

研究船で海を学ぼう、に参加の皆さんへ、実行委員会からお願い

○この行事は「研究船で観測し、収集したデータを陸上で分析し、最終日に研究発表を行う」という一連の流れで成り立っています。日程が限られているので、皆さんに以下の配布テキストを読んでくるという「予習」をお願いいたします。

○皆さんが集合した初日に本年度実行委員長の岸道郎（北海道大学教授）から海についての講義（基調講演）があります。この講演はみなさんが、テキストを読んできたことを前提に行いますので、必ずこの文章を読んできてください。その上で分からなかったり、もっと調べたいことがあったら、今回皆さんと一緒に乗船する大学の先生に問い合わせたり、本を読んで調べるなりして予習をしてくと充実した一週間になると確信します。大学の先生の連絡先は別紙に記載してあります（実行委員一同）。

## 研究船で海を学ぼう 2010 年事前配布テキスト 海洋学への誘い

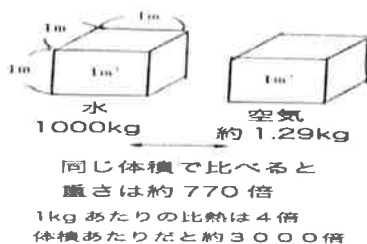
岸 道郎 （北海道大学・大学院水産科学研究院・教授）

### 1. はじめに

地球表面の 70 % は海で、深さの平均は 3800 m もある。陸は平均 840 m、ならせば深さ 2440 m の海底となる。身近な海は、大陸棚海域の一部である。この海域の深さは皆さんご存じのように、200 m まで、面積は海洋全体の 8 %、海水の体積では全体の 0.2 % しかない。

「比熱」はご存じ？比熱は 1 g の物質を暖めるのに必要な熱量を水との比で表したものである。この値が小さいほど暖まりやすくさめやすいし、含むことのできる熱の量が小さいことを表している。水の比熱は大気の 4 倍程度である。これを体積あたりに換算すると、地上の気圧では約 3000 倍（空気の分子量が約 29 なので 22.4 リットルを割り算すればこの値になる。図を参照）、大気全体では平均で数百倍になる。それで、海洋が含むことのできる熱量は、大気の約 1000 倍になる（地球上の水全体で約 5 倍、氷が全部溶けるときの熱（融解熱）換算では 800 倍と計算されている）。

最近の 40 年間に地球全体が加熱された熱量のうち、約 84% が海洋に貯蔵されていると考えられている。いったん海が暖まるとそこに蓄えられた熱量は膨大なものとなり、すぐには元に戻らないから、地球の気候を支配するシステムの中で、特に気候の長期の変動に關連して海の役割は大きくなる。そこで、天気や気候に大きな影響を及ぼしている海と大気のかかわりを中心に、さまざまな角度から海の役割を考えてみよう。

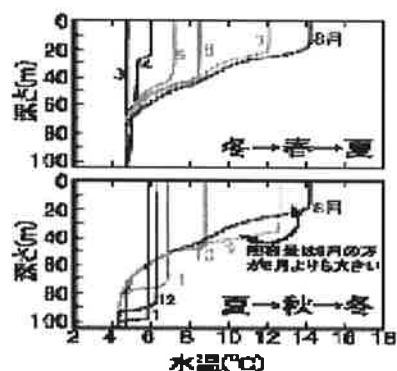


### 2. 海水の鉛直構造

図は、四季のみられる場所での水温の鉛直分布の様子を表したものである。夏には太陽が海水を温めるが、暖まった水は軽いので、海面付近を覆ってしまい、深いところまでは暖まらない。つまり太陽の放射によって暖まるのは海面から深さ 100m 程度である。冬季には表層が冷やされて重くなり、対流が起こり、鉛直方向に一樣な水温になる。すなわち対流でかきまぜられる様子を表している。

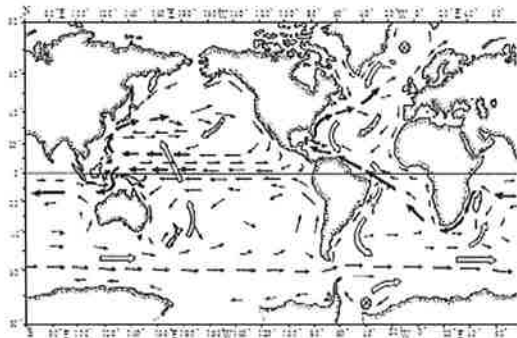
陸では枯れた木の葉や動物の糞は、地面に落ちて菌類などに分解され森林に吸収されるが、海ではプランクトンなどの死骸や魚の糞などの有機物は、沈みながら分解されその場で利用されることはほとんどない。このため、光が届く 100~200m 程度の表層には、有機物が分解されてできた養分が補給されにくいので、植物プランクトンはなかなか増えない。温帯域では、春になると、太陽の日射量が増えて水温が上がり、光合成に適する条件が整うこともあり、冬季に鉛直混合によって下層から供給された養分を使って植物プランクトンが増殖する。熱帯域では冬季にも鉛直混合は起こらないので、光と水温が十分にあっても、植物プランクトンは一年中きわめて少ない。

