

海洋物理学研究室

<海洋物理学とは>

地球表面の7割は海洋が占めており、その意味から、地球が「水惑星」と呼ばれていることはよくご存じでしょう。この海(水)こそが、地球上での生命誕生の揺籃として働いたわけです。生まれた生命は時とともに進化し、その揺りかごから出て陸上での生活をはじめました。現在では、われわれ人類をはじめとする実に多くの動植物が陸上に生活しています。そのため、日常生活でのわれわれの関心が明日の天気やその長期予報あるいは地震予知に向かうことも自然なのかもしれません。しかし、陸上に生活する生命にとっても、その生活環境(地球環境)に対して海が果たす役割の重要性は生命誕生の時から何ら変わりがないといっても過言ではありません。理学部地球物理学教室の海洋物理学分野は、このような海の役割を、そこに生起する物理現象のメカニズムの解明を通して、明らかにしていくことを目標にしています。

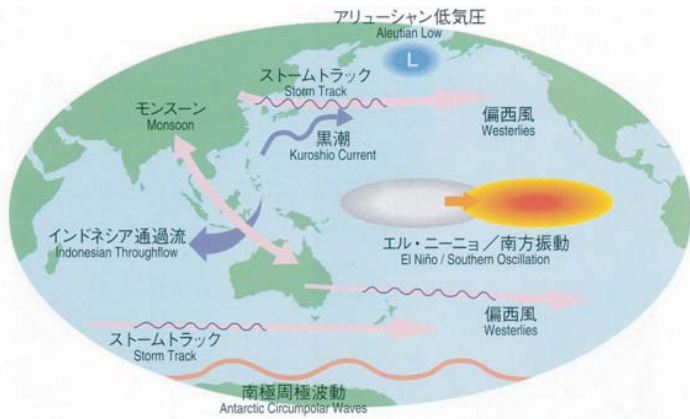


図1 地球フロンティア研究システム

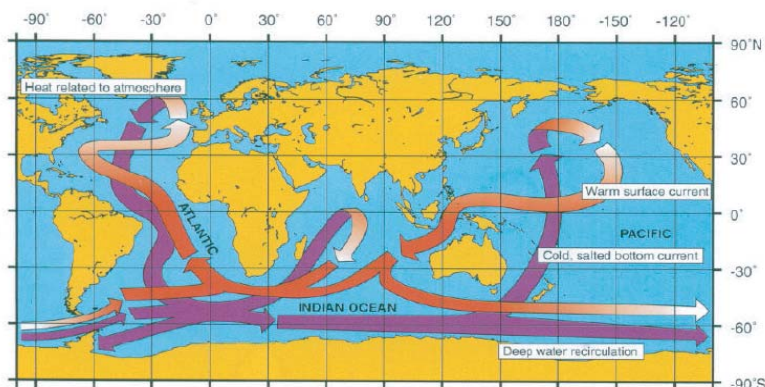
<エル・ニーニョ>

われわれの生活に最も身近な海洋現象として、エル・ニーニョ (El Nino) 現象があります。地球上の低緯度域(赤道域)では、普段は東寄りの貿易風が吹いているので、暖かい海水が赤道太平洋の西部に集まり、そこでの水温が東部に比べてかなり高い状態にあります。この状態が数年に一度ぐらいの割合で崩れ、東部太平洋の水温が普段に比べて数度以上上昇することがあります。これがエル・ニーニョ現象です。いったんエル・ニーニョが生じると、赤道域に限らず世界各地の気象(気候)が大きな影響を受けると考えられています(図1)。例えば、アジア・モンスーンやアリューシャン低気圧などの変調を引き起こし、日本の気候も変化します。また、エル・ニーニョ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。

エル・ニーニョは、大気中の現象である南方振動(Southern Oscillation)とあわせて、「エンソ(ENSO)」と呼ばれることがあります(頭文字をとって付けられた名前)。これは、これらの現象が別々のものではなく、熱帯域での大気海洋相互作用の結果生じている一連の現象の二つの側面であることがわかってきたからです。このエンソ現象の発生メカニズムについては、1980年代以降、多くの研究が行われ徐々に明らかにされてきました。しかし、いつエル・ニーニョ(エンソ)が起こり、地球環境にどのような異常を引き起こし、いつ終わるのか、といったわれわれの生活に最も身近な問いに対しては、まだ十分な解答を出せる状況ではありません。解決すべき問題はまだまだ残っています。

