スライド1

「パソコンを利用した海洋教育素材の一例」というテーマで、今回は自分の専門である海洋物理にしぼって教育素材を紹介します。海洋物理学とは海流や波動などの海洋に生じる運動のメカニズムを解明し、その運動に伴って水温や塩分などがどのように分布し変動するかを研究する分野です。

スライド２

海流と聞くと黒潮を思い浮かべる方が多いと思います。黒潮は日本の南岸に沿って流れる世界最大の海流で、その流量はアマゾン川の約150倍以上にも達します。しかしながら黒潮を実際に見たことのある人はほとんどいないと思います。左上の写真は学生実習で東京・八丈島間を結ぶ定期フェリーを利用して黒潮観測を実施した様子です。フェリーから海を眺めるだけで黒潮の存在はまったく認知できません。そこでフェリー航路上の複数の測点（左下図）でXBTと呼ばれる投棄式水温計を投入しました。右の図はその結果得られた水温の鉛直断面図です（横軸が緯度、縦軸が水深）。水温分布が北から南に傾いているのが分かりますが、これが黒潮に対応します。

スライド３

ある仮定（地衡流仮定）をすると、水温分布から黒潮の流速を求めることができます。こうすると最大流速が2m/s、幅が約50km厚さが数百mの幅広く分厚く流れる黒潮の存在が確認できます。なお、この観測は大人が付き添えば児童でも出来るので、機会があれば黒潮観測ツアーを開催できればと考えています。

この例の様に海洋の物理現象は人間のスケールを超えて理解しにくいものが多く、このことが海洋教育を困難にする一因になっていると考えられます。パソコンを利用することでその困難を軽減し、海洋現象の様々な側面を双方的に学べるようになることが期待できます。

スライド４

この図はOcean Data Viewというフリーソフトを利用して描いた、太平洋の中央を南北に切り取った水温の鉛直断面図です。このソフトを使うことで全世界の海洋データをパソコンで簡単に可視化することができます（ソフトの基本的な操作方法はホームページを通じて解説する予定です）。

この図を前知識なしで眺めるだけでも海洋の様々な特徴が発見できます。まず地形的特徴として、海洋は水深が6000m程度あり数千mに達する急峻な海山が数多く存在します。また深いほど水温が低下します。これは水温が低いほど密度が増加することを反映していますが、真水の密度は4˚Cで最大になるのに対して海水の密度にはそのような極大はないので深海の水温は4˚C以下に下がります。また、海水は０˚C以下で凍るため極域には水温０˚C以下の非常に冷たい海水が存在します。

さらにこの図から海洋の重要な特徴である二層の構造が見てとれます。水深が約1000mより浅い部分の暖かく鉛直方向に水温が大きく変化する表層海洋と、水深1000m以下の冷たく水温がほぼ一様な深層海洋の二つの層です。黒潮やガルフストリームといった風により駆動される強い海流は主に表層海洋に存在しています。しかし暖かい表層水は海洋全体のほんの一部分を占めるにすぎず大部分はその下の冷たい深層水によって占められています（ちなみペットボトルで販売されている「海洋深層水」のほとんどは水深500mより浅い所から汲み上げられたものなので厳密には海洋深層水と呼ぶことはできません）。この冷たい深層水は極域で冷やされて密度が重くなった表層水が沈降することによって供給されています。

スライド５

この図はOcean Data Viewで描いた水深3000mにおける深層海洋の酸素濃度の分布です。この酸素濃度は海水が海面から離れてから経過した時間（海水年齢）を表す指標となります。海洋中の酸素は海表面で大気から取り込まれ、その後に生物の呼吸によって徐々に消費されていくためです。この図をみると酸素濃度が北大西洋の極域や南極で特に大きく、太平洋やインド洋で小さいことが分かります。このことは全世界の深層水が北大西洋の極域と南極海で表層水が沈降することによって形成され、そこから太平洋やインド洋に流れていくことを意味しています。この深層水の循環を模式的に示したのが右下図のブロッカーのコンベアベルトです。この深層循環は非常にゆっくり流れ北大西洋から出発し北太平洋にまで到達するのに1000〜2000年もの時間がかかると推察されていますが、この循環によって大量の熱と物質が輸送されるため長期の気候変動をコントロールする重要なファクターになっています。