### 海洋混合層の季節変化



### 3. 風で引きずられる海水

北緯 40 度付近を偏西風(西風)が吹いている。そして北緯 20 度付近では東風(貿易風)が吹いている。これらの風が海流を作る大事な役割も果たしている。世界の海の大規模な循環の様子を、模式的に示した。黒い矢印は海の表層の循環を表している。太平洋でも大西洋でも、海の西の端だけに強い流れがある。北太平洋の西の端の流れは黒潮、北大西洋は「湾流(Gulf Stream)」と呼ばれている。このような海流はどうしてできるのか。表層の海水は、主にその上を吹く風によって動かされているのだ。貿易風と偏西風は、北太平洋、北大西洋の表層の海水を時計回りに吹き回しているのだが、地球が自転していることや地球が丸いことによって、強い流れはこれらの大洋の西側だけに限られて形成される。黒潮や湾流は海流の中でも特に強い流れであるが、秒速は 1~2m、人間が早歩きするくらいの速さである。低気圧が発達すると秒速 20m 以上で風が吹くのは大違い。これは水が空気より重いこと、海が深いことに大きく関係している。いくら空気が海面をこすっても、流れはそんなに速くならないのだ。しかし 1 秒間に流れる水の量はナイアガラの滝の 5000 倍ほどに上る。黒潮は熱帯から寒帯へ熱を運ぶ大きな役割を果たしているのだ。そして北太平洋の水が、この表層循環に乗って北太平洋を一巡するのは、数年かかる。日本の南岸を流れる黒潮の水は、南の海から来るから温かい流れで、東北の東の海には、親潮と呼ばれる冷たい流れがある。海中はとて流れがゆっくりしているので、見ても流れているのがなかなか分からない。それに黒潮や親潮が流れているところまで行ったことのある人も少ないだろう。しかし、黒潮や対馬海流が西から流れてくることは、遠く中国から日本の沿岸に中国語で書かれた空き缶や産業廃棄物が漂着することからも思いを馳せることができる。



### 4. 塩辛い大西洋と深層の海水

高緯度の寒いところの表層の水が、冷たい風によって冷やされて、その下方の水より密度が大きくなると、対流が起きて、表層の水が沈み込む。大規模にそのような沈み込みが起こっているところが、世界の海に 2 か所ある。1 つは、グリーンランドの東方、もう 1 つは南極大陸のウェデル海と呼ばれているところで、どちらも左下の図の中に丸で囲んだ×で記してある。どうしてグリーンランドの沖で表層の水が沈み込むのに太平洋では深層まで沈み込まないか、というと太平洋は塩分が小さい(大西洋より太平洋の方が降水が多く、大きな河川も多いことが主な原因)から同じ温度まで冷やされても塩分の高い大西洋の海水の方が重くなるのだ。そして太平洋は北がベーリング海でほとんど閉ざされているが、大西洋は広く北極まで続いていることも大事だ。にわとりと卵の関係になるけれど、大西洋の海水がグリーンランド沖で沈み込むので、湾流は北の方まで流れることができる(ひきずられるイメージで)。よってヨーロッパは緯度が高いのに冬でも暖かい。湾流が北まで流れるから、熱帯地方の塩分の高い水がグリーンランド沖まで到達できるのだ。グリーンランド東方で沈み込んだ重い水は、深層まで沈み、図に白い矢印で示したように、やはり大西洋の西の端あたりを通過して、赤道を越え、ウェデル海から沈んだ水とともに、南極の周りを東に流れる。その一部はインド洋にも入りこむが、多くはニュージーランドの東を通過して北上し、赤道を越えて北太平洋に流れ込む。北太平洋に達した水は、最初グリーンランド沖で沈みこんでから、2000 年の程度の時間を費やしていることが分かっている。表層の水の動きは速いけれど、この深層循環の水の動きは大変緩やかなのだ。

### 5. 海は生き物が住める地球をつくった

地球が生まれてほどなく、遅くとも 38 億年前に、海に生命(生物)が誕生した。それまで、大気の主成分は、窒素と二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)だったが、この生物による光合成でできた酸素(O<sub>2</sub>)が海水や大気に加わることになった。この O<sub>2</sub> は、海洋中の還元物質を酸化するのに使われてしまい、25 億年前によく海水中に残りはじめ、海洋は酸化環境となった。この状態になると、海は一変し、酸素呼吸をする動物が発生した。しかし、生物は 5 億 7 千万年前の古生代の開始までは、陸には住めなかった。

古生代になると、大気に O<sub>2</sub> が十分に蓄積し、短波長の紫外線を吸収してオゾンとなり、それがより長波長の紫外線を吸収するようになったことや生物が乾燥に耐えられる構造になったことにより上陸が可能になった。水辺には、現在の石炭や石油のもとになった植物が繁茂し、大気中の O<sub>2</sub> 濃度も急増して現在と同じ程度となり、大型の動物が

陸に住む中生代(2億5千万年前)となった。一方で、大気中のCO<sub>2</sub>は、生物の関与により有機物となり、岩石の風化に使われ、水温の下がった海に溶け込んだ。こうしてCO<sub>2</sub>濃度は減少を続け、その温室効果は減少した。

その次の新生代(6,600万年前)は寒さに強い哺乳類の時代となった。そして、最近の300万年、特に80万年前からは寒暖が周期的に交代する氷期・間氷期の時代に入り、10万年ごとに大気中のCO<sub>2</sub>濃度が最低(180ppm)となる強い氷期が現れた。

