地殻活動データベース・センターの創設と地殻活動予測シミュレーション・システムの開発ということになる。

9-3-3. 地球システムと人間圏の拡大

強い磁場とオゾン層という二重の壁に守られた現在の地球システムは、地球の長い進化の歴史を通じて形成されてきたものである。強い地球磁場は、27~28 億年前頃に誕生したと推定されている。これに対して、オゾン層の誕生は 5~6 億年前頃で、それ以前は、陸は生物にとって不毛な赤茶けた地帯でしかなかった。強い磁場存在しなかった頃の地球では、原始生命は深海熱水系の化学エネルギー循環系に依存して生活し、一部の微生物が表層 100m 程度の有光層内部で原始的な光合成を行っていたと考えられている。強い磁場の誕生が浅海で大規模な酸素発生型光合成を可能にし、地球大気中の酸素濃度を増加させていった。地球システムの変化に伴って、地球生命は棲息環境に対応した多様な進化を遂げていった。6 億年前以降の陸地面積の急激な増加に対応して起きた表層環境の多様化とともに生命も多様化して、雌雄の分化が起き、究極の多様性のメカニズムが生まれた。600 万年前に誕生した人類は、1 万年前の農業・牧畜革命、6000 年前の都市革命、3000 年前の宗

教革命、300 年前の産業革命を通じて爆発的に増加して生物圏の中で異常に大きな存在となり、人間圏を形成するに至った。そして現在では、人間圏は地球システムに無視できない影響を及ぼし、様々な環境問題を引き起こすようになった。

(a) 地球システムの進化と安定性

地球表層環境は、プレートとブルームの運動による全地球規模の大気・海洋成分の変動に伴い、地球史の中で大きく変化してきた。27 億年前以前は中央海嶺の熱水循環によって海洋地殻表層に大量に固定されていた炭酸塩鉱物は、海溝からマントルに沈み込むとともに炭素をマントルへと移動させ、大気・海洋の二酸化炭素除去の役割を担った。これが地球表層の温度低下の主要な原因となった。一方、含水鉱物はマントルでは不安定で、沈み込み帯の浅部で脱水分解して地表へと循環した。マントルの温度の低下によって、7~8 億年前頃になると、含水化したプレートはマントル遷移層(410~660 km 深度)まで海水を輸送できるようになり、そのためにマントルへの海水の逆流が始まり、地球は過去 6 億年の間に約 600 m の厚さの海水を失った。

一方、10 億年前から 6 億年前にかけて、赤道に達する巨大氷河に覆われ、生命の維持にとって史上最大の困難な事態に瀕していた地球は、加水化されたマントルの局所的な粘性の低下と融点降下によって、再び活発なプレート・ブルーム運動を行うようになり、大気中の炭酸ガス濃度を増加させた。その結果、温暖な顕生代型の地球が生まれ、陸地面積の増加と比例して酸素濃度が急激に増加して硬骨格をもつ大型多細胞生物が誕生した。やがてオゾン層が生まれ、生物は陸上に進出して緑の景観が広がった。

長い時間の歴史でみると、地球システムは外部からの擾乱に対して、実に多様な応答を示してきた。例えば、約 1 億年前に起きた地球規模の大規模火山活動では、大気中の炭酸ガス濃度の増加が地球規模の温暖化を引き起こしたし、また 27~28 億年前にほぼ地球規模で起きた洪水玄武岩の噴出の際にも温暖化が生じている。

さらに短時間の突発的事件は白亜紀末に起きた巨大隕石衝突と恐竜の絶滅、固着型浅海生物の絶滅に特徴付けられる古生代/中生代境界(2.5 億年前)の超貧酸素事件などがあるが、数年から数百万年に及ぶ表層環境の激変が当時の地層に記録されており、生物の大量絶滅のメカニズム解明するための絶好の試料となる。

地球の冷却とその物理的必然としての固体地球変動、その結果として起きた地球表層環境変動の記録は、地球システムの応答の解明に重要な情報をもたらす。

(b) 固体圏/流体圏境界層の物質移動

固体圏、流体圏、生命圏そして人間圏からなる地球システムの境界層において、物質エネルギーの蓄

積・移動が、現在どのように進行しているのかを直接観測することは特に重要である。なぜなら、上で述べた過去における変動、システムの応答が、どのような時空間スケールで進行するのかを理解する基礎であり、二酸化炭素の増加など、地球表層における擾乱を安定化させる機能を、固体地球がどの程度もっているのを理解する基礎だからである。

この部分はまた、人類が様々な形で利用し(水・エネルギー資源開発、産業立地、廃棄物処分等)、その結果、人間圏が負のフィードバックを受けることになる場所でもある。平野部や沿岸部は、とくに人類の活動が集中する場所であるが、そこはまた、短周期の地殻変動や海水準変動の影響を受けやすい場所でもある。従って、この観測は、地球環境と人間圏の未来予測・未来設計にとって不可欠のものである。

岩石圏の表層 30 km 程度、すなわち陸であれば堆積層を含めた地殻、海であれば地殻とマントル上部が固体圏と流体圏の境界層である。プレート境界域では特に活発な物質エネルギー移動が進行する。この境界層において大規模な地下水の貯留や循環が進行し、そこで活発な流体・岩石作用、有機物分解・貯留・移動の起こっていることが、これまでの地下の研究と膨大な深海および陸上掘削によって明らかとなっている。たとえば流体・岩石相互作用は流体圏の二酸化炭素を大規模に固定させる機能を持ち、有機物の分解などは、この境界層が最大の生物起源エネルギー貯留層であることなどである。また、近年の地球科学の最大の発見の 1 つは、地下深部に棲息する微生物圏の発見である。現在、地下 1000 m の岩石の中から微生物が発見されている。今後、地殻全体からマントルに及ぶ岩石の中から地下生物が発見される可能性がある。極限環境への生命の適応と進化の理解は人類の生命観を一新するものであり、その医学・薬学・農学などへの応用は計り知れないものがある。

この境界層の構造、そこでの流体移動、貯留、流体・岩石相互作用などを未来予測・設計や人間圏との関わりを解明するに足る精度で理解するためには、地表からの間接的な地球物理学的観測手法や実験室での模擬実験のみでは極めて不十分である。なぜなら、この部分は地域特性の強い対象であり、構造や構成する物質が著しく不均一であるからである。日本が建造した世界で最深度掘削の可能なライザー掘削船「ちきゅう」や陸域掘削プログラムなどを活用し、超深度掘削による地下の直接観測によって実態を把握することが、今後極めて重要である。

