

## 第4章 海水と植物プランクトン

この章では、海水の基本特性である水温と塩分濃度の鉛直分布と水平分布について述べ、海水中に生存する植物プランクトンとその生態系を左右する因子の一つである栄養塩の鉛直分布と水平分布について述べる。それぞれ、実際の計測手法を紹介すると共に、計測データの表示処理を体験する。また、水平分布に関しては、MODISによる観測データをフォールスカラー表示し、その分布について考察する。

### 4-1 海水温度の深度分布

#### 4-1-1 表層混合層

風の力を主とする海水の鉛直混合により形成される表層混合層(surface mixed layer)が、海水の鉛直構造の最上層に存在する。表層混合層は、鉛直方向に海水が混合する層であり、海面から表層混合層底部まで同一の水温を示す。海域によって、あるいは、海上風の強さによってその規模は大きく変化する。表層混合層が十分に発達するとき、その深さは200m程度まで達する。一方、風が弱いときは、ごく表層に限定される。



図 4-1 は、フィリピン・パナイ島西岸沖合において観測された水温の深度分布を示す。表面において 27.8°C の水温が、約 40m の深度まで、一定の値で示されることが分かる。40m の深度まで鉛直混合が維持され、表層混合層を形成している。

今なお海洋循環の数値シミュレーションが思うような値を出せない原因は、表層混合層の再現の不完全性に原因があるとさえ考えられる。表層混合層が海域あるいは気象条件等により様々に変化することから、数値モデルにおいて可変のレイヤーとして表現することが必要とされるが、実現していない。

また、米国の人工衛星センサー開発のテクニカル・チャレンジと呼ばれる技術上の挑戦課題の一つに、塩分濃度の推定と並び、表層混合層の推定手法が挙げられている。衛星により海水を透過して観察することは困難であることかあら、直接観察される表面の現象と、表面において間接的に現れる現象とを組み合わせ、表層混合層の深さを推定しようとするもので、相当の困難さをともなう技術開発である。

海洋観測において、古くから存在が知られる表層混合層であるが、さらなる研究が必要とされている。

### 4-1-2 温度躍層

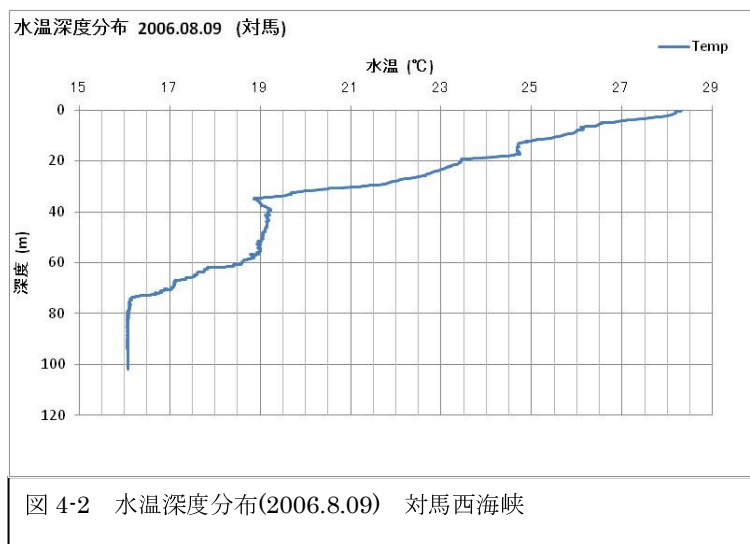
表層混合層の直下には、非常に安定した温度躍層(thermocline)が存在する。この温度躍層は、表層混合層の水温から中層の水温まで急激に温度を下げることから、温度の躍層と呼ばれる。温度躍層は水塊の鉛直混合がなく、非常に安定した状態である。

図 4-2 において、40m 深度の 27.8°C から、140m 深度の 18.3°C まで、急激に水温を下けている。計測装置の制限と計測条件の制約から 140m 深度までの計測であったが、中層の水温はさらに低いことから、温度躍層は 140m より深いところまで存在すると考えられる。

### 4-1-3 成層

夏季の海上風が非常に弱く、風による鉛直混合がなく、また、海流も静かに流れるとき、海面近くの表層において温度躍層と同様な構造をもつ成層(stratification)が構成される。