## 6. 海にいるさまざまな生物

海には、単純な構造のウイルスから高度な構造のクジラまで多種多様な生物が生息する生態系がある。これは、水中という環境によるものであり、陸のものとは大きく異なっている。動物の大部分は、陸に適応してから海に還ったものを除けば、呼吸には水に溶けた酸素を利用している。植物の生産活動は、太陽光の届く表層に限られる。しかし、水温は-1.8℃以下にはならないので、生物の活動は低温でも止まることはない。

海の生態系の最大の特徴は、外洋域での生産者の大きさは小さく、消費者は段階を経るごとにだんだん大きくなり、その生体量は食物段階を1つ経るごとに約1割に減少する。また、死んで分解される割合は小さく、餌のうち消化されないまま排泄される部分が少ないことも特徴である。それでも、これらの生命のない有機物は、細菌類に分解され無機物に還り、やがて生産者に再利用される。これに対して、沿岸域の生態系では、生産者に海藻や海草が加わることや水深が浅いことから、外洋域のものとは異なる。

なお、海底には熱水の噴出する場所があり、そこではメタンや硫化物をエネルギー源とする生物(化学合成生物)もいるが、量的には大きなものではない。

## 7. 海の科学は、ホリスティック科学の1つである

海の科学、海洋学は、物理学、化学、生物学を基礎としているので、しばしば、海洋物理学、海洋化学、海洋生物学の3分野からなるものとされる。しかし、ちょっと考えて欲しい。「陸上学」ってありますか？ 陸上で発展してきた物理学と「海洋学」でいう海洋物理学は全く異なっている。海の科学を「海洋学」ということ自体が不自然である。まして、海洋学をこれら3分野(要素)に分けてしまうことはできないし、海洋の学問全体は、これら3分野の和よりずっと大きい。例えば、日本海の生物を研究する場合、生まれてから親になるまでにどのような生活を送るのかという課題を考えると、海水の物理的動きや化学物質の振る舞いと合わせて考察しないと、その生物の真の姿は見えてこない。

物理学、化学、生物学は、海を研究し、理解する手段であり、それらの結果を融合させて海洋環境を解明するのが海洋学になるので、これは「ホリスティック科学\*」ということができよう。なお、海洋学の周辺には、海底を扱う海洋地質学や、海洋の過去や未来、資源や環境の問題により力点を置いた科学もある。

(\*ホリスティック(holistic)は、holos(ギ)に由来し、wholeと同源。全体を意味し、全体は部分の総和以上とする全体論(哲学)を形容詞的に表現している。逆は、還元論。)

# 船上研修

## 船上研修テーマの概要

<海洋観測・試料採取> (\*研修生が班に分かれて全員が経験する)

1. 気象・海象
2. CTD
3. 採水
4. 水色・照度観測
  - (1) フォーレル水色計
  - (2) 透明度板
  - (3) 赤色板と青色板
  - (4) 水中照度計
5. 動植物プランクトン・小型遊泳動物採集  
ノルパックネット, 稚魚ネット, 大型ネット
6. 海底堆積物採取  
スミスマッキンタイヤ採泥器, マルチプル採泥器

<航走観測> (\*主に連続観測装置による記録を持ち帰る)

1. 気象・海象観測データ
2. XBT 観測 (投げ込み式水温計)
3. 表面水温塩分観測 (サーモサリノグラフ)
4. ADCP 観測 (音響ドップラー式流速計)

<海を体験しよう> (\*研修生全員が経験する)

1. 水圧の威力を観る (深度 50m まで空の缶詰を沈めて, つぶれる様子を水中ビデオ映像にて観察)
2. 青い海の観察 (深度 100m まで水中ビデオ装置を沈めて, 海中の明るさや光の吸収の変化を映像にて観察)
3. 満天の星空観察会 (後部甲板)
4. 深層水大循環水槽実験 (食堂)
5. プランクトン, 小型遊泳動物の観察 (食堂)
6. 東京湾-黒潮間航走観測結果発表会 (表層水温塩分, 海水濾過物, 流向流速, 気象の変化)
7. 船内見学

<化学分析> (\*担当の陸上研修班が実施)

1. 溶存酸素の測定 (自動滴定装置使用) (食堂)
2. 栄養塩の測定 (リン酸塩, ケイ酸塩) (食堂)
3. クロロフィル測定のための海水ろ過 (第2研究室)

## 船上研修テーマの詳細

<海洋観測・試料採取> (\*研修生が班に分かれて全員が体験する)

### 1. 気象・海象

気温・湿度, 気圧, 風向・風速, 雲量・雲形, 風浪・うねりを各種計測器や目視によって観測します。

### 2. CTD

CTDとは, 塩分, 水温, 水圧 (深度がわかる)に加えて, 溶存酸素と蛍光光度 (クロロフィル量がわかる)の各センサーからなる観測機器のことです。このCTDセンサーと採水器 (容量10リットル, 24本)を組み合わせたものをCTD-採水装置と言います。この装置を海中に降ろしていくと, 水温や塩分などの測定結果が船上のパソコン画面に連続して映し出されます。このようにして水温や塩分などを測定します。

また、研究室からの指令によって採水器を作動させ、海水試料を採取することができます。採水層は10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, ……2000mのように、水深に応じて適宜決めます。

### 3. 採水

CTD-採水装置によって各層ごとに採取された海水試料を、化学成分などの目的に応じて試料ビンに採取します。二酸化炭素、溶解酸素、栄養塩やクロロフィルの濃度を測定し、駿河湾沿岸水と黒潮域外洋水、表層水と深層水における分布の違いを調べましょう。