(c) 最近 80 万年間の地球環境変動

太陽と地球の距離が周期的に変化する為に起きる気候変化、或いは大陸が北半球に片寄った分布をしている為に、地球自転軸や歳差運動のぶれによって起きる地球気候の精密解析は、近未来地球環境変動を予測する上で極めて重要である。ミランコビッチ周期は、40 万年、10 万年、41000 年、23000 或いは

19000 年の 4 つが認められているが、10 万年の氷期サイクルが卓越するようになったのは、50 万年から 80 万年ほど前である。ミランコビッチ周期から、現在の温暖期(完新世)は、40 万年前、12 万年前を中心とした間氷期に対応しており、特にこの時期の気候および環境変動の詳細を把握する事が重要である。地球磁場の逆転周期にも、約 4 万年と 10 万年の周期があり、その正の相関関係は氷河のサイズの拡大・縮小変化が自転軸のぶれと連動している可能性を示唆している。そのぶれが外核流体運動の差別的運動変化の原因になる可能性があり、外核とマントルの境界の数 km 以下のわずかな凸凹の正確な測定と関係付けた総合研究が期待される。

10 万年周期を持つミランコビッチサイクルの新たな周期に突入した 12000 年前頃に、急激な温暖化が始まった。急激とはいっても、気温の上昇は 5500 年かけて 7~8 上昇した程度であった。その間に北半球の大陸を覆っていた巨大氷河が収縮して融解した生じた大量の冷水が至る所で浅い湖を作った。海洋へと続く水路を閉ざしていた自然堤防が断続的に崩壊して、地球規模の気候モードジャンプが起きたらしい。複数の超巨大自然ダムが、北米西部、東部、シベリア、黒海北部などで崩壊して起きた気候モードジャンプは、全地球規模での古気候の総合的な精密比較解析によってメカニズムの解明が可能になるだろう。約 5000 年前になって、氷河の融解水に因る北半球の広大な湿地帯が乾燥化し、地球規模の大気循環が変化して北アフリカと中近東地域の砂漠化が始まった。エジプト文明とメソポタミア文明の崩壊もまた、一連の気候変化の流れの中での絶好の研究対象である。

以上のように、古気候変化の定性的なシナリオは明らかになっているものの、そのメカニズムの解明に向けた総合的な研究戦略は不十分であり、次の緊急課題となっている。特に、過去 80 万年頃の 10 万年氷期サイクルの出現メカニズム、現在の温暖期に対応する 40 万年前の温暖期の終焉、過去 12 万年の古気候の地球規模の精密比較に関する研究が未来予測に向けて重要である。今までの古環境変動研究の問題は、一部の氷床掘削データを除いて分解能が人類社会のタイムスケール(50 年程度)と一致していないことである。これは、主に堆積速度の小さい遠洋性の堆積物の記録に頼ってきたからである。50 年の平均記録を地層で解読するには、生物攪乱作用を考慮し、50 年・10cm 以上の堆積速度が必要となる。このような早い堆積速度は大陸や島弧縁辺の地層の特徴である。後氷期と同様な安定して 1 万年の温暖期は、約 40 万年前の間氷期に見いだされる。したがって、現在の気候変動に対応して古環境変動を解明するには、過去 12 万年間だけでなく、50 年スケールで 80 万年間、記録を解読する必要がある。これは 1000 m 以上の厚い地層の解読が必要となる。

南極氷床や海底のコア掘削による高時間分解能研究、少なくとも 6 箇所の世界標準地域(大海洋、赤道、

極域、湖沼)を設定し、掘削試料を使った徹底的な比較(花粉分析、同位体温度、年代)が重要で、スーパーコンピュータによる古気候モデルとの比較検討が応答メカニズムの解明につながるだろう。

これまでの深海掘削計画(DSDP/IPOD/ODP)による掘削地点は既に1200箇所を数えている。今後は過去80万年の精密解析に向けて世界標準地域を選定し、1)IODP計画による掘削船「ちきゅう」による1000m以上の厚さの地層掘削、2)ICDP計画による湖沼を中心とした陸上掘削が不可欠である。

また、コア分析センターでのデータ生産による50年スケールでの記録解読が必要となる。さらに、測定項目が統一された、データベースの作成に向けた国際共同研究計画の推進が鍵になる。

(d) 人間圏の拡大と地球環境の変化

産業革命以降の異常としか思えない経済の急速な発展は、科学と技術の急速な発展の結果起きた、世界人口の「ねずみ算」的異常増加が原因である。科学と技術の発展は、食糧の増産を可能にし、人の寿命を延ばした。それを可能なさしめている直接的な原因は、石油、石炭、天然ガス、原子力燃料などの埋没化石エネルギーの利用である。これらは地球が数億年かけて造り出した貯金ともいえるものである。貯金には限界がある。20世紀の加速度的な物質文明の成長に、やがて、思いのほか早く限界がやってくることを予測したのが、ローマクラブの歴史的な業績である。

倍々ゲームで増加する世界人口に比べて、食糧の増産が追い付かないことは、既にマルサスが200年前に予言していたことではあった。最近ではコンピュータを利用して、世界人口、食糧、工業生産、環境汚染、埋蔵資源の5つの量について、西暦1900年から1970年までのデータを参考にして、以降2100年までの予測を行うことも行われている。そのような予測として、いわゆる2020年問題と略称される、人間圏の異常な拡大による「地球システムを脅かしかねない」課題がある。

人間圏の拡大による地球環境の変化の例として、地球化学環境汚染がある。膨張する人間圏が「生物としての人間の持続」に与えた重大な警告の一つが地球環境の化学汚染である。産業革命直後の英国と北欧、その百年後のアメリカ五大湖周辺、そして21世紀の東アジアで予測される、酸性雨、環境ホルモン、重金属汚染などの、大気・海洋・湖沼・土壌汚染である。

化学汚染問題は今後、開発途上国に一層深刻に重みが増えて行くが、先進国の政治・行政・教育問題とも深くかかわっている。その理由は地球環境問題が、地球に棲むどの国の人間にとっても全て否応なく被害者にならざるを得ない問題であって、特定の国家や個人だけが避けられうる問題ではないからである。いわば地球人の問題として、国境を越えて、国家の利益を越えて対応せねばならない大問題であ