またこの図で興味深いのは、日本海の酸素濃度が周りに比べ明らかに高いことです。これは日本海が比較的低緯度にあるにも関わらず、そこでは冬季のシベリアからの冷たく乾いた季節風が吹きこむことによって深層水が形成されるためです。日本海では全世界の海洋に存在する物理現象のほとんどすべてが見られることから「ミニ大洋」とも呼ばれています。

スライド６

この図は大西洋と太平洋の塩分の鉛直断面図です。この図からも深層循環の様子、北大西洋の極域で塩分の高い海水が沈降し、それが南下して南極に到達し、太平洋を北上する様子が見てとれます。

スライド７

次に、パソコンを活用した海洋教育素材として数値実験の一例を紹介します。数値実験（数値シミュレーション）は現代の科学技術を支える最も重要かつ強力なツールの一つとなっています。しかしながら、初等中等の理科教育において数値実験の本格的な導入はこれからの課題です。海洋の物理現象は比較的簡単にパソコンを使って再現できることから数値実験の導入としても非常に有望です。

この動画（動画ファイルMovie1）は水深10mが海の水面を伝わる波の数値シミュレーションで、上段に水面変位を下段に水面下の流速の分布を示しています。これは波の波長(約400m)が水深(10m)に比べて十分に長い場合に成立する近似的な流体方程式を、パソコンを使って数値的に解いた結果です。なお、この数値シミュレーションで使ったソフトウェアは全てインターネットから無料でダウンロードすることができます。

スライド８

海洋の運動は流体方程式によって支配されていますが、その法則はこのスライドに示した様にそれほど難しいものではありません。1番目の法則は海面の傾いた方向に水が流れること、２番目の法則は水が集まるところで海面が盛り上がる、というものです。これら２つの法則は海洋だけでなく全ての流体運動に共通するものですが、３番目のコリオリ力については海洋大循環の様な地球規模の空間スケールで１日以上の時間スケールをかけてゆっくり変化する現象でのみ重要となる法則です。前のスライドで示した海洋波の運動では時間スケールが短いためコリオリ力は無視できます。

スライド９

数値実験では計算設定を変えることによって、海洋波の性質を容易に調べることができます。上段の動画(動画ファイルMovie2)は海の水深を変えて計算を行った結果ですが、海洋波は水深が深いほど速い速度で伝播することが分かります。下段の動画(動画ファイルMovie3)は水深が徐々に浅くなる地形上を伝播する海洋波の振る舞いですが、岸に近づくにつれて波の伝播が遅くなるため波が前につんのめり波長が短くなって波高が成長する様子が分かります。

スライド１０

この動画(動画ファイルMovie4)は前のスライドと同じ海面波の計算プログラムに、仙台空港を横切る緯度線に沿う現実の海底地形と陸上地形を組み入れることで東日本大震災の津波の数値実験を行った結果です。津波の初期波形として震源位置を中心とする三角形の水面の盛り上がりを適当に仮定しました。この数値実験では緯度線に沿う１次元方向だけしか考慮していませんが、それでも津波が地震から約65分後に海岸に到達したこと、海岸で津波の波高が10m程度に達したこと、海岸を乗り越えた津波が内陸に約5km進行したことなど、現実に発生した津波の振る舞いを大まかに再現しています。なお、この程度の数値実験であればノートパソコンを使っても30秒足らずで計算が完了します。

スライド1１

今までのスライドで示した１次元の海洋波とまったく同じ法則で水平２次元平面の海洋波の数値実験もできます（動画ファイルMovie5）。さらに、水平２次元の数値モデルにコリオリ力の効果を加えることに様々な海洋現象の再現が可能になります。例えば、津波の数値シミュレーション（動画ファイルMovie6）や全球潮汐の数値シミュレーション（動画ファイルMovie７）、風により駆動される海洋循環と黒潮の数値実験（動画ファイルMovie8）などが可能となります。

これら数値シミュレーションの計算プログラムや計算方法の解説は、海洋教育促進研究センターのホームページを通じて順次公開していく予定です。