### 4. 水色・照度観測

- (1) フォーレル水色計を使って、海面の色を調べましょう。
- (2) 透明度板（直径30cmの白色円板）をロープにつなげ、海中におろしながら目視によって白色板が見えなくなる深さをロープに記した目盛りで読み取ります。これを透明度といいます。
- (3) 赤色板と青色板（直径30cmの各円板）を同様に海中におろし、赤色板と青色板が見えなくなる深さを読み取ります。3つの色の違う円板を用いて、可視光の波長と海水による吸収の関係を調べましょう。
- (4) 水中照度計を海中に降ろして、可視光の波長毎に届く深さの違いを測定します。また、海の中の明るさの変化も測定します。

### 5. 動植物プランクトン・小型遊泳動物採集

稚魚ネットを用いて表層の生きものを採集します。また、ノルパックネットを深度150mから海面まで曳き上げて動植物プランクトンを採集します。大型ネットを深度500m, 1000mと2000mまで降ろし、小型遊泳動物を採集します。大型ネット採集は駿河湾と黒潮域でそれぞれ1回行い、生息量の鉛直変化を調べましょう。

### 6. 海底堆積物採取

マルチプル採泥器を用いて海底堆積物を採取する。東京湾と相模湾の海底とで、海底堆積物の性状（色・粒度）の違い、底泥中に暮らす生きものの量や海水中を落下してきたプランクトンの遺骸を調べましょう。

## <航走観測>（\*主に連続観測装置による航走観測記録を持ち帰る）

### 1. 気象・海象観測

気温・湿度、気圧、風向・風速、日射量、海面水温を自動に記録します。それぞれの項目の変動を調べましょう。

### 2. XBT 観測

XBTとは、投げ込み式水温センサーと記録計からなる観測機器のことです。航走しながら水温センサーを投入して水温の鉛直分布を記録します。駿河湾と黒潮域の間でXBT観測を行い、水温の鉛直断面構造を調べます。

### 3. 表面水温塩分観測

海の表面の水温と塩分を航走しながら計測する測器をサーモサリノグラフといいます。この測器は、水温塩分の他、クロロフィルaも同時に計測できます。船底からポンプでくみ上げた表層海水をこの装置に導入すると、各成分の測定結果が1分毎に記録されます。駿河湾と黒潮域の往復の航路において、これらの成分の変動を調べましょう。

### 4. ADCP 観測

ADCPとは、航走中に船底から音波を発信し、海水中に漂っている微粒子に反射した音波を受信し、その音波周波数の変化（ドップラー効果）から海水の流向・流速を計測する観測機器のことです。ADCP観測によって黒潮の幅、流向、流速を調べましょう。

## <海を体感しよう>（\*研修生全員が経験する）

### 1. 水圧の威力を観る

缶詰水圧実験：中身の入っていない缶詰を海中に沈め、形が変わる様子をビデオカメラで撮影し調べてみましょう。

### 2. 青い海の観察

水中ビデオを100mまで降ろし、海が青く見えることを観察してみましょう。

### 3. 満天の星空観察会

陸から遠く離れた黒潮域で、晴れていれば、夜はきっと満天の星空が楽しめることでしょう。

### 4. 深層水大循環水槽実験

成層構造と深層水大循環：成層構造とはどんなこと？ 暖かい表層水を冷やしたらとどんなことが起こるのか、水槽実験をして観察してみましょう。また、深層水の大循環とその役割についても学んでみましょう。

### 5. プランクトン、小型遊泳動物の観察

船上で採取したプランクトンや動物を顕微鏡で観察してみましょう。小さな生きものの美しい形に魅了されることでしょう。

#### 6. 東京湾-黒潮間航走観測結果発表会

東京湾から相模湾を経由して黒潮域まで航行すると、表層水の水温や塩分、海中のプランクトン量、流れの方向や速さなどは大きく変化します。皆さんが航海した海ほどのように変化していたのでしょうか、観測結果の速報によって実感してみましょう。