るからだ。さらに、地球環境問題の行方は、世界人口63億人の90%を占める開発途上国がキャスティングボードを握っていることを忘れてはならない。

環境汚染を地球科学の観点から見た場合、重要な課題は、自然のバックグラウンドの値がどのようなものであるかを知ることと、汚染物質が自然界の物質循環のなかに組み込まれた場合、どのような挙動をするかを明らかにすることである。自然のバックグラウンドがどのような値であるかは、本来大変重要な基準点のはずだが、あやふやなまま汚染が議論されているのが現状である。土壌のバックグラウンド値を求めるという目的で、現在、地球化学図作成プロジェクトが国際的に進められている。まず、サンプリング法、分析法、図化法について統一的な国際基準を作ることと、地域的な地球化学図を国際基準で整備することを目指している。この仕事は、ヨーロッパではかなり進み、最近では中国が大々的に推進している。日本では、産総研(旧地調)によって、全国を概査するプロジェクトが今年度(2003)終了して、200万分1全国地球化学図が出版される。地球化学図は、もともと天然に存在する元素、化合物を念頭において考えられているが、ダイオキシン類やいわゆる環境ホルモンなど、本来自然には存在しなかった微量有機化合物についても地球規模で実態把握をする必要がある。

地球周回衛星によって、エアロゾル(例えば中国の黄砂)の発生源、量、分布、移動の把握が既に米国の衛星(Earth Probe, Terra and OrbView-2)によって定量的に観測されつつある。さらに、河川によって海洋に放出される懸濁粒子の量、分布、移動、あるいは、地表の水分分布とか酸化物の種類と分布は、地球周回衛星の充実によって解析されるだろう。地質構造の解析と組み合わせて、汚染物質の移動(結局は地下水の移動)を解明することも重要である。

ある元素が有害かどうかは、その元素の存在状態(化学種、鉱物種、吸着、溶存等)や、水への可溶性、生体へのとりこみメカニズムなどによって決まる。ところが、汚染物質の挙動について、総合的な国際プロジェクトはいまだ存在せず、研究者レベルでの小規模な研究が大部分である。メカニズムが不明なまま、観測が先行しているのが現状である。メカニズムを明らかにする為には、特定の元素や試験管内の反応だけの解析では不十分で、その地域の地下水の水質や地質、土壌の地球化学的特性と切り離しては考えられない。

土壌汚染対策法など、最近では、法律で環境汚染を防止するための基準を設けて対策を講じているが、現状では汚染物質の化学的実態と挙動のメカニズムに不明な部分が多く、研究の進展と同時進行で新たな整備が必要である。地球化学汚染対策については、特定の微量元素を選択的に体内に濃集する微生物による環境浄化作用(バイオメレディエーション)の開発が威力を発揮するだろう。

9-4．地球科学観測の重点課題

地球システムの理解という視点から、3 章でまとめた現状と課題に基づき、本部会として特に重要と考えられる地球観測に関する重点課題をまとめる。しかし、地球システムの理解というだけでは、その視点があまりに大きく漠然としすぎている。そこで以下では、そのなかで更に焦点を絞ったくくり方で、テーマをまとめることとする。まず、太陽放射という外部駆動力によって地球システムの表層付近の構成要素間の関係性が支配される重要な領域という意味で、ジオスペースに注目する。極域は、そのような地球システムへの外部からの入力に最も鋭敏に応答する地域で、その応答メカニズムを観測するという意味では、最も適した地域である。しかも、現在、国際地球観測年開始以来 50 年を迎え、新たな国際観測計画が準備されている。固体地球に関する地球システムを観測する場としては、アジア、太平洋地域がそのような場として注目され、わが国の地理的環境もその観測に適している。地球システムの応答メカニズムを理解するという意味では、過去に起こった地球変動の記録をより高い時間分解能で観測することは必要不可欠である。具体的には掘削という手段でくられる。これまであまり注目されていないが、地球システムの変動として 100 年という程度のタイムスケールで進行しつつある変動がある。地球磁場の変化である。それは外部からの擾乱に対しては脆弱な地球システムを守るバリアーであるがゆえに、その変化はこれから注目しなければならない。気候システムの変化は人間圏の拡大のみによって起こるわけではない。温暖化に関しても南方振動の影響など、自然的要因についての理解を深める必要がある。

9-4-1. 太陽活動が引き起こす地球システムの大規模変動観測

[太陽面爆発に伴うジオスペース環境の変動と予測]

地球の最外圏環境であるジオスペース(電離圏、超高層大気から磁気圏までの領域)は、太陽面爆発に対して劇的に応答し、磁気嵐を引き起こす。この大規模な地球システム変動は、様々な物理機構を経て、放射線帯の粒子分布や超高層大気の組成・構造を激変させて、通信・放送・測位・地球環境監視等の人工衛星に障害を与え、その運用に甚大な支障をきたす。更に衛星・地上間の電波伝搬の経路である電離圏の激しい変動は、GPS、VLBI などを用いた衛星測位システムの使用不能、あるいは測位精度の低下といった事態を引き起こす。このように、放射線帯や電離圏というジオスペース環境の大規模な変動は、人類の社会活動を脅かしている。衛星システムの耐久性・信頼性を高めることが必要とされている現在、ジオスペース環境の変動原理の解明と実用的な予測技術の向上は、21 世紀の安全な宇宙利用と社会基盤の維持発展のための緊急の課題である。したがって、地上磁力計・レーダ観測網を高度化・広域化し、ジ

オスペース環境科学衛星による総合的な直接観測(荷電粒子・電磁場・プラズマ波動の同時観測)を放射線帯中心部において実施する必要がある。また日本が主体となりアジア・オセアニア域での観測に先導的な役割を果たすことも、この地域の社会基盤の安定した発展のための重要な課題である。