図 4-2 は、対馬の韓国寄りの西海峡において観測された水温の深度分布を示す。表面において 28.3°C の水温を示し、約 35m の深度において 18.8°C の水温まで、一気に水温が降下する。この成層状態は、前述の温度躍層と同様に非常に安定した状態である。このプロファイルによると、35m から 60m 付近まで 19°C の水温が維持され、さらに、75m 深度付近まで温度躍層と考えられる水温の降下が見られる。35m から 60m 付近までの 19°C の層は、成層状態となる前の混合層の下層部であると考えられる。夏季になり、鉛直混合が停止し、表層側が安定した状態へ移行したと考えられる。



このような成層状態は、夏季の東シナ海において頻繁に観測される。また、成層状態となった時、表面の水温は 30℃前後と海水温の最大値を示す。また、衛星搭載の熱赤外センサーによる海表面温度観測の場合、成層状態であるとともに、昇温状態であり、周辺の黒潮などの温度差が非常に少なく、流れを判読することが困難である。

## 4-2 塩分濃度の深度分布

### 4-2-1 塩分濃度

海水は「しょっぱい」と表現されるように、塩化ナトリウム(NaCl)を主とする塩分濃度が 35‰ (パーミル)の水であり、非常にしょっぱく感じられる。これは、1 リットルの水に 35g の塩(しお)が溶解した状態である。100g あたり 3.5g の塩(しお)に相当し、濃度として 3.5%であるが、海水に含まれる塩分の濃度を精度良くとり扱うため、一桁少数点を移動し、1000g あたり 35g の世界で取り扱う。このときの単位が‰(パーミル)である。‰は、ppt(パーツ・パー・サウザンド)とも呼ばれる。

我々が食事のときに利用する食卓塩は、塩化ナトリウムのみ、あるいはグルタミンソーダを加えた商品であるが、実際の海水にはこれ以外の塩(しお)が溶解している。表 4-1 に示すように、代表的な海水には、塩化ナトリウム、塩化マグネシウムが、硫化マグネシウム、硫化カルシウム、硫化カリウム、炭酸カルシウムと臭化マグネシウムのように、複数の金属イオンと結合した塩分

が含まれる。ナトリウムがしょっぱさを、マグネシウムが苦さ、カルシウムがまるやかさ、カリウムが酸味を決定する。

海水中の塩分濃度の測定にあたっては、海水の電気伝導度を計測し、電気伝導度と水温から塩分濃度を決定する方法が標準である。1980年代までの最も正確な塩分濃度の測定は、標準海水の電気伝導度と比較し、試料の塩分濃度を決定する方法であった。しかし、標準海水の供給に限度があるため、最近では塩化カリウムの標準濃度溶液の電気伝導度を基準に、試料の塩分濃度を決定するようになった(Segar, 2006)。また、海水中に電気伝導度センサーを直接投入し、電気伝導度を計測する方法になってから、パーミルによる表示に代わりプラクティカル・サリニティ・ユニット(PSU)による表示が一般的となった。

海水中の塩化合物	化学式	塩の成分比
塩化ナトリウム(sodium chloride)	NaCl	77.75 %
塩化マグネシウム(magnesium chloride)	MgCl <sub>2</sub>	10.88 %
硫酸マグネシウム(magnesium sulfate)	MgSO <sub>4</sub>	4.74 %
硫酸カルシウム(calcium sulfate)	CaSO <sub>4</sub>	3.60 %
硫酸カリウム(Ppotassium sulfate)	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.46 %
炭酸カルシウム(calcium carbonate)	CaCO <sub>3</sub> と	0.57 %
臭化マグネシウム (magnesium bromide)	MgBr <sub>2</sub>	

### 4-2-2 塩分濃度の空間分布

全球の海洋を考えた時、熱帯域では太陽照射熱にともなう海水の蒸発が盛んなため、海水の塩分濃度が高くなる。これに対して、極域に近い海域では、氷塊の融解水により海水が希釈され、海水の塩分濃度が低くなる。同様に、河川流入水の存在する海域においても、海水の塩分濃度が低くなる。映画のザ・デー・アフター・Tomorrowでは、温暖化が進み、極域の氷が融解し、周辺海域の海水濃度が低下し、これにともない海水の密度が低くなり、表層海水の深層側への沈降が停止し、全球の海水循環が停止し、これによって急激に氷河期へ至る設定となっている。これは、非現実的な設定であるが、塩分濃度は海洋循環へも影響することは事実である。

黒潮のような西岸境界流は、低緯度海域の塩分濃度の高い海水を熱エネルギーとともに高緯度側へ輸送する。一方で、親潮のような寒流は、極域の塩分濃度の低い海水を低緯度側へ輸送する。黒潮は塩分濃度が高く密度が高い一方で、栄養塩が枯渇状態にあり、生物生産性の低い海水である。これに対して、親潮は塩分濃度が低く密度が低いものの、豊富な栄養塩を保持し、生物生産