#### 7. 船内見学

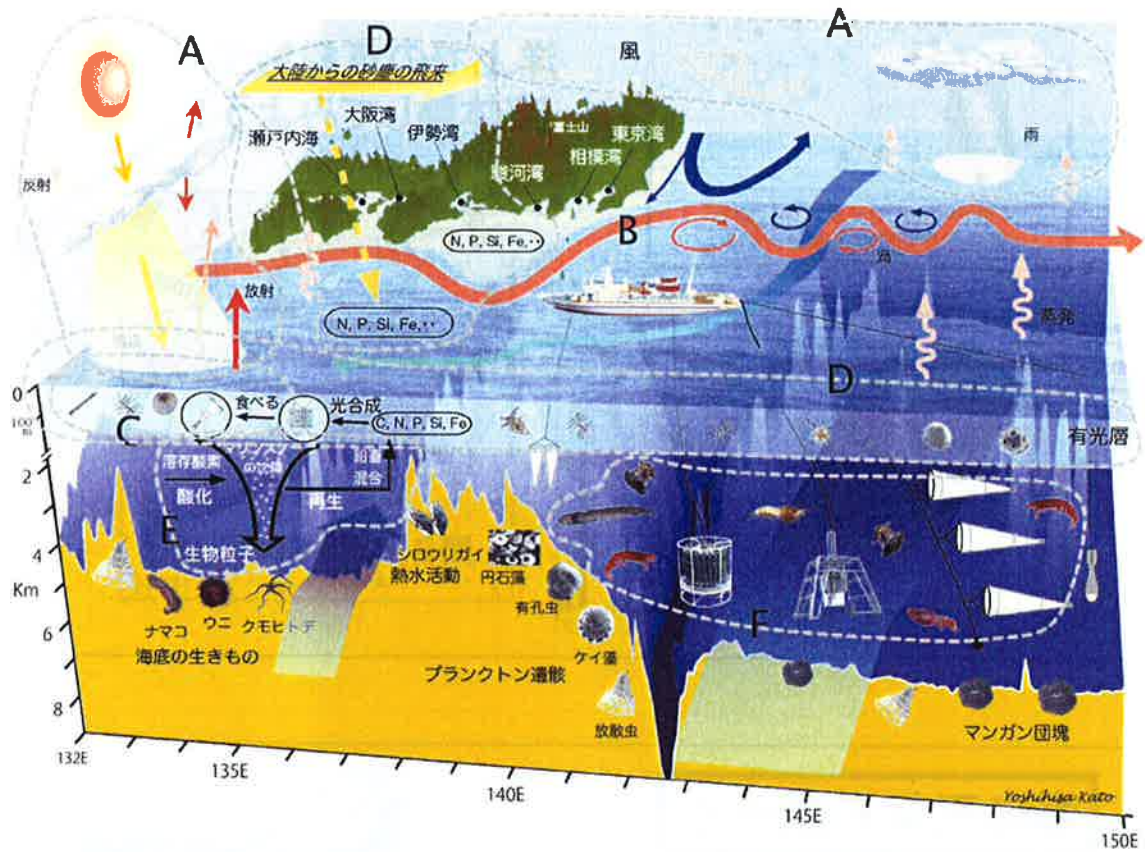
主に機関室を見学してみましょう。その力強さに圧倒されることでしょう。(ブリッジは気象観測時に見学します)

#### <化学分析> (\*担当の陸上研修班が実施)

陸上研修のために、船上で溶存酸素と栄養塩(ケイ酸塩、リン酸塩)を測定します。また、クロロフィルを測定するために、前処理として、船上で海水をろ過し、ろ紙を冷凍して持ち帰ります。これらの作業は陸上研修のテーマを選択した研修生が担当します。

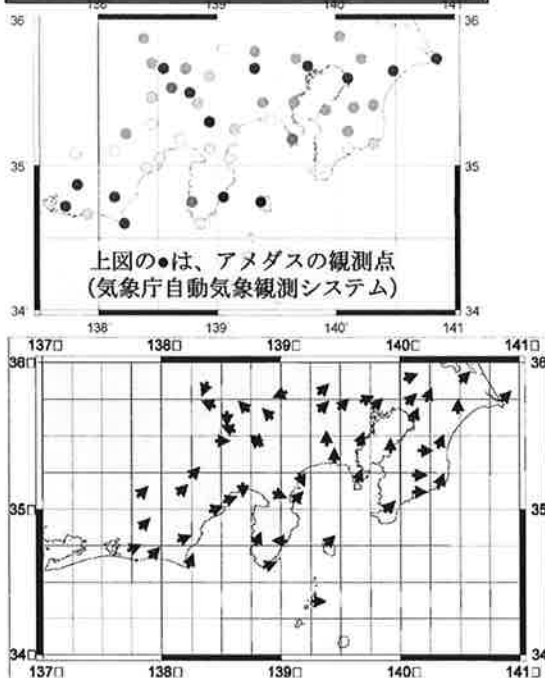
# 陸上研修資料

## 陸上研修テーマの概要



研修テーマ	俯瞰図中の記号	各テーマと関係する目的・対象 (関係の強さを程度を◎と○で示す)				
		人の生活	大気と海のつながり	海の仕組みと化学成分	光合成と生きもののつながり	生きものの生活環境
1. 海の上の天気 - 温度調節をする海の役割	A	○	◎			
2. 世界最大の海流 - 黒潮の速さと海の構造	B		◎		○	
3. 明るい海と暗い海 - 青い海と藍の海	C			◎		○
4. 小さいけれど力持ち - 明るい海にすむ生産者	D		○		◎	
5. 海は大きな化学プラント - 暗い海は餌の再生工場	E		○	◎		
6. 海は二酸化炭素の貯蔵庫 - 海水の吸収力を測る	D, E	◎			○	
7. 表層の生物多様性 - 内湾と外洋域の比較	D			○		◎
8. 深海の生物多様性 - 内湾と外洋域の比較	F	○				◎
9. 海底の生物多様性 - 閉鎖性湾と開放性湾の比較 (東京湾と駿河湾)	東京湾と駿河湾				◎	○

# 海の天気を調べる



洋上での気象観測を  
実体験してみよう！



# 海の天気を調べる

## 観測項目

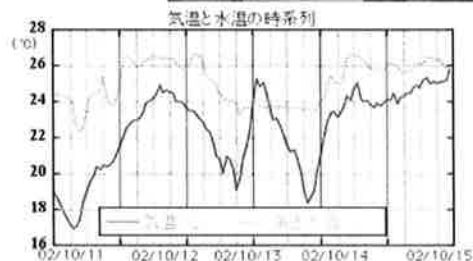
雲量・雲形 風浪・うねり	⇒	実際に自分たちの目で観測 (目視観測)
気圧	⇒	海面気圧に補正
風向・風速	⇒	真風向・風速の平均 ⇒ 船橋にて観測
日射量	⇒	熱収支に影響
乾球温度 湿球温度	⇒ 湿度 ⇒	アスマン乾湿温度計を使用