<太陽活動が地球表層大気に与える影響の定量的評価>

将来の地球環境をより正確に予測するためには、太陽からのエネルギー(放射と粒子)や宇宙線が地球表層付近の大気に与える影響を定量的に評価する必要がある。そのためには、地球表層から超高層までの大気間結合に加え、太陽起源・人為起源・地球自然起源の三者間の相互作用を考慮しなければならない。地表付近の大気変動は超高層大気に到達する過程で大規模に増幅されるため、この増幅原理を解明し、超高層大気の変動を定量的に評価することで、地表付近の気候変動をモニターすることが可能となる。また、太陽活動に対する地球表層付近の大気の応答や気候変動の因果関係は、様々な時間スケールで、かつ定量的に評価されることが重要である。したがって、地球磁場の逆転や極端な減少の効果も考慮しつつ、人為起源の無い環境下で生成されたアイスコアや年輪の解析から過去の大気変動の解明をもとに将来変動の予測を行う必要がある。

上記の研究目的と深く関連する ICSU の下の SCOSTEP が推進する国際共同研究計画 CAWSES(2004～2008)と連携し、日本の独創性、主導性を発揮できる分野を特に重点的に推進する。

以下に必要な観測を列举する：

地上観測：地上磁力計・レーダ観測網、アジア・オセアニア超高層観測網(赤道レーダ・光学機器・GPS・磁力計による総合的観測網)、極域観測(北極(日本の先導的国際協力：北欧とアラスカ)、南極観測(大型大気レーダの建設や内陸の無人観測網等))
飛翔体観測：ジオスペース環境科学衛星、電離圏・熱圏・中間圏リモートセンシング衛星、GPS 掩蔽観測衛星、再使用ロケットによる繰り返し観測

9-4-2. 地球磁場強度の低下とその表層環境への影響の解明

19 世紀の始めにガウスが地球磁場の測定をして以来、地球の磁場はどんどん弱くなっており、最近ではその減少傾向が加速されており、この減少率がもしこのまま続けばあと 1200 年程度で地球の磁場が消えてなくなることになる。地球磁場の極端な減少は、宇宙線の地球大気への侵入を容易にし、地球の大気と直接作用し、雲の生成や大気の変成等に影響を与え地球システムをおおきく変動させる可能性がある。例えば太陽面爆発(太陽フレア)に伴い高エネルギー粒子が極冠域に入射すると、中間圏や超高層大気を電離し、そこにおける化学反応過程に大きな影響を与えることが、現在観測的に明らかになっ

てきた。

このように地球磁場変動の影響は甚大であり、地球磁場の汎地球スケールでの観測や高エネルギー粒子の衛星観測に加えて、衛星および地上からの分光器による成層圏オゾン・窒素酸化物の観測、イメージングリオメーターによる下部電離圏から中間圏での電波吸収観測、レーダによる電磁圏観測、宇宙線の観測など組織的な同時観測が必要である。磁場強度監視は南北両半球に均一に分布した定常観測点が必要であるが、南極域では観測点が著しく減少しており、歯止めが必要である。

<極域重点観測> 南極、北欧、アラスカ

9-4-3. 極域(環境変動予兆の敏感なセンサー)の総合観測

極域は宇宙空間との接点であり、太陽活動の大気への影響を調べるためには最も重要な地域である。また、地球環境変化が如実に現れる地域でもあり、環境変化の監視に最適である。さらに人間活動に起因するノイズが殆どないという特性を活かすことができる。これまで、わが国の極域の観測はオゾンホールが発見やオーロラの南北共役性の解明などに関し重大な成果を挙げてきたが、IPY-4を始めとする各国の取り組みと連動し、日本の極域観測も、強化・充実する必要がある。

[大気・超高層観測]

極域大気の示す気候変動シグナルを確実に捉えるために、他の緯度帯に比して物理の解明が未だ十分でない中層大気(成層圏、中間圏、下部熱圏)から電磁気圏にいたる広汎な極域大気における地球環境「観視」を継続する必要がある。このためにはわが国で開発され、高精度観測に活躍している大型大気レーダを世界に先駆けて南極地域に設置し、国際的な一大拠点として整備を進めることも有効である。さらに北極圏での観測と連動させることによって、温暖化や高層の寒冷化、大気循環等の南北非対称性等を南北両極の視点から同時に解明する。

[衛星観測と地上検証]

南極大陸の氷縁の変化を 10・20 年規模で監視するためには、衛星リモートセンシングが不可欠である。また、GRACE の打ち上げにより、重力衛星による水循環の変動監視の時代に入ったが、衛星センサ開発を含めた日本の積極的寄与が求められている。衛星観測の地上検証のためには、グローバルジオダイナミクス監視網の南半球における要である南極昭和基地で、絶対重力測定、超伝導重力計観測等について精密観測を継続する。さらに、航空機を用いた重力、アイスレーダ氷厚、等の系統的測量を実施し、水循環の変動スケール(100 km, 1 ヶ月~1 年)で重力分布を検知するために必要な標準重力場を確定する必要がある。

[極域重点観測]

南極、アラスカ

[衛星観測]

GRACE, ALOS, GOCE

9-4-4. 二酸化炭素濃度の増加と地球温暖化のメカニズムの解明

地球観測の緊急課題の一つは、二酸化炭素濃度の増加と地球温暖化のメカニズムの解明である。これらの間の正の相関関係については、理論、過去 100 年の大気組成観測、地球史 46 億年の記録の解読、これら全てのデータによって間違いなく支持される。問題は過去 100 年の二酸化炭素の増加がすべて人間による化石燃料の消費に因るものかどうか、またその増加が地球規模の温暖化をどれだけ引き起こしているかどうかである。

この問題を解決するには、二つのアプローチがある。その第一は、大気中に二酸化炭素が急激に増加した時に起きる地球システムの応答メカニズムを、過去 80 万年の堆積物試料(氷床コアも含む)を地球規模で系統的に収集・解析・比較し、二酸化炭素濃度変化と地球気温の変化の関係を調べ、炭素の起源を同位体組成に基づいて特定することである。人間圏が小さく気候システムに影響を与えることがなかった時代の応答メカニズムが解明されると、現在進行中の地球システムの変動(大気組成、表層生物活動、表層温度)を地球観測することによって、応答メカニズムの方向性が分かるだろう。同位体組成から炭素の起源が化石燃料起源か、ガスハイドレード起源か、などの議論が可能になるだろう。また、増加した二酸化炭素を消費する生命活動の遅れのメカニズムの解明が進むだろう。これらが明らかにになれば、地球大気を制御する技術の開発へと発展するだろう。

