

私 た ち の 惑 星

地球の歴史

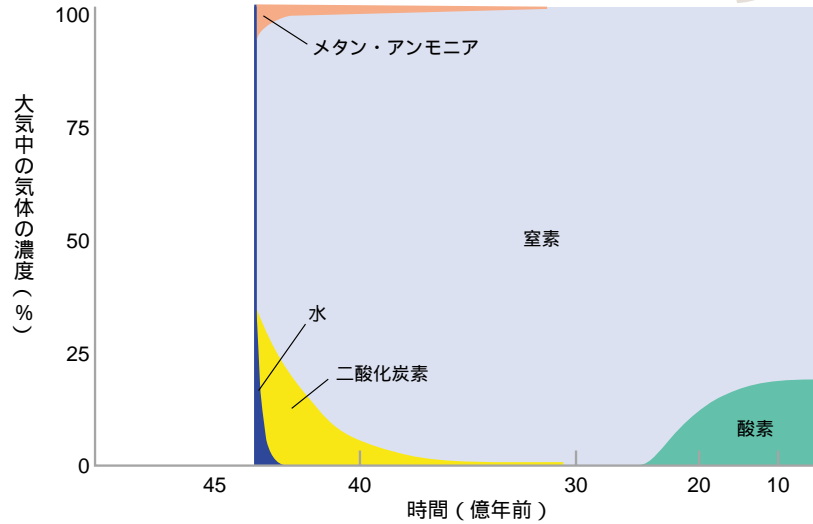
なぜ私たちは地球にいるのか？さらには、なぜ地球に生命が生まれたのか？そんなことを普段意識して生活している人はそう多くはないでしょう。でも、生命の星・地球は、「偶然」ともいえるさまざまな要因のもとに宇宙空間に生まれました。では、この「偶然」とは何だったんでしょう？あたかも探偵のように地球の過去を探る科学者達の努力は続いています。

生命の惑星 地球

地球は今のところ生命の生存する唯一の惑星です。
私たち人類も含めた生命はいつかにして生まれたのか？
それは大地に刻まれた地球生命の歴史が教えてくれます。

地球はなぜ生命の惑星になったのか？

地球には大量の水が存在し、それが海洋を形作りました。大気中に大量に存在していた二酸化炭素は、海水中に溶解して、炭酸カルシウムとして、岩石の中にとりこまれました。二酸化炭素の濃度が低下すると、光合成によって生命を維持する原始的な植物が誕生しました。それが、長い時間をかけて、大気中の二酸化炭素を酸素に変えて、呼吸活動する有酸素動物が発生し、それらが、陸地で活動する様になりました。



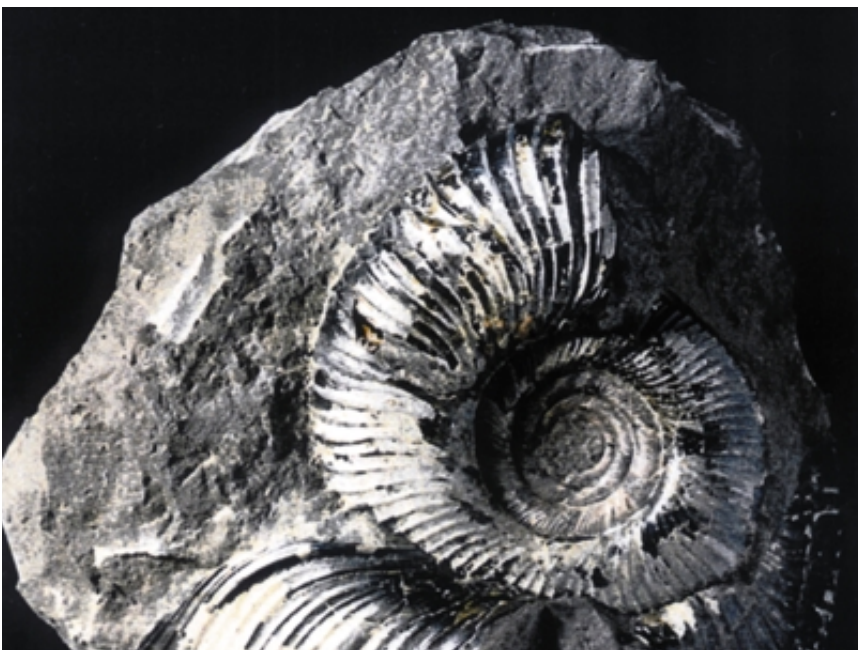
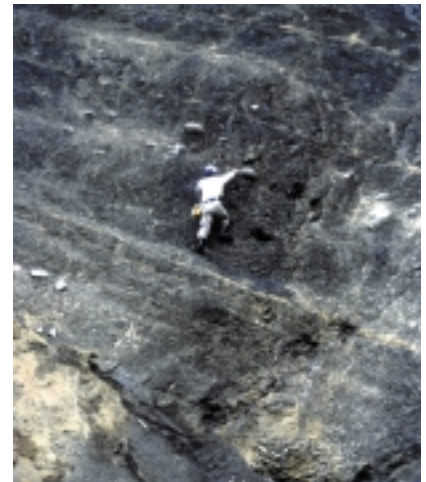
別冊サイエンス「地球と大気の進化 C.J.アレグル/S.H.シュナイダー」より

地球

地層の情報解読

地層の中には、水流、嵐、津波、土石流、地磁気の逆転、隕石の衝突などさまざまなイベントが記録されています。地球のエキスパートたちは、自らの目と足で地層を調べ、複雑な地球の歴史を解きほぐしてきました。彼らの調査対象は世界中のあらゆる時代の地層におよびます。写真はロシア・カムチャッカ半島とサハリンに露出する中生代白亜紀（約1億4,000万年～6,500万年前）の地層です。調査の結果、これらの地層は現在の気候とは異なり、

むしろ暖流の影響を受けて堆積したことがわかりました。大自然の中で地球と一対一で向き合うのも研究の醍醐味のひとつです。



古生物の記録

化石は、過去三十数億年間にわたる生物の進化をドラマティックに物語ってくれます。それと同時に、写真のアンモナイト化石からは、地球温暖化がもっとも進んで海面が上昇した中生代白亜紀の海洋環境の一端を読み取ることができます。化石は過去ばかりでなく、現在や未来の地球環境を解くカギでもあるのです。