<深層循環(千年の海水の旅)>

エル・ニーニョは数年程度の時間スケールの現象ですが、海洋にはさらに2桁以上長い時間スケールを持つ海水の循環が深層に存在すると考えられています(図2)。この循環の駆動に重要な役割を果たすのは、高緯度海域(北大西洋や南極海)での沈み込み現象です。この千年にもおよぶ海水の旅を追ってみましょう。まず、メキシコ湾流などによって運ばれた塩分濃度の高い海水は、北大西洋のグリーンランド沖で冷やされ深層に沈み込みます。沈み込んだ海水は、深層大西洋の西岸を南に下り赤道を越えて南極を周回するようになります。ここで、南極大陸周辺で形成される底・深層水の影響を受けて変質したのち、徐々に太平洋やインド洋へ入りゆっくりと上昇して行きます。太平洋で上昇した海水はインドネシア多島海からインド洋へ入り、そこで上昇した海水とともにアフリカの南を通過して大西洋に達します。その後、大西洋を北上した海水はスタート地点の北大西洋に戻り、全球的な海水の循環が一巡します。歴史を振り返ってみると、10世紀ごろを中心とした温暖期と16世紀頃を中心とした小氷河期がヨーロッパで現れましたが、このような気候変動に図2で見た深層循環の変調が関係していたという可能性が指摘されています。



<研究の最前線>

海洋物理学に限らず、地球物理学という学問はまず地球の今ある姿を観測によって明らかにすることがその基礎であるといえます。海洋観測は昔から船舶による水温、塩分濃度の測定がその基本ですが、この観測には非常に長い時間と労力と費用を要します。これに対し近年は、地球を周回する人工衛星に搭載されたセンサーによって、いろいろな海洋情報が地球規模でしかも短時間に得られるようになり、海洋現象に対する理解が格段に進歩しました。図3はその一例で、NOAA衛星による日本付近での海面水温分布を示しています。熱帯海域を源とする黒潮(日本海流)が暖かい海水を日本付近に運んでいるさまがはっきりわかります(地図帳に描かれた黒潮のイメージとは全く違います)。この画像は海上保安庁のホームページで毎日見ることができます(<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/>)。

観測技術の進歩とともに近年のコンピュータの発達、海洋物理現象のメカニズムを解明する有効な手段を提供しています。図4はわれわれの研究室で行われている数値モデル実験の結果の例です。北太平洋を1/8度(10ないし20km)幅の格子で分割して計算された海面付近(2m深)での海水温の分布を示しています。図3の衛星画像に見られるような小さな空間スケールの現象がよく再現されているのがわかります。

このように観測手法やコンピュータの発達が海洋現象の理解を大きく進歩させましたが、まだ十分なものとは言えません。われわれの研究室では、観測データと数値モデルを組み合わせ、それぞれの持つ長所を生かし短所を補い合うことで、より深い理解を目指そうという試みをはじめています。この手法はデータ同化と呼ばれ、気象でいう天気予報と同じように、現在の状態から未来を予測する、いわば「海の天気予報」を可能にする将来有望な手法でもあるのです。

われわれの生きている地球の環境を決定づける上で重要な役割を果たしている海洋では、ここで紹介したこと以外にも多くの興味深い現象が起こっています。しかし、そのメカニズムに対する理解はまだ十分ではありません。多くの若い人がこの問題に取り組んでくれることを期待しています。なお、海洋についてさらに多くのことを知りたい方は、日本海洋学会が編集した以下の本を読まれることをおすすめします。