第二のアプローチは、極域での二酸化炭素のモニタリング観測である。特に、温暖化が最も進行している北極の海洋域と永久凍土域での炭素循環の長期モニタリング観測は重要である。北極海洋域は、現在は二酸化炭素の吸収域であるが、温暖化による海氷の消失や植物プランクトン大繁殖による生物ポンプの強化は、さらに二酸化炭素吸収の強化に働く可能性もある。北極域のツンドラ地域では、温暖化に伴う永久凍土層の融解が、土壌中植物の分解による二酸化炭素の放出を引き起こすのか、あるいは逆にツンドラ植生の繁茂により二酸化炭素の吸収を引き起こすのかは重要な課題である。このため、観測ネットワークの広大な空白域である北極ツンドラ域に観測拠点を整備し、長期モニタリング観測を推進する必要がある。また、地球規模の二酸化炭素のバックグラウンドを示す南極昭和基地での長期モニタリング観測も継続して推進する必要がある。二酸化炭素のモニタリングとともに、炭素の起源を同定するため、同位体の観測も必須である。

[掘削]海洋と陸域，南極氷床

[大気組成]南北両極での二酸化炭素モニタリング観測

9-4-5. 古気候解析による過去 80 万年間の表層環境変動の復元

地球気候システムの特性として，その状態が複数の準安定モードの間で不連続的に変化することが，過去の環境変動の研究から明らかになりつつある．突然かつ急激な気候変動は，その典型例である．こうした変動のメカニズムや伝播過程，人類がこれから体験するかもしれない，より温暖な準安定モードの実態を理解するには，地球上に点在する気候変動に特に敏感なスポットを中心に，全地球を空間的にカバーするように掘削地点を設定し，高い時間分解能を持ち連続的な堆積記録を乱さず回収して，出来る限り多くの古気候，古環境パラメーターを系統的に取り出し，高精度で定量的に古環境復元を行なう必要がある．

近未来に起きると推測される気候寒冷化の予測には，10 万年の氷期サイクルが始まったとされる 80 万年前，現在の温暖期に対応する 40 万年前および 11～12 万年前の古気候の解析が最も重要である．気候の寒冷化がはじまる時に，地上のどこから予兆がはじまり，どの地域へ，どのような気候変化や災害の伝播が進行してゆくのか，そのプロセスの理解には，11～12 万年前の試料(深海と湖の掘削)の徹底的な解析が最も効果的である．試料収集の候補地域は，赤道，極域，及び，陸上(北米五大湖，バイカル湖，黒海)の 10 箇所程度が挙げられている．それらの試料の徹底的な解析を進め，気候変動のメカニズムの解析を進める．収集データの統合化と気候モデルとの比較検討がゴールへの鍵になる．

日本がすすめる当面の重点的観測対象としてアジアモンスーン古気候解析を進める．アジア内陸部は，アジアモンスーンを駆動する敏感なスポットであり，アジアモンスーンは河川流出などを通じて，周辺海域の環境に大きな影響を与える．また，西赤道太平洋暖水域は巨大な熱源として，そこに源を発する黒潮は，強力な熱輸送経路として地球気候システムに大きな影響を及ぼしていると考えられるが，過去におけるその挙動やその支配要因は，北大西洋に比べて，あまり明らかにされていない．その他の標準地域は，日本も参加する国際共同計画によって，観測を進める．

観測項目としては，海面水温，塩分，海流流速，生物生産量，風向，風強度， pCO_2 など，具体的測定項目としては，酸素同位体比，炭素同位体比，窒素同位体比，有機物含有量，バイオマーカー組成，碎屑物粒度，碎屑物鉱物，化学組成，微化石組成，などが考えられる．目的を達成するため，統合国際深海掘削計画(IODP)，国際陸上掘削計画(ICDP)，国際古海洋変動研究(IMAGES)などの掘削計画を国として

推進する．

9-4-6. 地球内部変動と表層環境の相互作用メカニズムの解明

地球システムの固体圏と流体圏・生命圏の境界層である地殻・上部マントルの超深度精密観測によって，地球内部と表層間の物質，エネルギー移動，相互作用を解明する．加えて地球内部極限環境に生存する生命の探索を進める．

この地球システムの境界層は，地球表層環境のソース&シンクとして直接的役割を果たしている．水・エネルギー資源の抽出，貯留，廃棄物処理など人類にとっての直接的利害にかかわることはもとより，その観測にもとづく境界層の深い理解は地球環境の持続的生存のための未来予測・未来設計にとって不可欠である．また，超深度地下微生物の探索によって：1)地球内部では，原始生命に最も近い特徴をもつ微生物の発見が期待できる．2)海洋地殻とその下のマントルでは，岩石と流体の反応による生命誕生までの化学進化過程が検証できる可能性がある．3)極限環境に適応する生物のメカニズムが解明される，など計り知れない応用がもたらされる可能性がある．超深度地下微生物の発見は，人類のフロンティアの 1 つであり，超深度掘削船「ちきゅう」を用いて我が国がリーダーシップを取って推進すべき課題である．

重点的観測地域としては，1)最も活発に相互作用が進行するプレート沈み込み帯や海嶺系のプレート境界域，2)都市が集中する海陸境界の平野部，3)海洋地下資源の集中する沿岸部，4)そして廃棄物処理等にとって重要な，内陸部があげられる．

観測項目は，複雑な地殻内部の地質構造観測，地球内部の歪，応力，流体圧，流体の移動特性，流体および岩石の化学組成の連続的観測である．特に季節変動，地震活動火山活動などに伴う変化，大気海洋の変動と地球内部変動との連動などが重要である．

観測手法は，1)掘削による岩石・流体試料の採集，特に流体は繰り返し採集が不可欠であり，2)掘削孔の連続観測モニターが重要である．これらの掘削の実行は，日本のリーダーシップの下で開始された統合国際深海掘削計画(IODP)，陸域では国際大陸掘削計画(ICDP)による国際連携によって進めるのが重要である．

超深度掘削船「ちきゅう」の最初のライザー掘削は，東南海地震の地震発生帯で実施すると国際的合意が統合国際深海掘削計画(IODP)において得られた．その掘削によってプレート境界まで直接ボーリングを行い，試料の採集，掘削孔の計測，そして境界断層そのものに長期観測センサを設置することが計画されている．そのような観測網は，巨大地震の事前通知に役立つ．プレート境界で地震が発生すれば，光ファイバーケーブルによって，地震波到達より早く事前通知(数十秒前)が可能となり，都市機能