活動する地球とその歴史の解読

火山活動や地震は、地球が活動を続けている証です。

それまで地表にあったものが地下深くに潜り込んで再び地表に現れる・・・

ゆっくりではありますが、ダイナミックな地球の活動をご紹介します。

火山活動の予測など、防災に関する研究

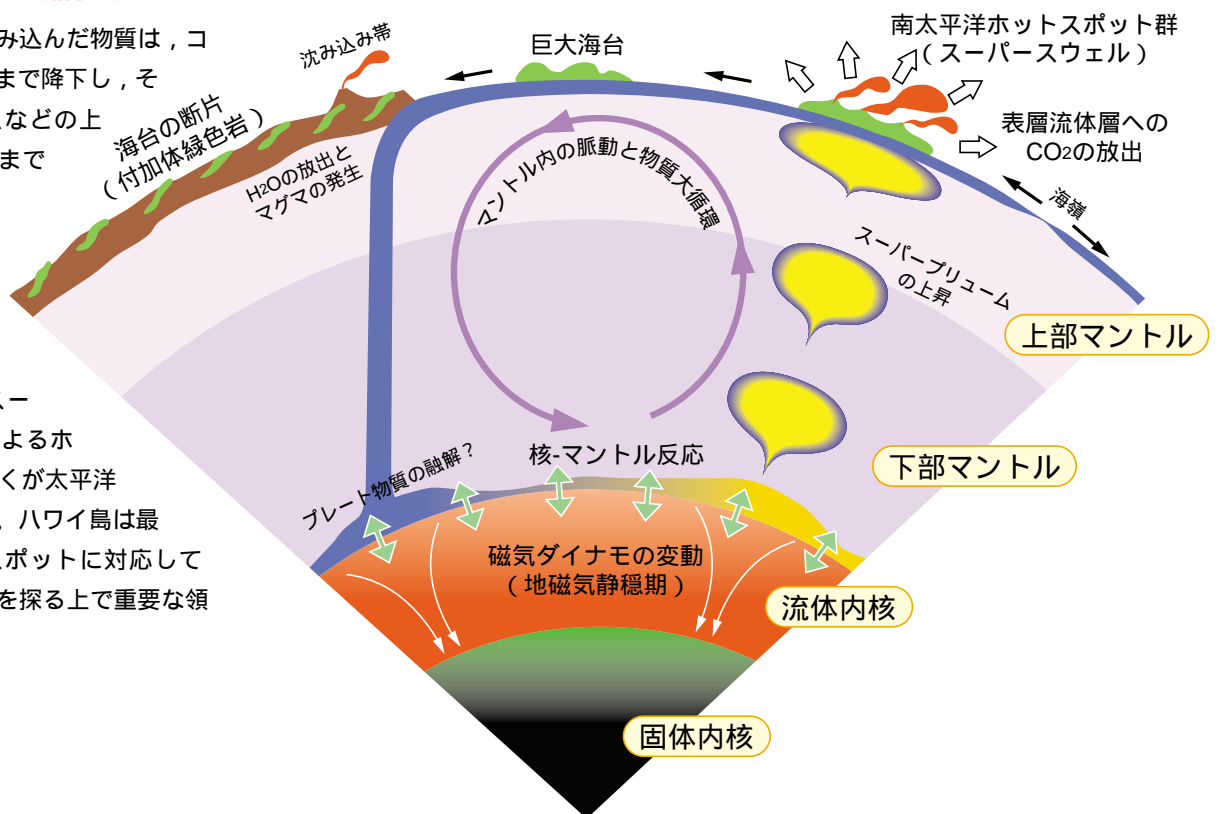
火山はマグマが地表に達する現象です。地震や地殻変動、地熱などもあわせて観測し、マグマの活動のダイナミクスに関する研究が行われています。そのような基礎的な研究は、自然のもたらす災害から私たちの身を守る防災上の観点からも重要です。ここに示した写真は1979年10月の阿蘇中岳第1火口のストロンボリ式噴火の様子です。

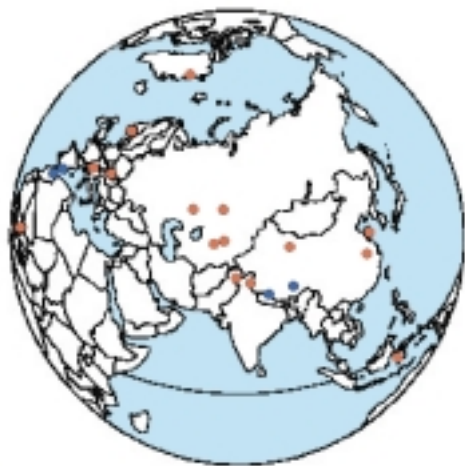


地球

地球規模の物質循環

沈み込み帯で沈み込んだ物質は、コア・マントル境界まで降下し、そこからプレュームなどの上昇流とともに地表まで達するというマントル規模での大循環の解明が進んでいます。地球深部からのスーパープレュームによるホットスポットは多くが太平洋に分布しています。ハワイ島は最大規模のホットスポットに対応していて、地球の活動を探る上で重要な領域のひとつです。





● 超高压変成岩（コース石やその仮像を含むエクロジャイト等）
● ダイヤモンド相造山帯超高压変成岩

造山帯 浮き上がる地下深部物質

プレートテクトニクスに従うと、大陸は数億年ごとに分離と合体を繰り返しています。大陸同士の衝突によって形成された造山帯には、その地下深部を構成していた岩石が広く分布しています。1980年代以降の研究で、造山帯の地下深部物質の一部は、地表付近にあった岩石がマントルまで沈み込み、ダイヤモンドや石英の高圧多形（コース石）を含む超高压変成岩に変化した後、固体状態で再び地表に戻ってきたことが判ってきました。2001年までに世界中の大陸衝突型造山帯から超高压

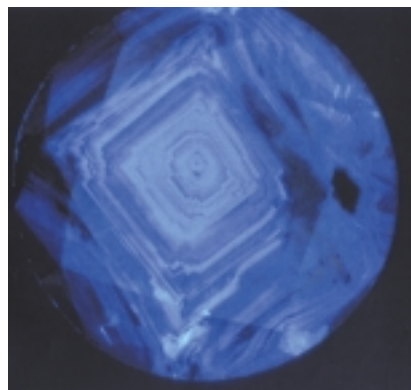
変成岩が見出されるようになっていきます。マントル物質は数mから数百mのレンズ状あるいは層状の岩体として、地殻物質起源の岩石中に取り込まれて産する例がよく知られています。写真のマントル物質は地下120kmで、周囲の地殻物質は地下50kmで形成されたとされています。地下100~200kmで形成された代表的な超高压変成岩やマントル物質の密度は代表的な地殻物質より大きくなります。さて、マントル物質と地殻物質の混合は一体どこで、どのようにして生じたのでしょうか？また、密度の大きい超高压変成岩やマントル物質は地表までどうやって上昇してきたのでしょうか？造山帯の地下深部で生じた物理過程を一緒に考えませんか。



ダイヤモンドのカソードルミネッセンス像

指輪やネックレスなどの装飾用に研磨された透明で美しい宝石級ダイヤモンドであっても、その内部には成長の記録を示した縞模様が隠されています。このようなパターンは、いわば「指紋」と同様にその個体に特有・無二のものであって、そのダイヤモンド