性の高い海水である。このように、水温と塩分濃度によるエネルギーの伝達に加え、栄養塩の異なる海流が存在し、非常に複雑な海洋を形成している。

### 4-2-3 塩分濃度の深度分布と躍層

海洋の塩分濃度の深度分布に注目すると、水温の鉛直分布と同様に、独特の深度分布を示す。

図 4-3 は、図 4-1 と同様にフィリピン・パナイ島西岸において CTD により計測した水温と塩分濃度の深度分布図である。水温の深度分布に見られるように、0~40m までの表層混合層内では、

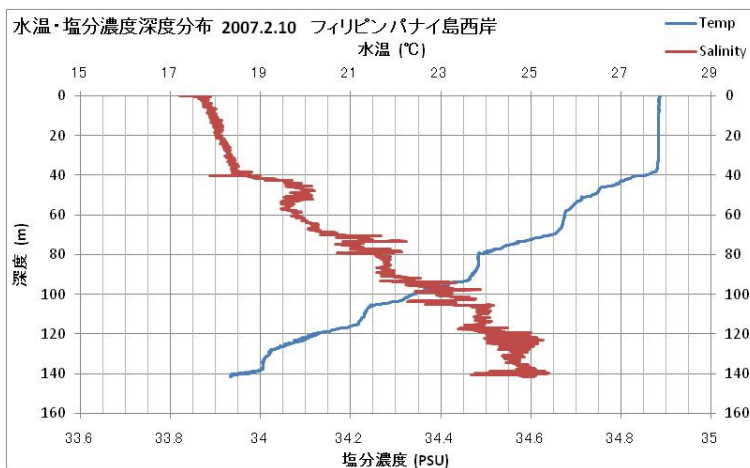
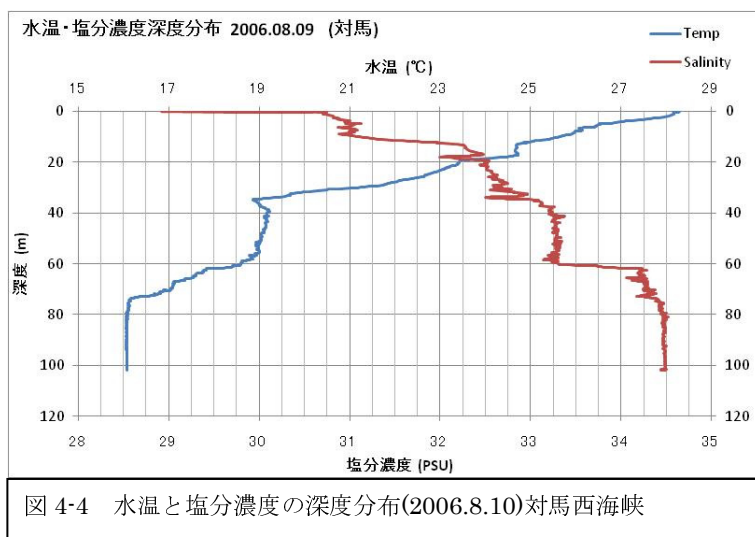


図 4-3 水温と塩分濃度の深度分布(2008.2.10)フィリピン・パナイ島西岸

塩分濃度が 33.863~33.941PSU の値を示した。深度方向の全体からみると水温と同様に表層混合層内ではほぼ同じ塩分濃度を示すが、同じ水温であっても若干塩分濃度の高い海水が表層混合層内の下部側に存在することが分かる。表層混合層の下には、温度躍層(thermo-cline)と同様に塩分躍層(pycno-cline)が存在する。塩分躍層内では、33.941~34.598PSU まで、塩分濃度が上昇している。少なくとも、深度 40m から 140m までは、非常に安定した海水が存在し、表層 40m までが風の影響を受け、鉛直混合が発達していることが分かる。

図 4-4 は、図 4-2 と同様に対馬西海峡において CTD により計測した水温と塩分濃度の深度分布図である。表層の成層に対応するように、塩分濃度も同様に塩分濃度躍層を形成し、表面の 30.684PSU から 40m 深度の 33.206PSU まで塩分濃度が上昇している。40~60m は、水温と同様に一定の塩分濃度を示した。さらに、60m 付近において急激な塩分濃度上昇を示したのち、80m 付近まで徐々に塩分濃度の上昇を示した。