を自動的に事前通知に対応するように機能改革することにより、多くの人命やインフラを救うことができる。世界で、このような観測は前例がなく、地球観測に日本がリードして新たな次元を開くものである。この掘削に伴う観測項目は重点的課題 4-7 とリンクしつつ、同時に、上に挙げた地球内部変動と表層地球環境の相互作用、超深度極限生命の探索をも網羅しており、重点的にすすめるべきではない。

9-4-7. アジア・太平洋域のマルチスケール地球内部変動観測

巨大な観測空白域である太平洋地域と定常的観測基盤の整備されていない東南アジア地域を対象として、全地球規模から地域規模までの階層構造を持つ固体地球観測網を APEC 諸国との連携・協力の下に構築し、地震・火山・測地・電磁気等の総合的観測を実施することで、固体地球システムのダイナミクスをマルチスケールの複雑な相互作用の連鎖として理解するとともに、プレート沈み込み帯の地震発生及び火山噴火メカニズムを解明する。

我が国は、「海半球ネットワーク計画」や「全地球ダイナミクス計画」を通じて西太平洋域に長期的な固体地球観測網を構築してきた。これらの計画によって培われた世界をリードする海底観測技術を生かして、巨大な観測空白域である太平洋に光海底ケーブル等を活用した総合的地球観測網を構築することは、21 世紀の地球科学の発展に向けた我が国の大きな貢献である。また、世界最大のプレート沈み込み帯である西太平洋地域を、マントル対流と地震・火山活動の直接的相互作用の場として位置づけ、APEC 諸国と連携・協力しながら、地震・火山・測地等の広域的基盤観測研究を推進していくことは、地震火山研究の先進国である我が国の責務でもある。

本重点課題では、今後 10 年間に亘って、以下の 3 つの観測計画を推進する。

(1) アジア・西太平洋域地震火山観測：国際的実績のある「海半球ネットワーク計画」や「全地球ダイナミクス計画」で西太平洋域に展開した観測網を東南アジア・オセアニア地域に拡充することで、アジア・西太平洋域をカバーする地震・火山・測地観測網を APEC 諸国との連携・協力の下に構築し、太平洋下の沈み込んだ海洋プレートやマントルブルームの構造・ダイナミクスの解明、太平洋プレートが沈み込むこの地域の地震・火山活動の比較・総合観測を行うとともに、地震・津波・火山データの蓄積と情報発信、並びに発展途上国における研究・技術者の養成に貢献する。

(2) 北太平洋域海底ケーブル総合観測：観測空白域である北太平洋域に使用済みの通信用光海底ケーブルを有効利用した地球物理総合観測網を整備し、プレート沈み込み帯の地震発生領域を海側からリアルタイムで監視することで巨大地震の発生メカニズムの

解明及び津波伝播予測に資するとともに、北太平洋における深層海流観測を通じて海洋循環・気候変動の解明に資する他、海底ケーブルを超長尺アンテナとして用いた電磁気観測により地球磁場変動の解明にも資する。

(3) 日本周辺海域海底基盤観測：日本周辺海域に光海底ケーブルによる海底基盤観測網を整備し、既に陸域に展開されている基盤観測網を周辺海域まで拡張することで、日本列島及びその周辺域の地震活動及び地殻変動を一元的にリアルタイムで観測するとともに、日本列島周辺の海洋環境変動モニターを行う。さらに海洋掘削船「ちきゅう」の掘削孔を用いた深部プレート境界周辺の歪・応力・流体圧などの変動観測を行い、光ケーブルで基盤観測網と接続することで、巨大地震の発生帯の変動を直接モニターする。またこのための技術開発を行う。

9-5. 地球観測の推進体制

9-5-1. これまでの推進体制と問題点

地球科学は我々の生存基盤である地球のことを知る学問であるがゆえに、古い歴史がある。例えば、天気予報の始まりがクリミア戦争での戦艦の沈没事故に始まるのは、よく知られた事実である。我が国においても、戦前の文部省の行政の中で、このような地球科学の国家事業的な側面が、中央气象台などの組織を通して行われた。というよりも、最初に国家事業として取り組まれ、その中で地球科学も展開されてきたというほうが正しいであろう。同様の例としては、東京天文台や、高層气象台、海洋气象台などがある(昭和初期には、高層気象観測は新しい学問分野であり、新しい組織として設立された。後に中央气象台に統合される)。大学との関係は、中央气象台長が東大理学部物理学科教授を兼任することで実現されており、戦前の学部演習なども中央气象台で執り行われていた。また、岡田竹松中央气象台長の「日本のポリテクを作る」という意気込みによって気象技術官養成所が作られ、戦前は、優秀であるが貧困ゆえに上級学校に進学できない多くの人材を集めた。

このような中で、戦後の気象研究所は、地球科学に関する一大研究機関のひとつとして、幅広く地球科学に関する研究者を雇用していたことも特筆しておく必要がある。1956 年の IGY(国際地球観測年)が中央气象台の取りまとめにより展開されたのも、中央气象台が大学と同じく文部省に属していたことと、国家事業の責任省庁として総合的な事業展開能力があったからである。もちろん、このような中央气象台の地球科学の独占体制は、その後の各分野の発展により変化してゆくことになる。中央气象台から気象庁に変化することで、より気象事業に特化した形で発展をし、それぞれの官庁も自分の事業を発展させる形で大きくなっていった。一方、大学も、それ自身を大きくする形で新しい観測に取り組むことに

なった。いわば、戦後の高度成長期は、必然的に、各分野が専門化し、発展する時期であったというべきであろう。しかし、現在もこのままで良いかというのが大きな課題である。

科学は、どの分野でも近年特に巨大化して、加速器やスーパーカミオカンデを例にとるまでもなく、その傾向は地球科学の分野においても顕在化している。明治初期に総合大学として東京大学ができた当時、あらゆる学問分野をカバーして、あらゆる観測や分析機器を一つの大学の中に作った。科学の規模が小さく、研究の進歩も遅かったため、それが可能であったが、現在では時代にそぐわなくなっている。