個体にとっては、「履歴書」とも言えます。特殊な手法を用いれば、そのような情報も引き出すことができます。この写真は、ダイヤモンドに電子線を照射することによって青色に発光する現象を利用して、ダイヤモンドの履歴書の解読を試みているところです。

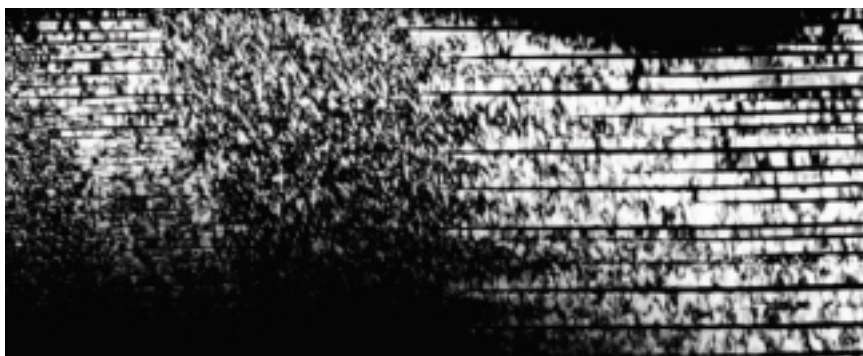


鉱物の微細構造

マグマが地表に噴出して冷え固まると火山岩と呼ばれる岩石になります。この写真はある火山岩中に含まれていたピジョン輝石という鉱物を電子顕微鏡を用いて撮影したものです。写真で

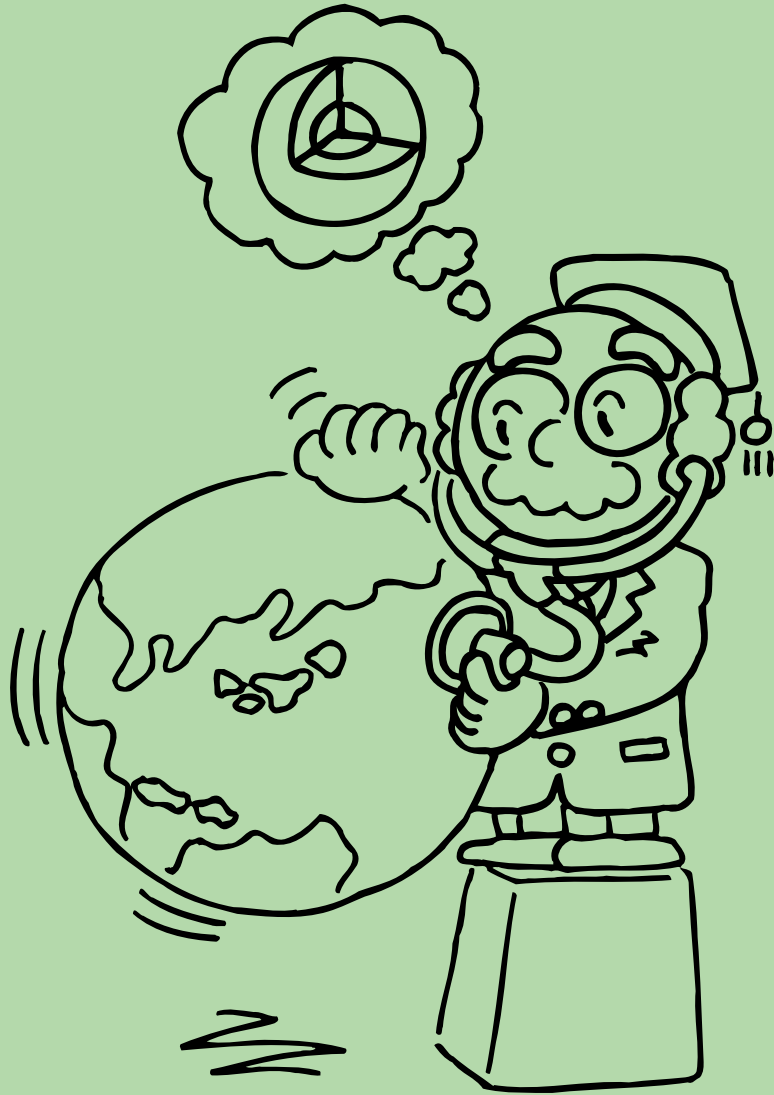
は、黒い帯と白い帯とが交互に並んでいるゾーンや黒い帯が観察されないゾーンが見られます。黒い帯と白い帯とは化学成分 - とくにCaの量 - に顕著な違いがみられます。また、黒い帯

が観察されないゾーンでは無数の微小ドメインが複雑に重なり合ったパターンを示しています。これらのような鉱物中の微細なパターンを解析することによって、その鉱物やそれを含む岩石が受けてきた熱の変遷についての手懸りをつかむことができます。例えば、写真の鉱物では、白黒の帯の太さや間隔は高温に保持されていた時間の推定に、ドメインの大きさは冷却時の降温速度の見積もりに、それぞれ利用できます。



地球の鼓動を聞く

地球の変動



地球の内部はどうやって調べるのでしょうか？
まさか輪切りにするわけにはいきませんよね。
深い穴を掘っても限りがありますし・・・
実は、地球の「音」を聴いて調べているのです。
ちょうどお医者さんが聴診器で心拍音を聴くようにね。

地球の内部構造と変動

地震を観測・分析することは、地球内部構造やその活動を知る手がかりとなります。

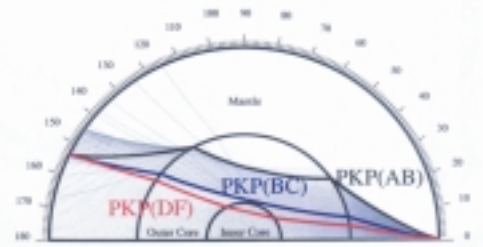
しかし、地震は時として私たちの生命を脅かす存在でもあります。

「地震を知る」ことは様々な面で大切なことなのです。

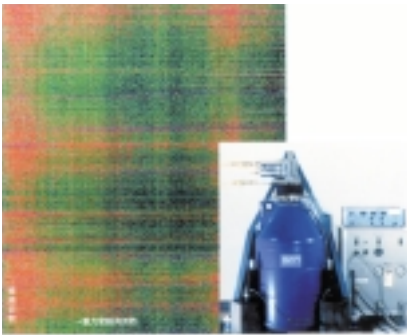
地震波による地球内部構造の探査

地震波を用いると地球内部の構造を知ることができます。この方法で地球内部に内核と外核、さらにそれを覆うマントルの存在がわかりました。30年あまりの長期にわたって蓄積された地震波データを用いて解析すると、中心部にある内核を地震波の伝わる速さが