- ・日本海洋学会編：海と地球環境、東京大学出版会、1991
- ・日本海洋学会編：海と環境、講談社、2001

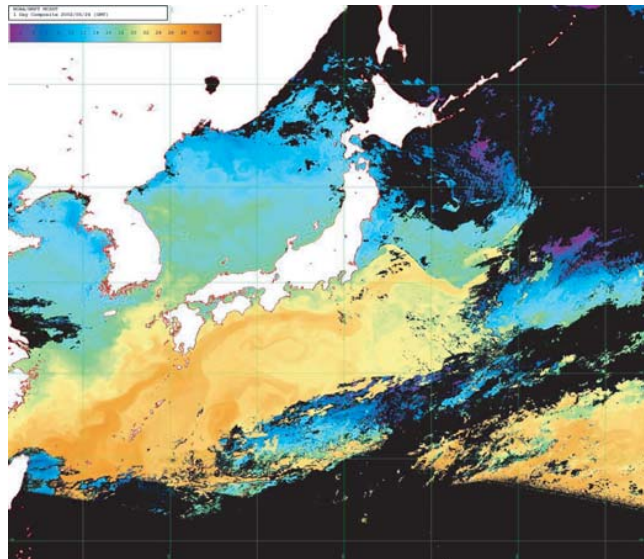


図3 海上保安庁

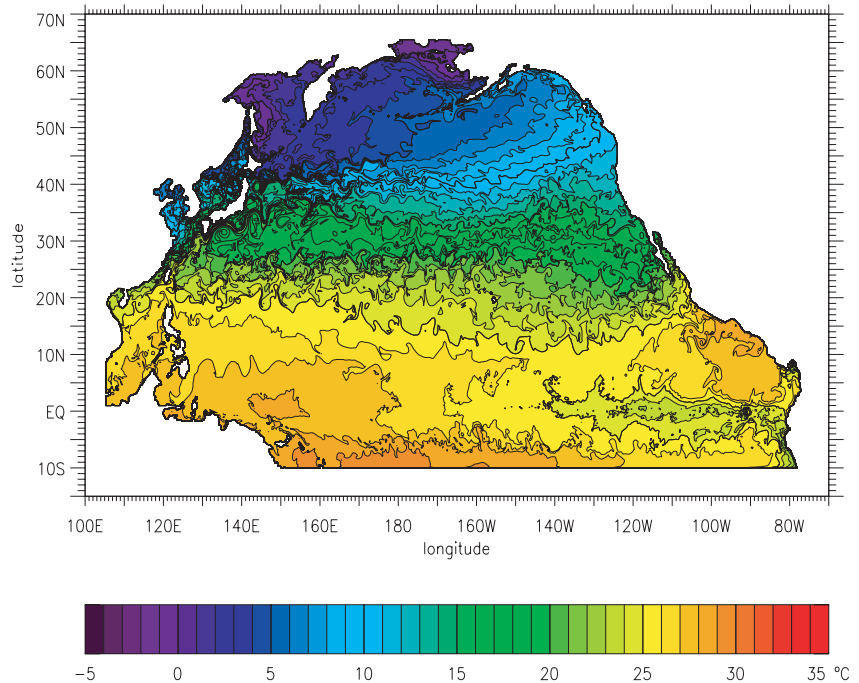


図4

HOT TOPICS

状態方程式の非線形性に起因する高緯度海域での対流

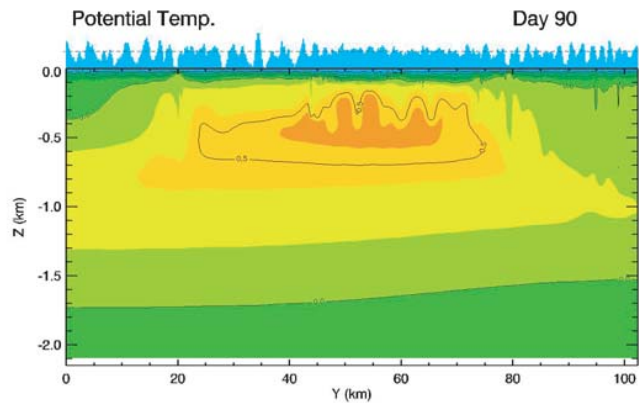
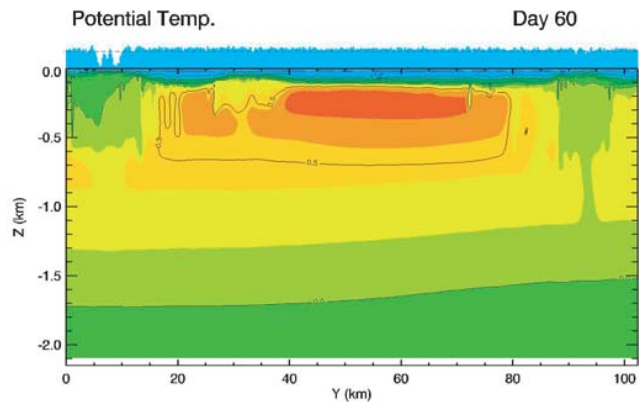
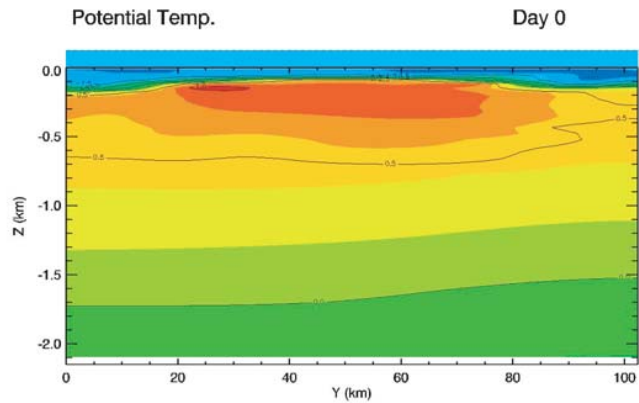
南極海をはじめとする高緯度海域では重い海水が底層へ沈み込み、地球規模での熱塩循環を駆動している。海水の状態方程式は低温域で強い非線形性を示し、高緯度海域で生じる対流の性質に大きく影響する。

図1は海水密度の水温・塩分に対する依存性を示している(TSダイアグラム)。等密度線が曲線であるのは、海水密度が水温の2乗に比例して変化する性質に対応しており、キャベリングと呼ばれる非線形効果の要因である。この効果により、海面付近で同じ密度を持つ海水(図の黒丸)が混合すると、元より大きな密度を持つ海水が生まれる(赤丸)。

海水の熱膨張率が深さ(圧力)とともに大きくなる性質はサーモバリティと呼ばれ、もう一つの重要な非線形効果を生む。この性質は、TSダイアグラム上で、紫の破線で示す深層(およそ2000m深)での等密度線の傾きが表層でのそれ(青の実線)に比べて緩やかになることに反映している。このことから、表層で同じ密度を持つ海水が断熱的に深くまで沈むと、低温の海水の方がより重くなるということが容易に理解される。

サーモバリティに起因する対流現象の一例として、南極ウェッデル海モード海膨付近の冬季の水温・塩分分布を初期値として行ったモデル実験の結果を図2に示す。この海域では、低温・低塩の混合層が高温・高塩の深層水の上に重なり、通常は塩分の鉛直分布によって安定な成層が維持されている。混合層の水温は初期状態ですでに結氷点(およそ摂氏マイナス1.9度)まで下がっているため、海面冷却に伴う結氷が混合層内の塩分を上昇させることで、深い対流を引き起こす。このとき、低温の混合層水がサーマル状となって急激に沈降するのが特徴的である。これは、混合層水の密度が沈降とともに周囲の海水密度よりさらに大きくなるためである。