時系列のプロット  
(横軸：日時)



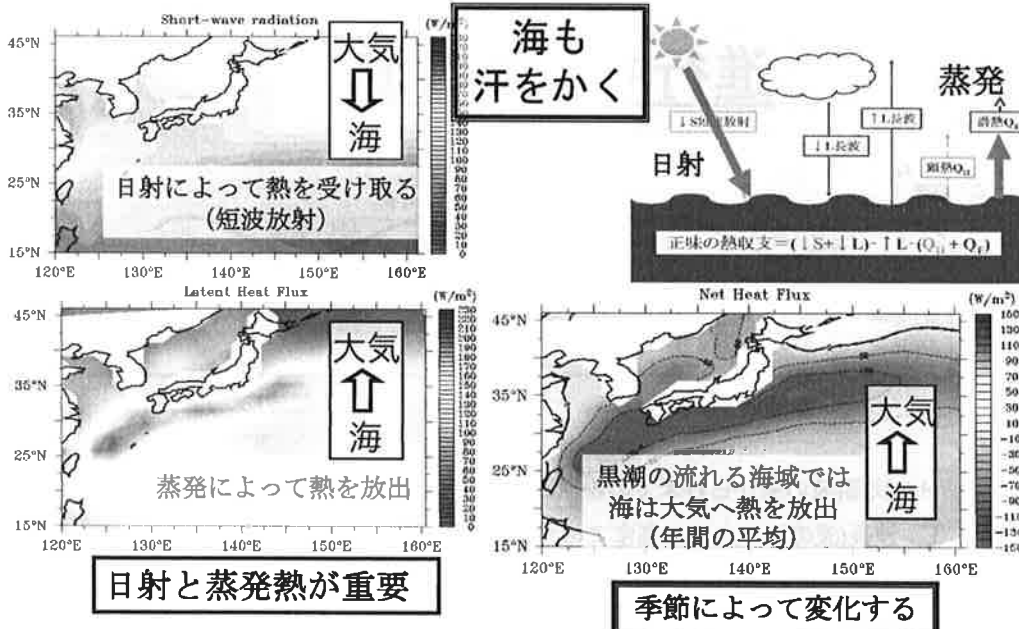
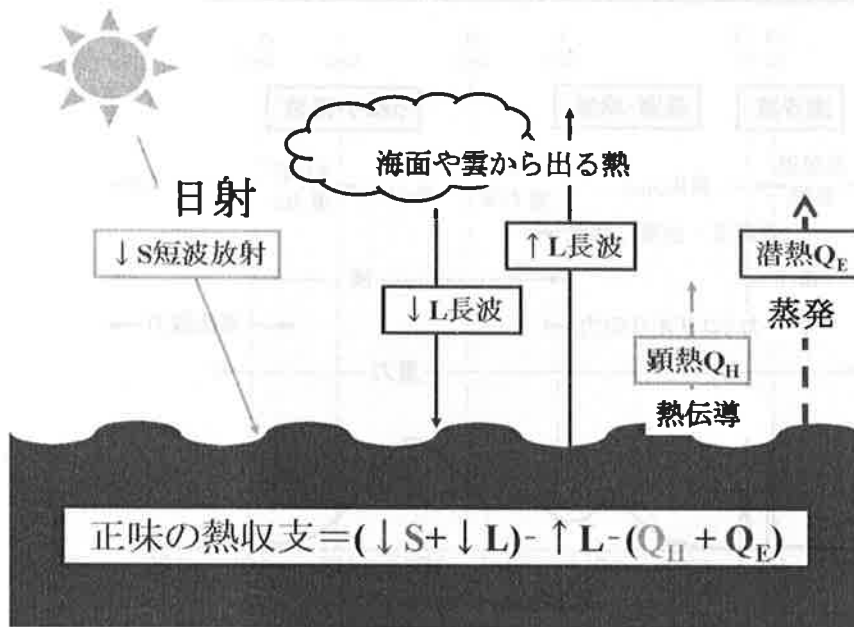
時々刻々の変化を調べる