ゆっくりと変動することがわかりました。一つの可能性として、内核がマントルよりも少し速く回転（1年に1～3度程度）していることが指摘されました。その説は、外核のダイナモ作用によって地球磁場が形成されていますが、内核とマントルの差動回転は外核



の粘性やマントルと内核間の重力トルクとも関連し、その正否を巡って論争が繰り返されています。



超伝導重力計

写真提供：国立極地研究所

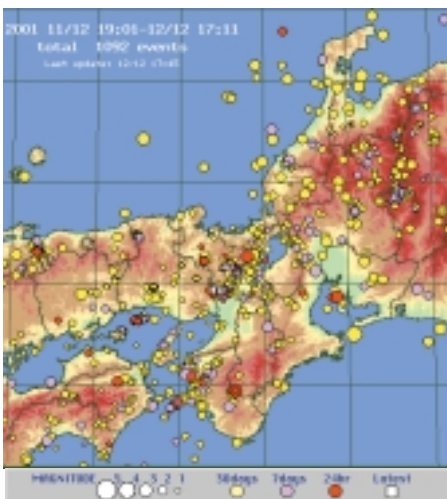
地球の自由振動

地球で地震が起こると、釣り鐘をついたのと同じように地球そのものがある決まった周期で振動することがあります。これは地球の自由振動と呼ばれ、地球全体を揺さぶるほどの大きな地震の際にだけ起こる現象だと考えられていました。しかし、最近、地球の重力の1兆分の1の変化も測定できるたいへん感度の高い超伝導重力計の観測によって、地球の自由振動は地震のないときでも常に起こっていることが発見

され、これを常時地球自由振動と呼んでいます。左のグラフの横軸は周波数、縦軸が重力の時間変化を示しますが、とびとびにある縦方向に続く赤い縞目が常時地球自由振動を表しています。常時地球自由振動がなぜ起こるのかについては、現在も研究が進められていますが、おそらくは大気あるいは海洋が地球を常にたたいているためだろうと考えられています。

リアルタイムの地震観測網

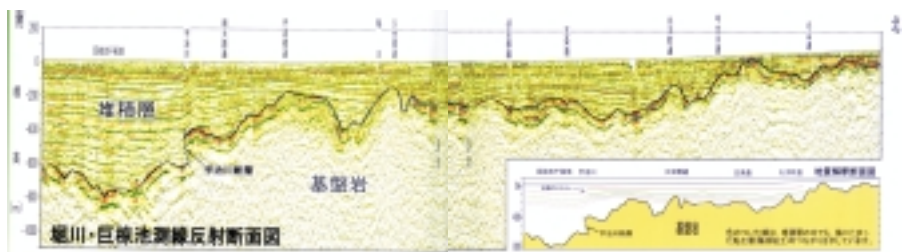
私たちの生活を災害から守る観点から、有感地震のみならず微小地震を常時観測することは、大規模地震発生予測の研究や、地震発生機構を探る上で重要です。下図は微小地震観測システムで自動的に決められた深さ30kmより浅い地震の震央分布です。リアルタイムで計算された最近1ヶ月間の結果の速報が、ウェブ上に公開され、研究面や防災面で役立てられています。



反射法地震探査による地下構造の解明

特殊な車を用いて、地面に震動を与えると、わずかな揺れが地下深くからはね返ってきます。その反射波を地表で検出し解析することによって、地下の構造を調べることができます。下図は京都市内を南北に走る測線に沿って、反射法地震探査を行なった結果です。基盤岩を覆う様に縞模様が見えます。この縞は周りの山から流れ出た

礫・砂・粘土などが堆積してできた地層に対応します。この縞模様は水平でなく傾斜したり、たわんでいたりしますが、地層が形成されるときには水平ですので、これは堆積後に地層が動いたことを示しています。また、図の左側の宇治川の付近では地層がたわんでいるのがみられ、宇治川の下に宇治川断層の潜んでいることがわかります。



青い空を見上げて

私達が普段「空」といっているのは成層圏まで。高さにして約50kmです。一見ものすごく高いように感じますが、地球（半径約6,400km）を卵とするならば、成層圏はその殻ぐらいの厚さしかありません。でも、もしこの「殻」がなかったら、地球の表面は月のようになっていたといわれています。

地球の大気・海洋と環境の変化

私たちが生きていけるのは地球の表面が大気に覆われているからです。

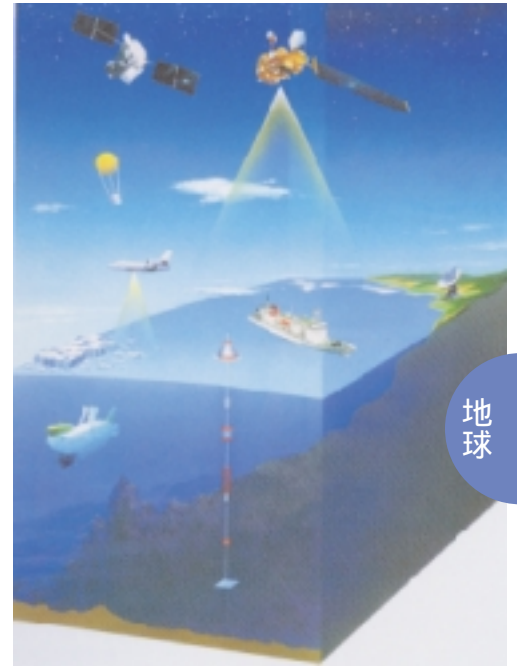
また、大気に対しては地球表面の70%を覆う海洋が大きな影響を与えています。

地球環境について考えていくとき、全地球的な観点からの観測と検討が不可欠といえるでしょう。

新しい観測システム

大気と海洋が地球環境に果たす役割を理解する第一歩は、観測によって現状を把握することから始まります。従来から、地上の観測網や気球によって大気を観測したり、船舶やブイなどによって海の中を観測する工夫がされてきましたが、近年の技術的な進歩によ

って、より精密で多様な物理量を観測することが可能になりつつあります。これらの新しい観測システムを強力に組み合わせることによって、これまで謎に包まれていた大規模な海洋の変動システムと地球規模での気候変動との関わりが明らかにされつつあります。



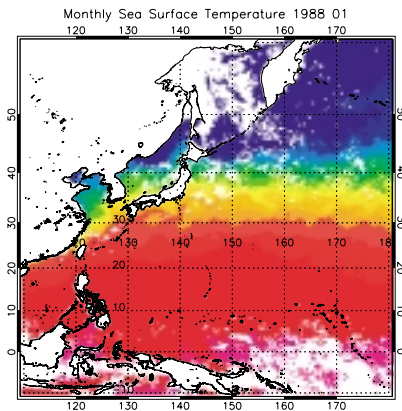
地球

資料提供：宇宙開発事業団

人工衛星によって得られた海面温度

人工衛星による海洋観測手法の発展は、私たちに有用な情報を与えてくれるようになりました。人工衛星に搭載された赤外線の放射計によって得られる広域の海面温度のデータは、黒潮の流路の把握や気候変動の予測のために