この海域は、黒潮が対馬暖流となる海域であるとともに、長江の流入水ともなう希釈水の影響を受けた東シナ海の海水が流入する海域である。表層側に塩分濃度が低く、密度の低い海水が表層側に存在すると考えられる。



### 4-3 海水温度と塩分濃度の計測

#### 4-3-1 バケツ採水と連続採水

古くから海水を採取する方法としてロープをつなげたバケツによる採水が行われてきた。気象観測指針においてもバケツ採水の項目があるように、国際的にも **Bucket sampling** と呼ばれ、共通の採水方法である。

バケツ採水の際は、バケツを投入後、海水の汲み洗いを2回繰り返し、改めて海水を採取する。海水温度の計測は、気象庁による検定付きの水銀温度計を用いる。採水バケツを、風の影響、あるいは直射日光の当たらないようにし、水銀温度計をただちにバケツの海水中へ入れ、水温を読みとる。

塩分濃度の計測にあたっては、改めてバケツ採水により海水をくみ上げ、採水瓶をバケツの海水で2回ほどとも洗いをした後に、試水として採水瓶へ確保する。

一方、調査船などの移動の間も連続的に海水を計測する連続採水の手法も展開される。船底のシーチェストと呼ばれる採水口からポンプによりくみ上げられる冷却水を利用する。本格的なものは、くみ上げ海水の船内を通る間の温度上昇を極力抑えるため、既存の配管に取水のための分

岐加工を施し、計測へ利用する。一般的な船舶のシーチェストは、生物付着を防止するため、塩素注入などの防止作業を定期的に行っており、計測目的に合わせた利用を考慮する必要がある。

### 4-3-2 CTD 計測

海水温度、塩分濃度の深度方向の計測には、CTD が利用される。CTD は、電気伝導度 (C:conductivity)、水温(T:temperature)、深度 (D:depth) の略である。CTD の利用は、深度方向に連続的に計測するプロファイリング計測と、係留ブイのロープに取り付け時間的に連続的に計測するタイムシリーズ計測との二つの利用方法がある。プロファイリング計測では、CTD に信号ケーブルを直接接続し、船上において CTD の計測値をモニタリングしながら計測するか、CTD をオフラインとし、CTD 内のメモリーに計測値を記録する。いずれの場合も、CTD の高速応答が必要とされ、10Hz 程度のサンプリングにより計測される。

CTD に信号ケーブルを直接接続した計測は、ニスキン採水器を複数取り付けられたロゼッタサンプリングシステムとともに展開される。ロゼッタサンプリングシステムを深度方向へ降ろす過程をダウンキャストと呼び、一定の速度で下降させることから、CTD による連続計測のデータとする。一方、ロゼッタサンプリングシステムを引き上げる過程をアップキャストと呼び、CTD の深度計のデータを見ながら採水深度においてロゼッタサンプリングシステムを停止させ採水作業を行う。

CTD の内部メモリーを利用した連続計測は、信号伝送のためのケーブルを必要としないことから、簡易なプロファイリング計測に利用されるとともに、信号伝送のためのケーブルによる海水汚染を避けるクリーン採水にも利用される。

一方、係留ブイの本体下部、あるいは、係留ロープの途中で CTD を取り付け、時間的に連続の計測を行うタイムシリーズ計測にも CTD が利用される。このようなタイムシリーズ計測は、半年から 1 年間の長期に及ぶものが多く、内部電池の寿命、内部メモリーの容量を考慮し、サンプリング間隔が決定される。係留用の CTD をプロファイリング計測として用いることは困難である。

CTD の多くは、CTD 以外の測器のデータをも取り入れ可能になっており、溶存酸素計(DO)計、分光照度計、波長積分型の照度計、透過度計などの測器と組み合わせ、用途に応じた展開が可能である。

時として無視され易いが、CTD の校正を 1 年間に 1 回ほど実施する必要がある。CTD のいずれのセンサーも経時劣化があるため、校正が不可欠である。校正作業では、校正とともにセンサーの調整の前に校正前係数を求め、センサーの調整後に改めて校正係数を求める。校正前係数は、過去のデータに対して、時系列劣化の補正を施すために利用する。

図 4-5 は、CTD による計測結果の表示例である。計測データは、電気伝導度(C1)、水温(T2)、圧力(P3)、光合成有効照度(PAR4)である。光合成有効照度は 400~700nm の可視光波長領域を積