# 海も汗をかく

大気と海の中の熱の移動を調べる

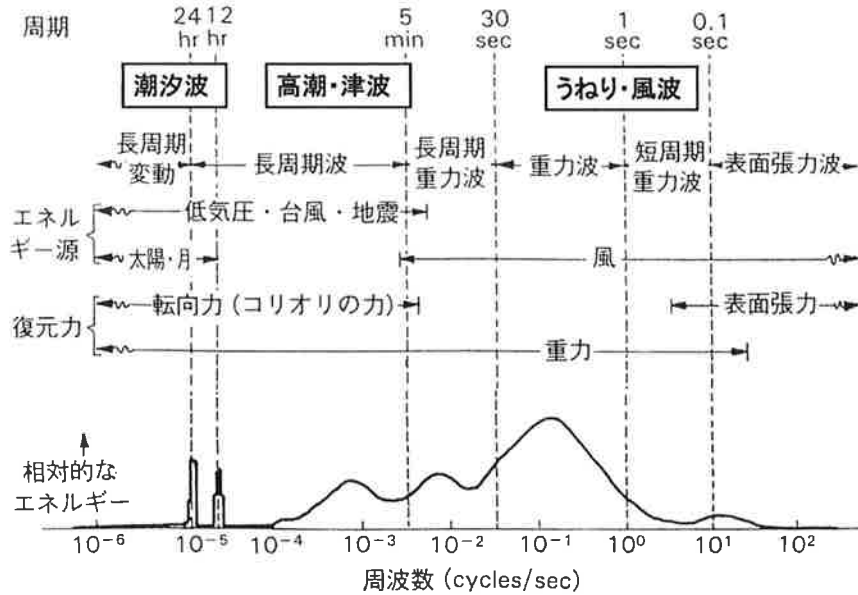


日射量  
蒸発熱

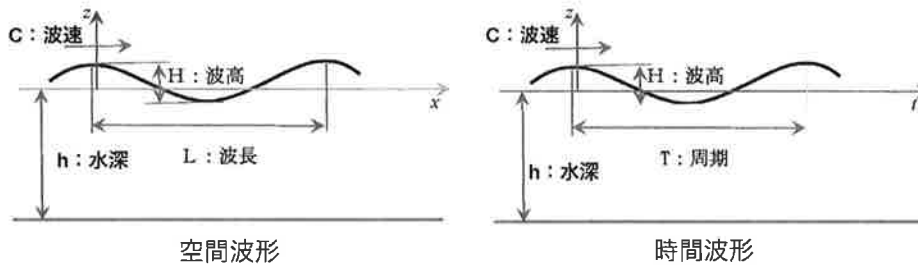


大気と海の中の熱の移動量を求めてみよう!

# 周期による海の波の分類



# 進行する海の波



H: 波高(波の峯から谷までの垂直距離)

L: 波長(波の峯から次の峯までの水平距離)

T: 周期 (固定点を波の峯が通過してから次の峯が通過するまでの時間)

h: 水深

c: 波速(波が進む速さ)  $c=L/T$

## 波に関する大切なパラメータ

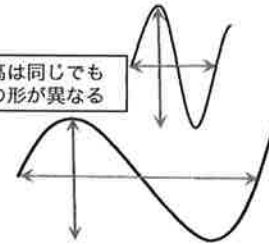
波形勾配 : 波高と波長の比  $H/L$

波のとんがり度を表す指標

$H/L$ が大→波がとがっている。

$H/L$ が小→波はなめらかである。

波高は同じでも  
波の形が異なる



相対水深 : 水深と波長の比  $h/L$

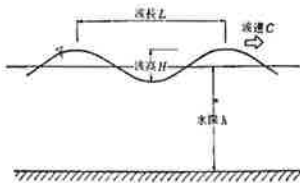
波が底面の影響をどのように受けているかを表す指標

$h/L > 1/2$  深海波

$1/2 \geq h/L > 1/25$  浅海波

$1/25 \geq h/L$  長波 (極浅海波)

(水深に対して波長が長い)