巨大科学の時代に対応して、海洋科学技術センター、防災科学技術センター、宇宙科学研究所などが次々と生まれ、組織の再編が議論されつつある。21世紀の新時代では、かつての東京大学のような一つの総合大学に対応する新たな巨大科学推進組織体を、日本全体を器にした規模で構築する必要がある。その組織体は、以下に述べる「地球庁」のように、一つの大学の枠を越えて日本全体にわたる地球科学関係の諸組織体を統括し、研究や観測が機能的に推進され、国際的ニーズに迅速に対応できるものでなくてはならない。現代は、そのような時代の大転換期にきているのであろう。

我が国の測地学、地球物理学、地球科学の発展において、昭和24年5月に設置された測地学審議会が特筆すべき存在であった。「測地学および政府機関における測地事業計画に関する事項を審議すること」を目的に、これらに関して必要と認める事項を文部大臣および関係各大臣に建議すると定められた。測地学審議会はその後、地球科学の発展とともに掌握事項を拡大しつつ発展し、IGY、UMP、GDP、GARP、POLEX、IMS、MAP、WCRP など多くの国際協同観測計画の国内推進体として機能し、また地震予知計画、火山噴火予知計画など大規模災害予知研究事業の立ち上げに大きな役割を果たした。昭和56年には「地球物理学の展望と課題」と題する報告を取りまとめ、固体地球物理、測地科学、大気・海洋・陸水系の物理科学、超高層・大気圏外の科学分野の将来の展望を示している。

戦後、我が国の科学研究の民主的発展を標榜して設立された日本学術会議は、戦後の社会的混迷を反映して、必ずしも当初の理念の具現を果たしたとは言いがたい。我が国の学協会の公的連合体、或いは民の立場からの政府に対する要望、勧告の発議機能を有していたと言えよう。地球科学分野を始め、さまざまな研究分野の発展に関する多くの提言を行い、戦後のわが国の科学の発展に寄与した実績は否定しがたい。地球科学分野においても、国際地球観測年(IGY)を契機に1956年に開始された南極観測事業は、昭和30年9月に学術会議が政府に提出した要望のもとに実現した。同年10月に開かれた第20回総会において、観測調査の諸事項を検討するために南極特別委員会が設置され、その推進を計ったこと

は衆知の事実である。学術会議の各科学分野の研究連絡会では、関連分野の推進方策や国際連携についての検討がなされるとともに、重要分野の総合研究計画が検討され、また新たな科学分野の構築のための研究所等の設置の勧告を政府に対して行ってきた。全国大学共同利用研究機関としての東大海洋研の創設は、1958年の学術会議の議決から実現したものである。科学技術庁の創設以降、文部省における学術審議会に対応する審議会として航空・電子技術審議会が設置され、科学技術分野の推進方策が検討され、地球科学観測技術分野の発展に寄与してきた。平成12年の省庁統合以降、前述の測地学審議会、航空・電子技術審議会は廃止され、その一部の機能のみが文部科学省に設置された科学技術・学術審議会の分科会に移行した。

地球観測年(IGY)以降、地球規模観測が、不十分ではあるが、行われるようになった。こうした地球規模の観測計画において、研究者個人或いは大学研究室規模での対応は物心両面から困難であり、その実現には国家的財政支援が必要となる。そのためには、第三者による本格的な評価を行う中立的な審議機関が必要である。最近では施策的研究投資の形(トップダウン型計画)で行われる場合もあるが、大学を基盤とした研究活動と整合的とはいえない。また、地球規模観測計画の多くが複合領域的、境界領域的である場合が多く、関係分野間の課題整理、分担調整、経費配分に関わる協議・推進体の存在が、計画実現に重要な役割を果たす。測地学審議会や航空・電子技術審議会がその役割を果たしてきたことは衆知の事実であるが、現在はそうした審議体に相当するものも存在しない。

かつての審議体は行政審議会の体をなしていたが、委員会を構成する学識代表者の背景に研究者個人・学会・研究組織(大学研究室等)の意見集約機能が存在していたと理解すべきであろう。学術会議の存在理由は、そうした意見集約機能のシステムそのものであるが、学協会そのものがヒエラルキー化し、本来の機能が形骸化した面は否定しがたく、学術会議改組の理由ともなっている。

9-5-2. 期待される推進体制の在り方

地球システムの観測にふさわしい地球規模観測の構築には、必然的に国際対応が適切かつ効率よく行える体制が必要であり、国策的バックアップ無しには困難な場合も多く、トップダウン方策での意志決定メカニズムも必要であろう。長時間をかけての審議が必ずしも有効ではない場合もあることを想定すべきである。しかし、他方で、地球科学分野の個々の課題を担う研究者の意見を反映する仕組みも必要であることは言うまでもない。特に、多様な研究ニーズに対応し、新たな発想・方法論に基づく研究推進には、ボトムアップ・メカニズムが有効に働く方策を確立する必要がある。最近、改組が予定されている学術会議の今後の動向に十分な関心を払う必要

がある。これを活用し、広く一般研究者の要望を反映させる機構を構築すべきであろう。いずれにせよ、現在機能している非政府機関国際学術組織のICSU(国際学術会議)対応体としての機能は存続されるべきである。

地球科学分野における中長期的問題討議の場が存在しない現在、その仕組みが早急に確立されるべきである。国はこの現状を認識し、かつて我が国の地球科学分野の研究者に支持されていた測地学審議会の、現代に対応した審議体を早急に確立すべきである。その場合、古い形の行政審議会の形を復活すべきではなく、科学者のパブリック・オピニオンを広く深く汲み取れるように、NGOであるコンソシアム、科学分野協議会などとの公的連携を計るべきである。

(a)地球観測推進本部の設置

地球観測は、科学のためという側面と国家の基本的情報という側面の両方を持つ。歴史的には、国家の基本情報という側面が強く、多くの地球観測が国家事業として行われ、科学はその基盤の上に展開されてきた。戦前の中央気象台が、東京大学理学部物理学科に教授を派遣していたのがそのよい例である。また、昔は社会の発展のスピードが現在ほど速くなく、地球観測事業の多くが一つや二つの省庁によって担われていたために、学術との関連も、他省庁との調整もうまくいっていたと考えられる。