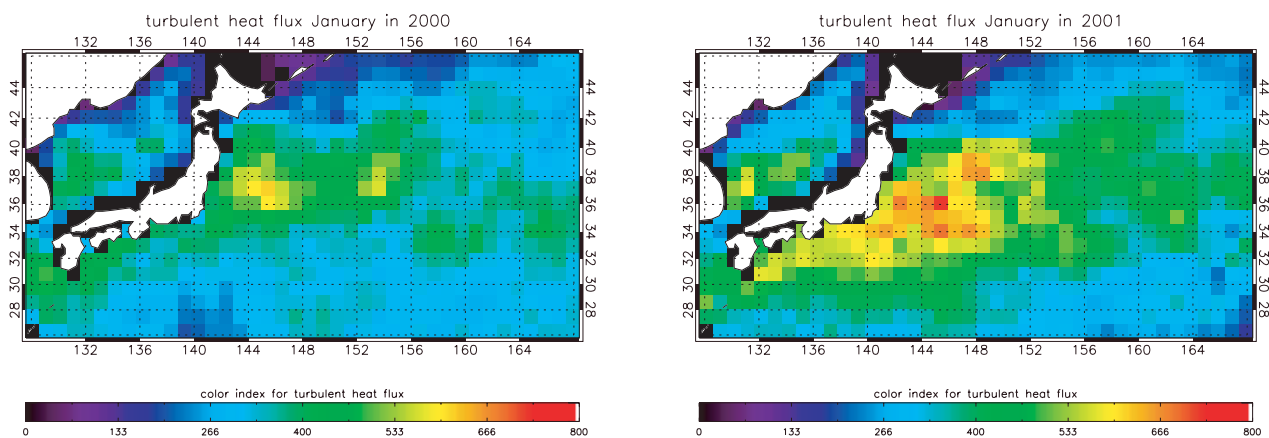
状態方程式の主な非線形性は水温にかかわるものであり、同様の性質は塩分を含まない淡水にも現れる。実際、バイカル湖をはじめとする高緯度の深い淡水湖では、ここで見たのと同じような対流が生じ、底層のベンチレーション(通気、換気)を引き起こしている。図は数値モデル実験での水温の鉛直断面の時間経過を示している。



海洋が日本の床暖房？

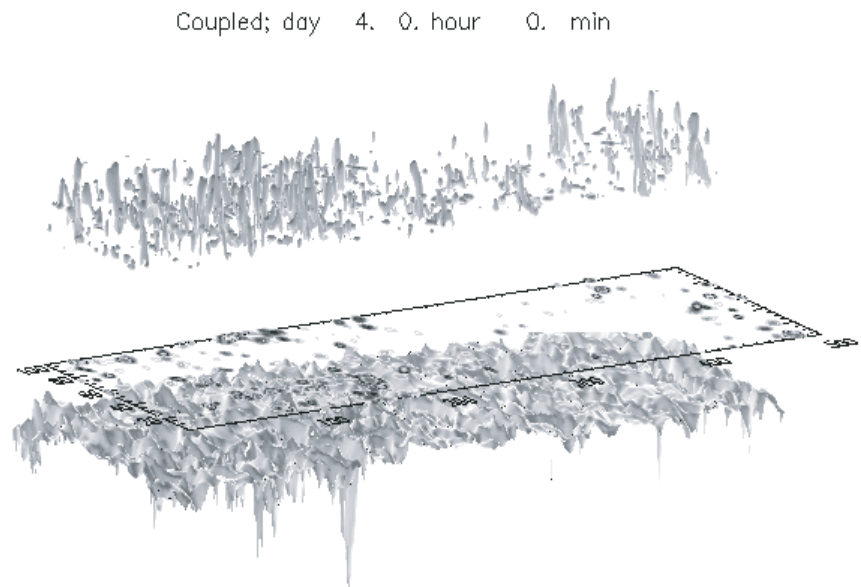
「黒潮続流域における冬季の膨大な海面熱放出」

日本南岸を流れる黒潮は低緯度域から高水温の海水を北に輸送する働きを持っていて、秋季から冬季にかけて中緯度域で大量の熱を放出（海から見れば冷却）する。図は複数の人工衛星データを組み合わせて得た、海面からの乱流熱放出量（顕熱フラックスと潜熱フラックスの和、単位は W/m^2 ）の2000年1月（左）と2001年1月（右）の月平均値である。1度格子にデータを平滑化して表示している。日本南岸を流れる黒潮に沿って300-400 W/m^2 の大きな熱放出があり、これは主に海面温度と気温の差が大きいことに起因している。海面の熱放出量は海上風や気温自体にも依存するが、結果的に日本東方の黒潮続流域でもっとも大きな熱放出が実現し、その大きさは600 W/m^2 に達する。100 W/m^2 はおおよそ、一ヶ月に60mの深さの海水の温度を1度下げる熱量に相当する。また、この熱放出が空気をどのくらい暖める量であるかを大まかに計算すると、海の表面1平方メートルあたり、1ヶ月間に約20000立方メートルの空気を10°Cも上昇させることができる量に相当する。この見積もりは大雑把なものであるが、海面から大気への熱放出量がいかに大きなものであるかを例示している。2000年と2001年の分布を比較すると、年によっては月平均で200 W/m^2 程度の大きな差があることがわかる。これはアリューシャン低気圧の強さの変化など中緯度のさまざまな擾乱の影響を受けていると考えられているが、そのメカニズムはよくわかっていない。