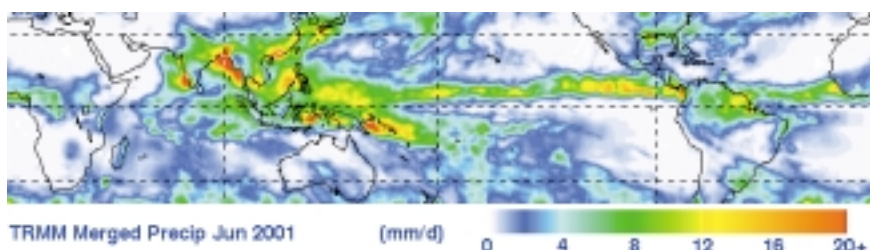
今では欠かせないものとなりました。左下の図は人工衛星NOAAによって得られた1988年1月の北西太平洋の月平均海面温度分布です。赤い色は水温が高いことを示しています。白い部分は陸域であったり雲があったりすることなどによって観測値が得られなかったところを示します。日本南岸では黒潮が蛇行して一旦岸から離れる様子がはっきりわかります。



水の循環

地球は水の惑星といわれ、表面には大量の水が存在します。しかし、その約97%は海水なので、我々陸上生物が必要とする淡水は残りの約3%です。さらに淡水のほとんどは固体として雪や氷となって主として極地に存在しているため、我々が日々利用できるのは1年の降水量を足しあわせても地球上の水の0.03%程度でしかありません。図は人工衛星TRMMによって得られた2001年6月の月平均降水量の分布です。

青から赤になるほど1日あたりの降水量が多いことを示しています。このように降水はとても偏った分布をしており、人類の多くは干ばつや洪水に毎年苦しんでいます。淡水の循環過程は我々にとって重要な問題なので、世界中の研究者が多くのプロジェクトを実施して研究してきました。そのため、近年ようやく全地球的な水循環の現状が明らかになりつつあります。



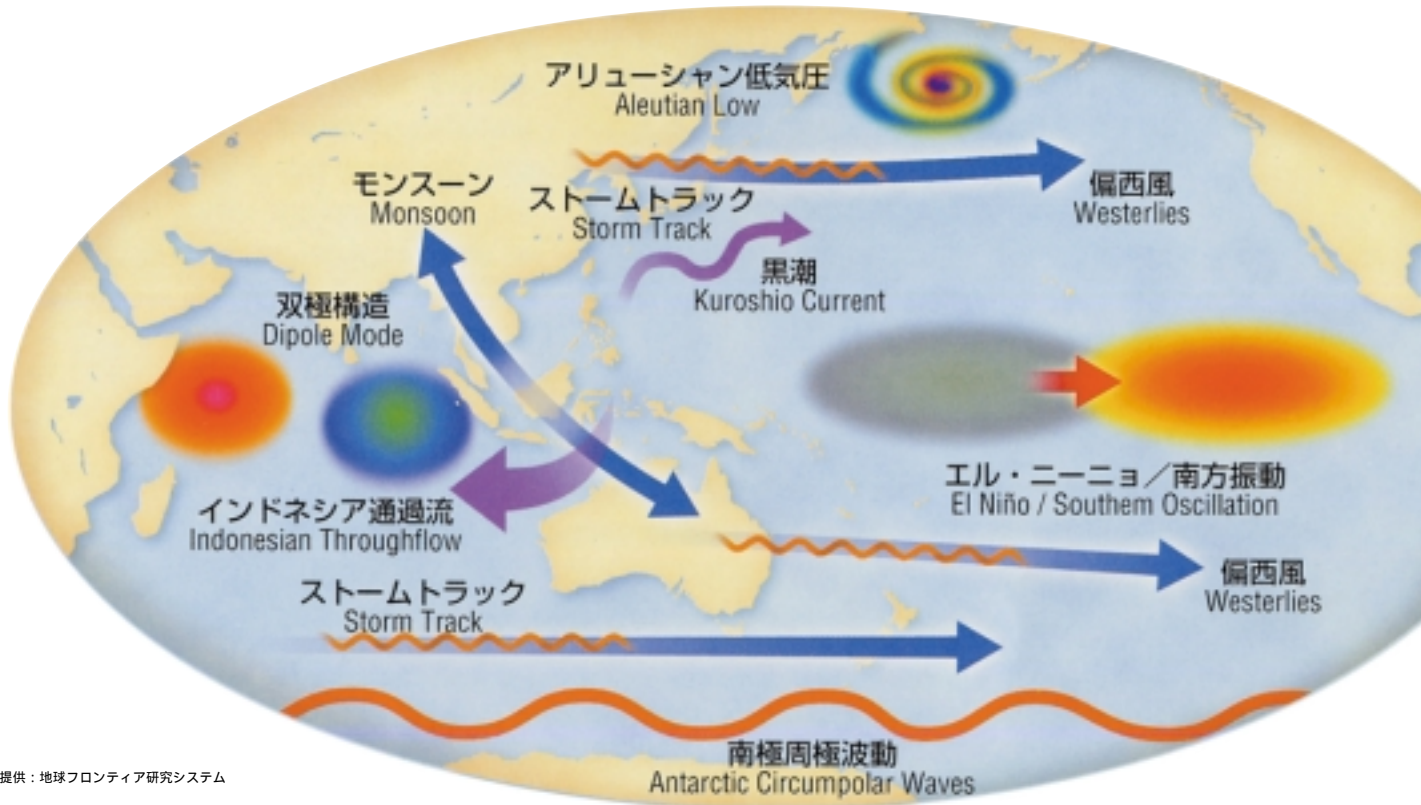
TRMM Merged Precip Jun 2001 (mm/d) 0 4 8 12 16 20+

エル・ニーニョと全球気候変動

人工衛星観測をはじめとする広域観測やスーパー・コンピュータの発達にともなって、海洋が地球規模での気候変動に果たしている役割が徐々に明らかになっていきます。エル・ニーニョ現象はその代表的なものです。その影響は熱帯赤道域に限らず高緯度域に

まで及び、アジア・モンスーンやアリユーション低気圧などの変動を引き起こすと考えられています。1997年から98年にかけて起こったエル・ニーニョ現象は20世紀最大と言われ、世界各地