## 風浪とうねり

### 風浪

波頭がとがっている。風向きと進行方向が一致。



観測時にその場所付近を吹く風によって直接起こされた波

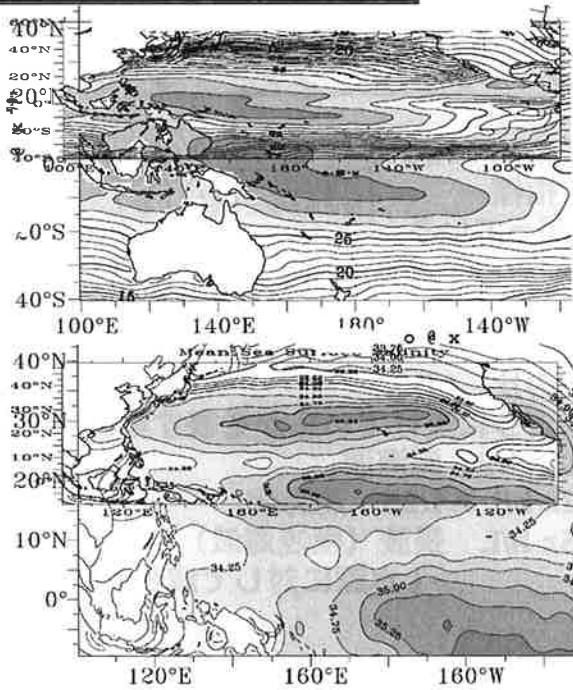
### うねり

波頭は丸みを持ち、波長・周期が長い。



観測場所付近を吹く風によって直接起こされたものでない波

## 海水の性質を調べる



### 海面水温の分布

赤道付近が高い  
 $\leq 30^{\circ}\text{C}$

### 海面塩分の分布

亜熱帯で高い  
 32 ~ 36 ‰ (PSU)  
 (千分率)  
 3.2 ~ 3.6 %

## 海水の性質を調べる

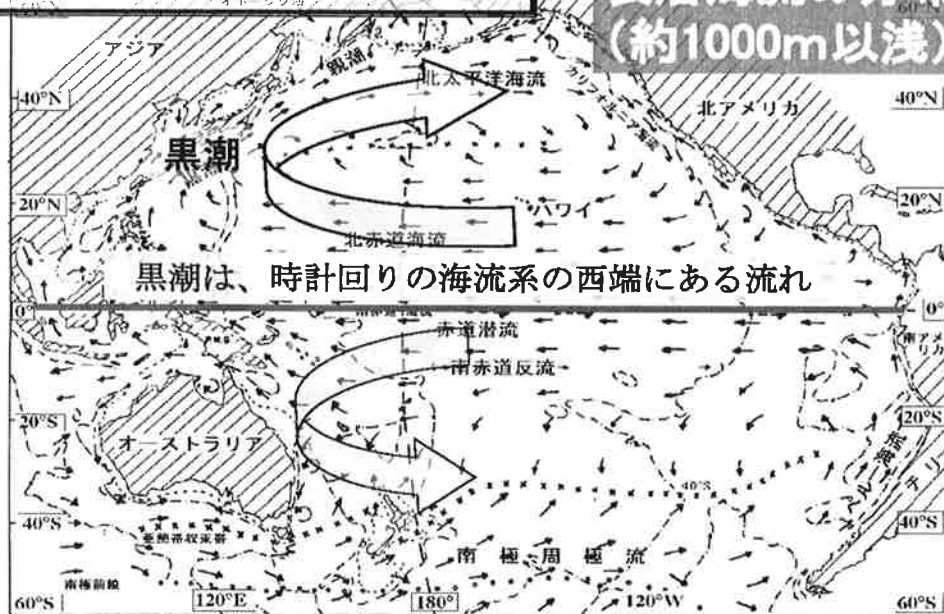
### 海水中に含まれる塩分とは？ 海水中の塩分3.4%の成分内訳



◆ 塩化ナトリウム (NaCl)	77.9%
◆ 塩化マグネシウム ( $\text{MgCl}_2$ )	9.6%
◆ 硫酸マグネシウム ( $\text{MgSO}_4$ )	6.1%
◆ 硫酸カルシウム ( $\text{CaSO}_4$ )	4.0%
◆ 塩化カリウム (KCl)	2.1%
◆ その他	0.3%

**海流の速さと向きを調べる**

**表層海流の分布 (約1000m以浅)**



太平洋における表層海流 (1000m以浅)

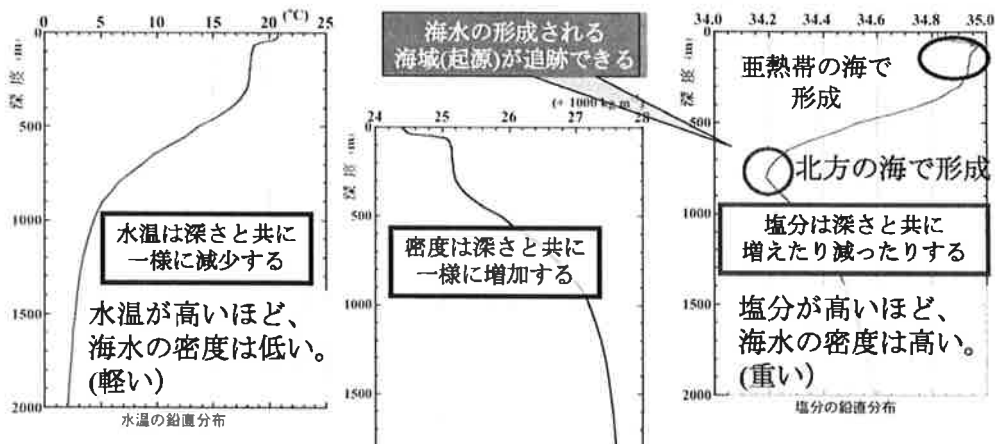
**海水の密度 (重さ) を調べる**

⇒ 水温と塩分による

淡水 (塩分=0) の密度 <  $1 \text{ (g/cm}^3\text{)} = 1,000,000 \text{ (g/m}^3\text{)} = 1,000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

海水の密度 >  $1,000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

**黒潮域での深さ方向の変化**



**黒潮海域での海水の重さは、主に水温の変化によって決まり、深くなるほど、水温が低下するため、密度は高くなる (重くなる)。**

海流の速さと向きを調べる

深層での海水の流れ (2000m以深)

ブロッカーのよって提唱された  
海洋ベルトコンベアー(Broecker, 1991)

表層海流とは  
全く異なります。



(Steele,1989:Oceanus, 32, 5-9 より引用)

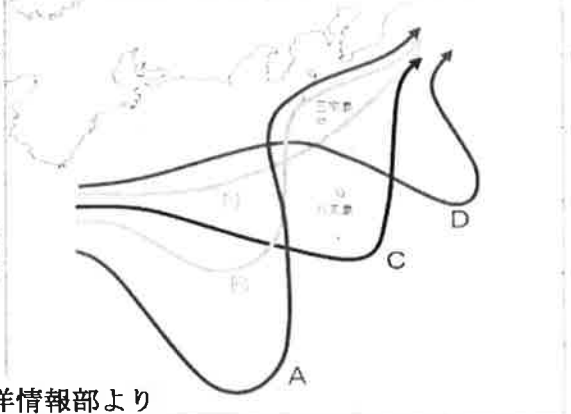
海流の速さと向きを調べる

本州南方における  
黒潮の流路



太平洋における表層流

日本南方海域での黒潮の流路は、直進型と大蛇行型などと変化します。流路の変化によって、カツオの漁場などに大きな影響があります。



海上保安庁海洋情報部より