超高解像度大気海洋結合モデルを用いた熱帯積雲活動に伴う大気海洋相互作用

水平解像度1kmという非常に高解像度の大気海洋結合モデルの開発／改良を行っています。このモデルは大気の積雲活動や海洋の混合層変動を再現することが可能であり、熱帯の活発な積雲の発達に関連した大気海洋相互作用の様子を調べることができるモデルです。図は、個々の積雲が集まって大きな雲のかたまりを形成するという積雲の組織化に伴う、降水や海洋混合層の変動を表したもので、積雲活動と海洋混合層変動の良い対応が見られます。このような積雲の組織化は西風バーストというエルニーニョの引き金といわれている現象と深い関わりがあることが知られており、このような高性能の数値モデルを用いることにより、積雲の組織化に関連した物理メカニズムの解明が期待されています。



気象学研究室

気象学は、地球や惑星の大気中における様々な流体现象に関する学問である。地球の大気は、地表より高度約100kmまで広がり、対流圏、成層圏、中間圏、熱圏とそれぞれに特有の現象を生じている。それらを対象とする研究分野としては、気象観測結果をもとに大気現象を記述し把握する大気現象学、大気の温度構造、運動、組成の物理学的あるいは化学的理解をはかる大気物理学・大気化学、気候の形成および変動のメカニズムを探る気候システム科学、大気災害や環境変化の科学的理解と予測の向上を目指す大気災害科学・大気環境科学、および、回転や成層のある流体の運動を理解する地球流体力学がある。

我々の研究室では、気象学の広範な分野の中でも、**大気現象学**、大気物理学の一領域としての**気象力学**、および、**地球流体力学**に焦点を当て、下のようなテーマを中心に教育と研究を展開している。『**力学的な理解**』を共通の目標として、諸々の大気現象を記述し、その物理的メカニズムを抽出して理解を深め、地球惑星流体としての一般法則化をはかる。研究手法は、理論・数値実験およびデータ解析が中心である。また、新しい数値モデルの開発や天気予報の予測可能性研究など、基礎的あるいは応用的な研究も行っている。

1. 大気大循環

対流圏では太陽放射強制に起因する熱的循環（熱帯域ではハドレー循環、温帯域ではロスビー循環）が卓越し、一方、成層圏・中間圏では、波動によって駆動される循環となる。対流圏と成層圏・中間圏とが結合した大気大循環の新描像（図1）を描き、その維持メカニズムと年々変動・経年変化の特徴を明らかにする。

2. 大気波動

大気中には、回転球面上の流体中でポテンシャル渦度の保存則に支配されるプラネタリー波や、安定密度成層した流体中で上下変位に対して浮力が復元力として働く重力波が満ちている。これらの波の生成・伝播のメカニズムを探り、大循環の維持に果たす役割を「波と流れの相互作用」の枠組から解き明かす（図2）。

3. 不安定現象

大気波動の復元力が変位を増大させる状況では、それらの場は不安定となり、温帯低気圧や熱対流などの不安定擾乱が発達する。擾乱が有限の大きさになると非線型な振舞いをし、場との相互作用が重要になる。大気中の水蒸気が凝結し雲をつくる湿潤対流など、さらに複雑な状況下での不安定現象の非線型過程を解析する。

4. 渦運動

成層圏周極渦から台風、竜巻まで、大気中には様々な渦運動がある。それぞれに共通の運動メカニズムがあり、また個々の現象に固有の特徴・性質もある。最近、高分解能の観測と数値実験によって台風の非軸対称な構造（図3）が明らかになってきた。空間スケールの異なる渦を対比することにより、普遍的な渦構造の特徴を抽出する。