にさまざまな異常気象や災害を引き起こしたことは記憶に新しいところです。また、エル・ニーニョ現象の影響は遙か南極にまで及んでいることが近年発見されました。

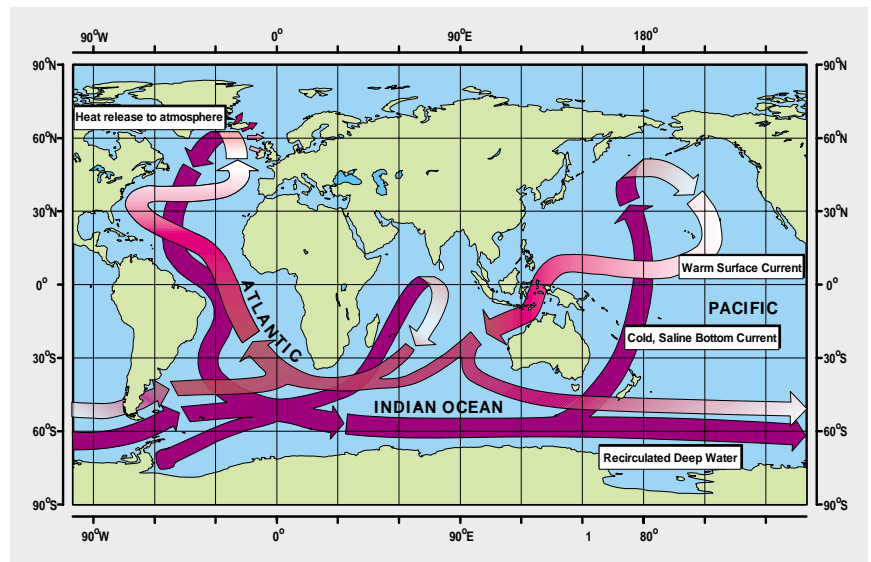


資料提供：地球フロンティア研究システム

気候システムにおける全球海洋循環

エル・ニーニョ現象のような数年スケールの変動だけでなく、数10年から数100年といった、より長いスケールの気候変動においても海洋は大きな役割を果たしています。海洋中には、「コンベアーベルト」のように水を輸送するルートがあると考えられており、このような表層から中・深層にま

で及び海洋の流れによって運ばれる熱エネルギーが気候システムを変動させる大きな要因となります。



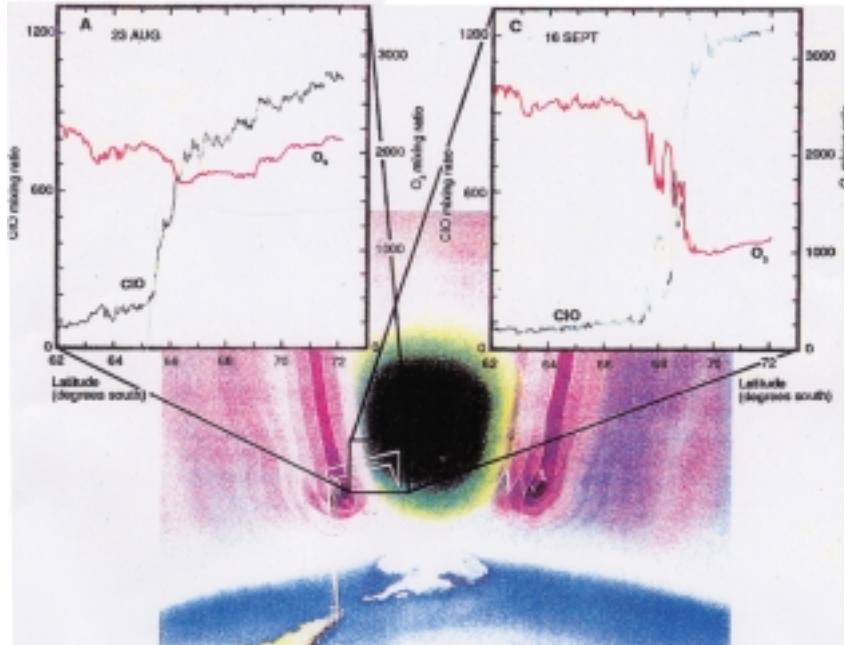
資料提供：サザントン海洋学センター

分光学と地球環境問題

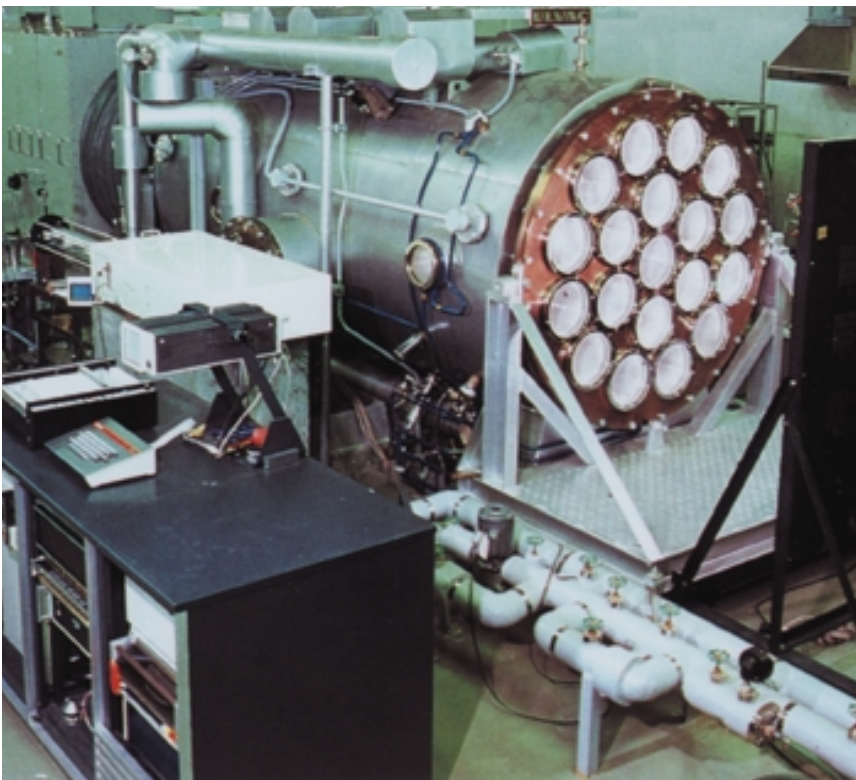
分子はそれぞれ固有の光を吸収したり放出したりします。この光を観測することで、大気中に存在する分子の種類や濃度を知ることができます。その結果、大気中には様々な化学的に活性な分子（ラジカル分子）が存在し、オゾンホールの破壊等を起こしていることがわかってきました。例えば、南極のオゾンホール付近の大気分光から、オゾン(O₃)の濃度とClOラジカルの濃度に特定の関係があることがわかりました。このことから、オゾン破壊

がCl + O₃ → ClO + O₂という化学反応によって起っていることが明らかになりました。1995年には、オゾンホール発生メカニズムの理論的解明に貢献した3人の大気科学者にノーベル化学賞が