近年、社会の構造が複雑に、しかも急激に変化し、地球観測に関連する省庁も多岐にわたるようになってきた。南極観測、地球温暖化、安全・安心な社会作り、大陸棚、地震・火山などの問題を扱う部会が、相互の関連もなく個別的に存在しており、地球観測のための効率のよい体制とはなっていない。観測結果に基づいて地球システムの変動原理を解明する「科学推進体制」とは程遠い状況にある。

現在、人工衛星を用いた地球観測が主体になりつつあり、国際協調と共同研究の下に強く国際連携して進むように変質しつつある。したがって、このような体制の中で現実の問題に対応しようとすると、内部調整に多くの時間を割かれ、機動的・整合的な対応が困難になり、国際対応が遅延になりがちである。

複雑な地球システムの理解と地球変動予測は、1)学際性、総合性、領域横断、分野間融合が不可欠な分野の特殊性を持つために、従来の縦割り型部会体制はなじまない。さらに、地球温暖化問題のように、既に諸外国の二酸化炭素排出規制をめぐって政治色を強く帯びているために、2)政治との関係においても迅速な国際的対応を必要とする体制が必要とされる。これは、3)国益と直結する問題でもあり、4)省庁を横断する部会を早急に作る必要がある。従来の方式では、個人ベースで対応してきたために、国益を損じることも多々あった。

具体的には、従来の組織を再編し、地球観測を推

進する本部的な組織(以後、地球観測推進本部)を設置することを提言する。日常的に起きる国際問題や国際共同観測体制に対処し、国益を損なわずに任務を遂行するだけでなく、地球全体が抱える試練の実態の把握と環境変動予測の実現に向けて積極的に世界をリードし、我が国が人類史における大きな貢献を行う場としたい。地球観測推進本部の機能としては、1)予算配分の優先順位付け、2)プロジェクトの成果の評価、3)以下に述べる統合的組織、大学等連携機関などの関連組織への提言を行う。

(b)統合的組織の必要性

5-1.で述べた現状の問題点についての認識に基づき、具体的な機能及びその設置形態に関しては、更なる各方面の学術専門家、行政担当者等を交えた十分な検討が必要であるが、一つの仮想的な考えとして「地球庁」の構想を以下に述べる。

地球観測は、一方では国家意思の下、他方では学術の裏づけを得て展開されなければならない。そのためには、一元的な運営が不可欠と思われる。そのために、現在研究観測を所掌している文部科学省や、地球観測を事業的に展開している省庁、独立行政法人、大学共同利用機関法人、大学の附置研究所・施設などが統合された、新たな、例えば「地球庁」とも呼ばれる、統合的機関を作ることを提案する。

[内部組織]

内部的には、行政的対応、政策対応を主とする部局を設置することが望ましい。データ流通についてのポリシーは掌握しつつも、データ配布などの実務機能は、民間に委託するなどの工夫を図る。また、研究資金財団を外局的に設置し、総合的な研究資金の配分を図る。これらの研究資金の配分方針は、5~6年毎の評価により機動的に変化させる。

[外部連携組織；地球観測大学の設置]

また、教育的な観点では、持続的に継続しなければならないという地球観測の特殊性を考慮して、現在、気象大学校、海上保安大学校など各省庁の持つ実務者養成のための教育機関を統合した総合的な専門的な大学の設置について検討を行う。ここの卒業生を、地球庁傘下の各機関に採用する。一方、2020年まで時間的猶予の少ない国際問題への対処は渋谷に本部を置く国連大学の主要任務の一つとして、地球システムの理解、世界人口問題などの理解を中心とした良質な教育の普及を担当し、特にアジア・中近東諸国を中心に、留学生の積極的な受け入れ等を通して、開発後進国の世界54億人への啓蒙活動を行う。

[研究と教育]

地球システムの観測を国際協調の下で継続的に遂行する為に、地球観測の実務担当者(スペシャリスト)の育成、新技術開発と併せて、地球システムや地

球変動原理の国際普及・啓蒙を推進する人材(ジェネラリスト)教育が必要である。研究と一体化した国際普及・啓蒙を目指す教育を効率良く推進する為に、新たに、地球科学データ情報解析・教育センターの設置を提言する。その中に、説明責任を遂行する為の専用部署を設置して、成果の公表と啓蒙普及活動を国内外に発信する。

特に、地球システムのように複雑な系の研究にとって、汎世界的データ収集とデータベース構築が極めて重要である。その為に、日本の関係組織にもデータセンターやデータ部門が設けられているが、その体制はアメリカのそれに比べて格段に劣る。最近の観測の進歩により日本からも世界の研究者が注目する多くのデータが生み出されているが、データベース化が遅れて、データが効率的に利用されていない。また、データ活動が、省庁現業機関、研究所、大学それぞれで独立に行われていて、統一がとれていない。これらの点を改善するため地球庁に地球科学データ情報解析・教育センターを設置し、独自のデータベースを構築するとともに、外部データ組織の coordination と連携を促進して、日本の地球科学データ組織全体の有機的運営を行う。ここでは、デジタルデータだけではなく、ボーリングコアなどの現物資料の保存分析も必要に応じて行い、また、数種のデータを組み合わせた高次データへの加工、データ可視化への工夫、アナログデータのデジタル化、

古記録の収集プロジェクトなどさまざまなデータ活動を推進する。

このセンターでは、地球科学データを小中高の生徒が興味深く見られるよう工夫し、日英両語で提供して、国内外への普及啓蒙教育活動を行う。この啓蒙活動を通じ、経済至上主義的に人間圏が膨張して、脆弱な地球システムが崩壊しつつある状況を理解させ、地球システム概念の重要性を国内外に広く知らせる。インターネットを通じるだけでなく、専任広報・教育担当者を置いて積極的広報普及活動を行う他、技術者や教育啓蒙専門家の養成もここで行う。

日本と外国のデータを組み合わせ加工し、研究と教育啓蒙活動の両面で役立てるのは、自然資源が乏しく人的資源の豊富な日本が取るべき最も効率的な国際貢献であろう。

(a)大学における地球科学の推進方策

国立大学法人化により、大学における基礎科学の研究・教育推進体制は、抜本的見直しが迫られている。特に、地球科学は過去に、巨大なプロジェクト研究として推進されてきた背景を持つが故に、このような研究・教育環境の変化の中で、それをどう推進していくか、その積極的対応が求められている。付置研究所の役割、学問の再構成まで含め、再検討する時期にあるのではないか。