5. 乱流

大気中の乱流は時間空間スケールが広い範囲に及び、地球回転や密度成層の影響を受けた乱流となる。古典的な一様等方乱流とは大きく異なるエネルギーカスケード過程となり、それぞれに特有の流れパターン形成となる。スーパーコンピュータを駆使した数値モデル実験（図4）と理論的解釈で、地球流体特有の乱流を研究する。

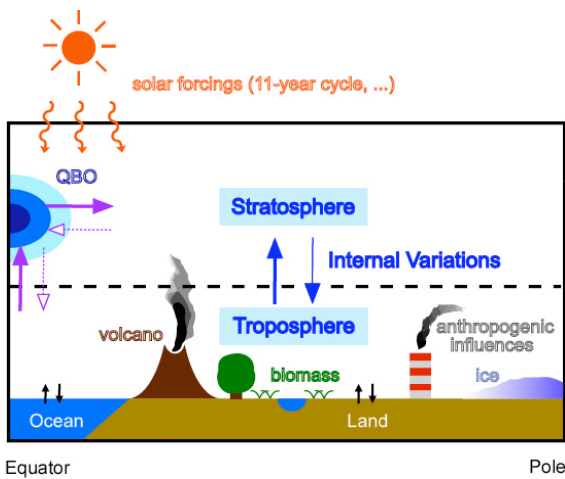


図1：対流圏-成層圏結合系の変動要因の模式図

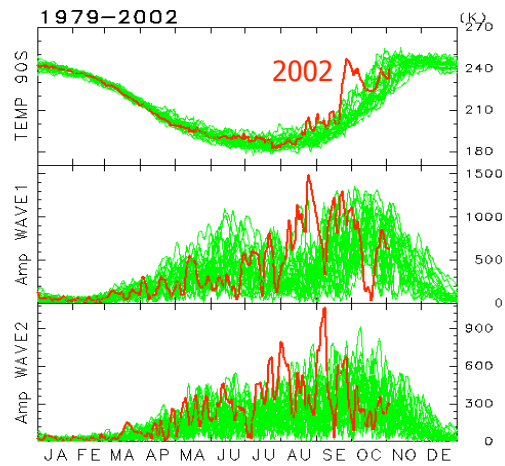


図2：南半球成層圏循環の年々変動のデータ解析と波-流れ相互作用理論に基づく診断

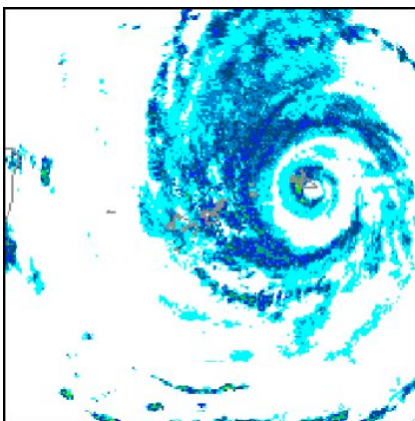


図3：台風眼のレーダー画像解析

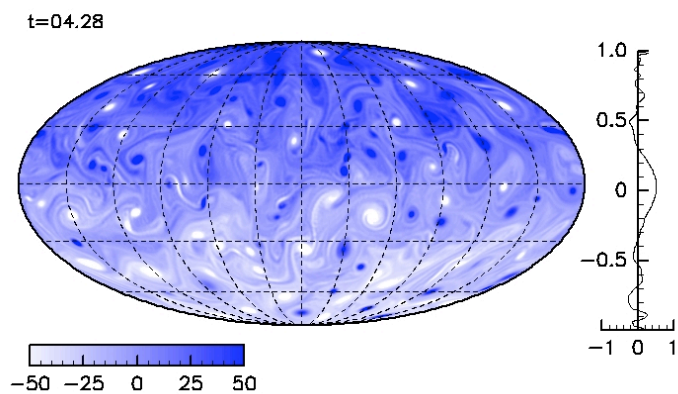


図4：回転球面上の浅水系減衰性乱流と赤道ジェット流形成

物理気候学研究室

=== 気候の研究 ===

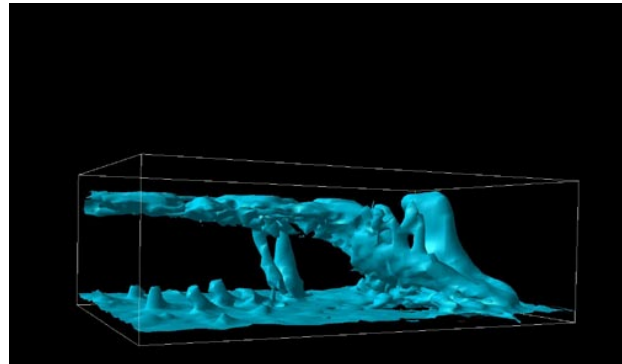
数値モデルによる気候の研究を行っています。気候は複雑なシステムですので、それを構成する様々な要素をひとつずついねいに調べることが必要です。そのための観測や人工衛星データの解析なども行っています。

主なテーマ

* 気候モデルを用いて地球温暖化に関係した数値実験を行っています。植生の変化が気候に与える影響も調べています。

* 都市気候などの研究には、精密数値モデルの開発が必要です。1km程度の大きさの大気中の複雑な現象まで表現できる数値モデルの開発を行っています。

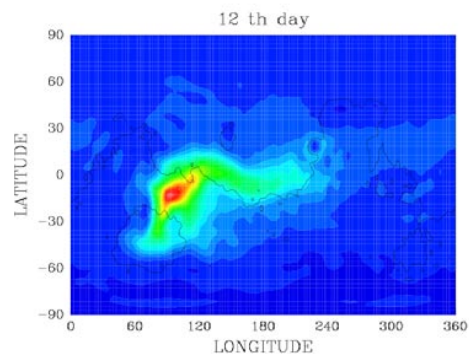
* 衛星データの蓄積によって惑星気候の研究も可能になりました。火星のダストストームが気候に与える影響などを調べています。