贈られました。また、長年にわたるオゾン層破壊物質の継続観測により、オゾン層保護に関する条約のもとでの生産規制の効果が目に見える段階となりました。



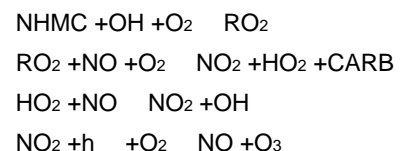
南極上空のClO とO₃ の濃度変化



大気化学反応シミュレーション装置

大気中の化学反応

大気中では、様々な化学反応が起っています。大気の状態を再現する大型シミュレーション装置によって、どのような化学反応が起しているか、その詳細がわかってきました。たとえば、オゾンの生成は太陽からくる紫外線によって生成されるラジカル分子が引き起こす以下の連鎖反応によって起っていることがわかりました。



ここで、NHMC はメタンではない炭化水素、CARB はカルボニル化合物、R はアルキル基、h は太陽光です。



太陽-地球
システム

45億年の親子関係

地球は太陽を主とする太陽系家族の一員です。

そして太陽から送られてくるエネルギーにより、地球は生命あふれる星になりました。

また、太陽は私たちにとって最も近い恒星でもあります。

太陽を詳しく知ることは、宇宙に無数とある星を知る手がかりとなります。

科学者にとっての太陽は「先生」でもあるのです。

太陽-地球システムの解明

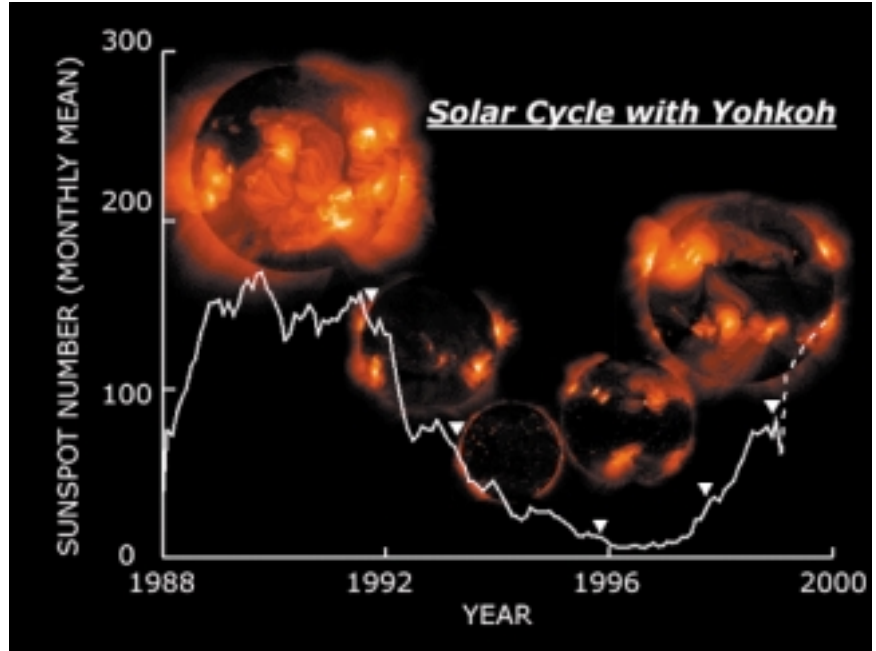
太陽は今も活発に活動を続ける星です。

現在、太陽が光や熱以外にもさまざまなエネルギーを放出していることがわかってきました。

その一部は、オーロラのように私たちの目を楽しませてくれる現象も引き起こします。

太陽の11年周期活動

太陽観測衛星「ようこう」は、太陽の活動周期である11年近くにわたって連続観測を行い、躍動する太陽面とコロナ領域の現象の詳細を捉えました。それにより、太陽面の爆発現象であるフレアの物理機構を解明して、さらにそれが地球におよぼす影響を実用に役立てようとする宇宙天気予報の研究に大きな途を切り開きました。図には活動度の指数として広く用いられている太陽黒点数と、「ようこう」のX線観測で得られた太陽像を対比させて示してあります。黒点数の増減に呼応して太陽面のX線輝度分布が変化する様子が良くわかります。



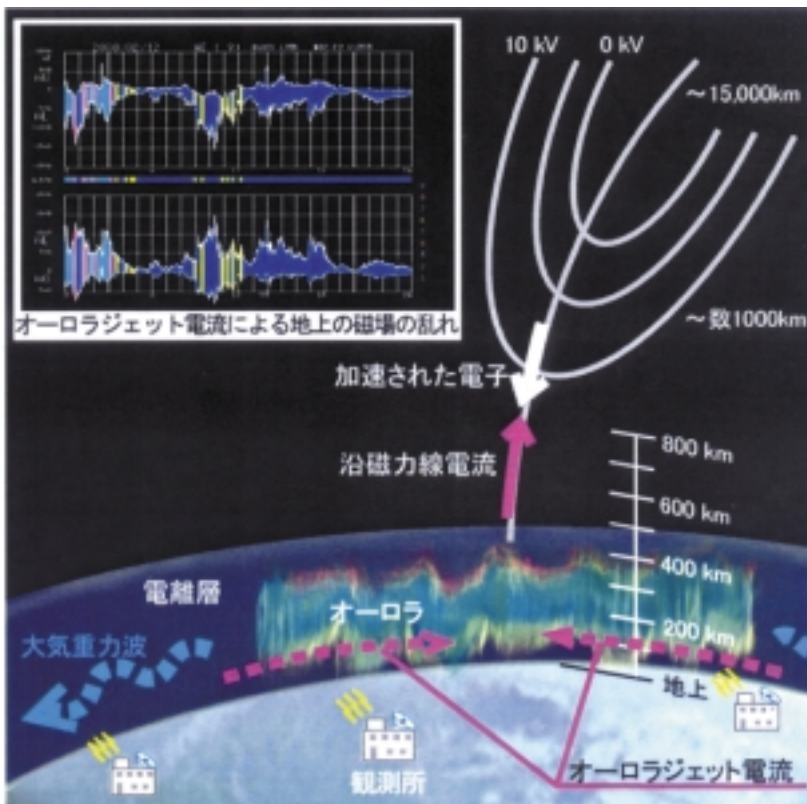
資料提供：宇宙科学研究所

太陽活動とオーロラ

太陽活動が盛になるとその表面から放出される光や電波、プラズマ粒子のエネルギーが増大します。地球の磁気圏はその周辺に太陽から放出された

プラズマ粒子が運んでくるエネルギーの一部を取り込んで活動しています。極地の夜空を彩るオーロラは磁気圏の電子が加速されて降ってきて、大気中

の原子に衝突することによって引き起こされる発光現象ですが、もとをたどると、太陽からやってくるエネルギーがその源です。電子が磁力線に沿って高速で移動しますから強い電流が流れます。その電流はさらに電離層を流れてジェット電流と呼ばれるものを形成します。ジェット電流が現れると、地上の磁場が大きく変動します。その変動をオーロラの出る領域に多数の観測所を分布させて捉え、そのデータをもとに、ジェット電流の強さを示す指数（AEインデックス）が算出されています。その指数はジェット電流の強度とオーロラを知る重要な手がかりを与えてくれています。さらに、この指数から太陽からやってくるプラズマ粒子や磁場の状態を推定しようとする試みが行われています。