熱帯線状降水システムの再現実験：1993年2月23日に東経160度、南緯9度で観測された降雨システムを数値実験により再現しました。数値実験によって、雲内で起きていることを推論することができます。



カンボジアでの洪水を空から見ました。画面中、白っぽく写っている広大な領域が洪水の被害地域です(2006年7月、カンボジア シェムリアップ市)



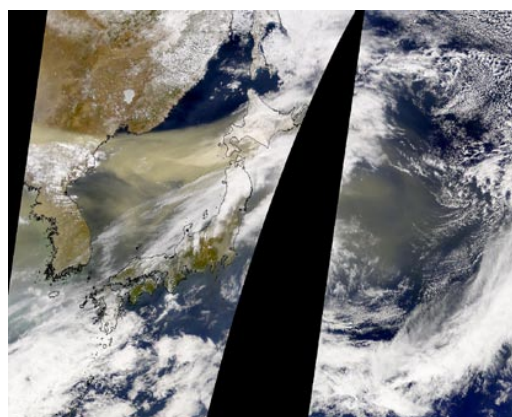
火星において人為的にダストを大気中に放出した時のダストの光学的厚さの分布。Hellas盆地北東端からダストを放出した場合です。

* 東南アジアモンスーン地域に独特な降雨システムを研究しています。熱帯での雨の降り方は日本とはかなり違います。現地気象台と協力して、さまざまな地点の雨量やレーダーのデータを収集しています。



東南アジアでの観測風景。アジア各国との共同観測によってモンスーンの解明をめざしています。

* 熱帯域の積雲活動の解析。2006年には、宇宙からさらに雲活動をよく観測できる衛星が観測を開始し、新しい成果が期待されています。



2002年3月18日に衛星によってとらえられた黄砂現象。中国の砂漠地域で巻き上げられた黄砂粒子が日本の上空に輸送されてきているのが認められます。(NASA Web Page より)

* 東アジア地域における物質輸送の研究。東アジア地域における自然起源や人為起源のエアロゾル粒子の輸送過程が気象現象とどのような関係にあるのかを研究しています。

研究室ホームページ
<http://www-clim.kugi.kyoto-u.ac.jp>

人工衛星で宇宙から地球を見ると、雲のてっぺんしか見えません。これでは、どこにどんな雨が降っているかが正確に分かりません。
 2種類の赤外線を観測すれば、雲の種類を推測でき、雨や風の状態を知るのに役立ちます。