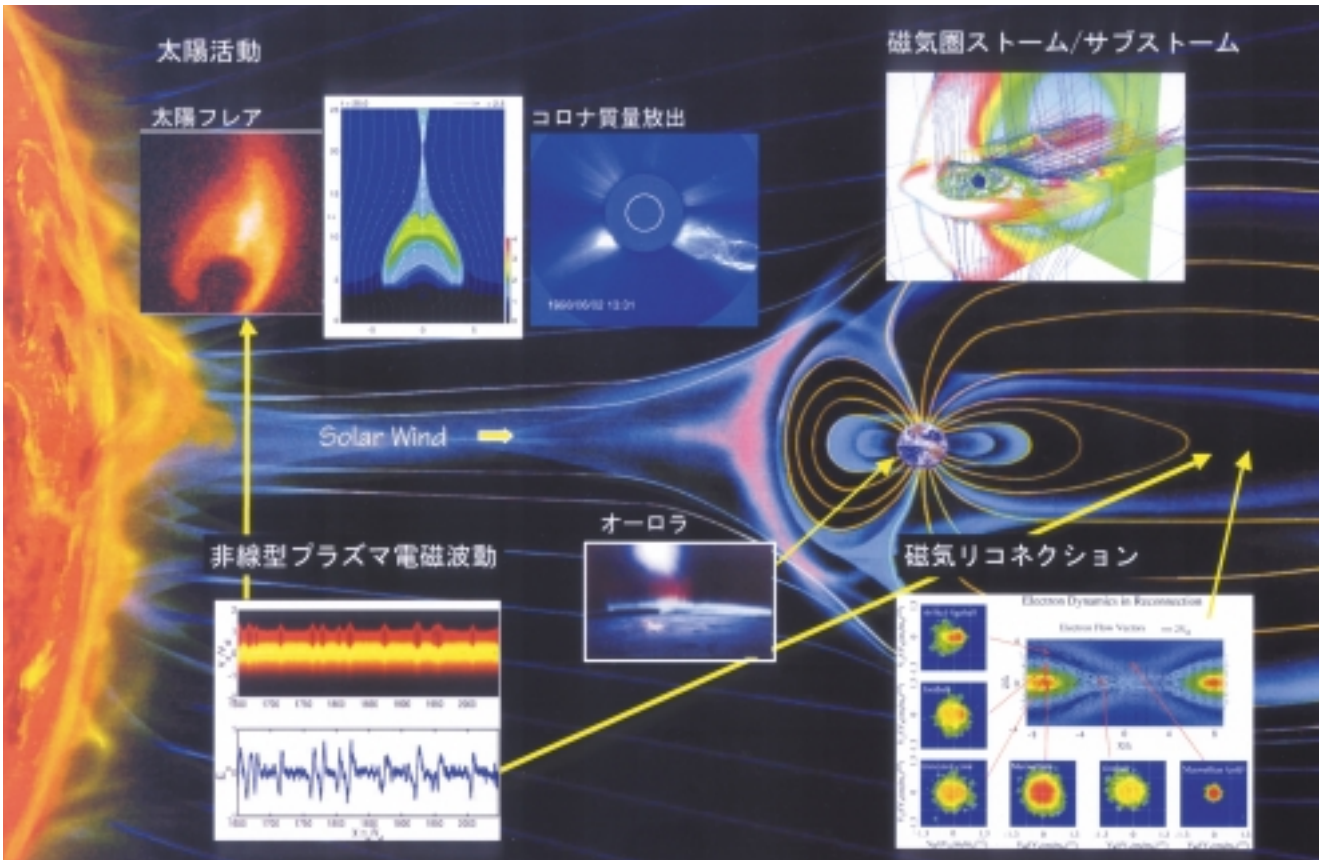


宇宙天気予報とモデル計算

太陽活動と地球の磁気圏および電離圏の活動は密接に結びついています。個々の重要な領域における基礎過程について計算機シミュレーションが行われ、その非線形的な発展の様子が解明

されつつあります。また、さらにそれらを組み合わせた総合的な計算機コードの開発も検討されています。図には太陽面でフレアが起こり、加速されたプラズマ粒子が地球に到達し、それ

によって地球の磁気圏にも不安定現象が起こって、活動的なオーロラの出現する一連の過程が示されています。



地上望遠鏡による太陽の観測

望遠鏡による太陽の黒点、コロナなどの観測が定常的に行われています。飛騨天文台のドームレス望遠鏡は、条件のよい日に太陽の細かい模様まで観測できる高い分解能をもっています。また、乗鞍岳にある国立天文台の太陽観測用のシステムなど、地上望遠鏡による太陽面の観測は、衛星観測と相補的に重要な役割を果たしています。

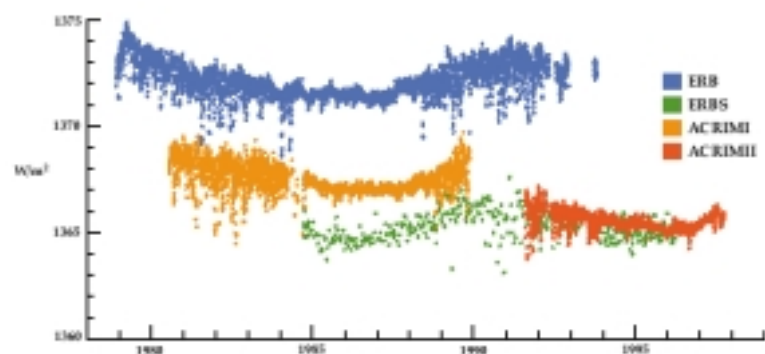


変動する太陽定数

過去においては太陽から放射されるエネルギーフラックス（太陽定数）は時間的に一定と考えられていましたが、大気圏外における直接観測を行うと、その考えが誤りであることがわかってきました。図には複数の衛星によって求められた太陽定数の時間的な変化をプロットしてありますが、ゆっく

りとした経年変化と共に非常に短時間の変化が見られます。この変動幅は小さいのですが、地球の大気・海洋システムに大きな影響をもたらしている可能性があり、太陽と地球を一つのシステムとして扱う必要のあることが指摘されています。

TOTAL SOLAR IRRADIANCE



資料提供：NASA