分した光合成に利用される照度であり、オプションセンサである。深度(dDepth)は、計測圧力(P3)(dBar)方求めた深度(m)である。補正電気伝導度(Ccor)は計測電気伝導度(C1)を補正した値である。塩分濃度(Salinity)は、補正電気伝導度(Ccor)、圧力(P3)、水温(T2)から求めた塩分濃度であり、単位 PSU により与えられる。特定電気伝導度(SpCnd)は、水温 25°Cにおける電気伝導度である。密度偏差(DensA)は、海水密度(kg m<sup>-3</sup>)から 1000(kg m<sup>-3</sup>)を引いた値である。密度偏差は無単位で使われてきたが、最近では kg m<sup>-3</sup> の単位を付ける。

横軸が時間である。乗船直前に CTD を起動し、サンプリング状態にし、計測海域において海水へ投入し、指定深度まで計測後、船上へ回収し、下船後に CTD を停止した。このため、計測の前後に無効なデータが存在する。

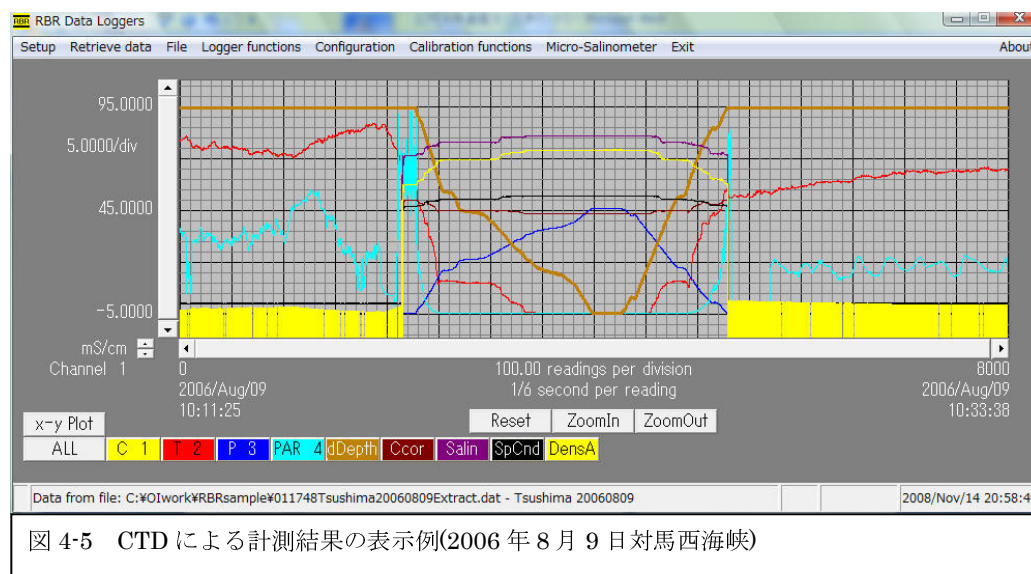


図 4-5 CTD による計測結果の表示例(2006 年 8 月 9 日対馬西海峡)

### 4-3-3 サリノメータ

塩分濃度を決定する方法の一つにサリノメータ(塩分濃度計)を利用する方法がある。このサリノメータは、室温、装置の循環水の水温を一定温度(通常 25°C)に保ち、標準海水あるいは塩化カリウムの標準溶液の電気伝導度と比較し、試水の塩分濃度を求める。計測環境の維持と、電極の定期的な清掃が精度維持のための必要である。

### 4-3-4 XBT

XBT は、Expandable Bathy Thermography の略で、使い捨て式深度-温度計である。熱電対を温度センサーとし、センサーとおもりとが一体化になったプローブを自由落下させる。プローブ



からは1対のエナメル線が繰り出され、船上のラウンチャに接続されたコンピュータにより、水温を読み取る。深度は、プローブの落下速度から推定し、時間の関数として与えられる。

使い捨てであること、安価であること、ある程度の船速であれば航走中でも計測できること、誰でも容易に運用できることから、多くの海洋調査において利用されている。また、貨物船などにXBTラウンチャとコンピュータを搭載し、航海士にXBTのセットと投入を依頼し、計測データを衛星通信で陸上へ伝送するボランティア・シップによる観測ネットワークもある。

#### 4-3-5 XCTD

XCTDは、XBTと同様に使い捨て式のCTDである。XBTへ電気伝導度センサーを組み込んだもので、水温に加え、塩分濃度を深度の関数として計測可能である。XBTと比較すると、高価であり、測点を限定し、XBTと組み合わせて運用される。

#### 4-3-6 アルゴフロート

アルゴフロートは、繰り返し浮沈式の温度・電気伝導度計測装置である。センサーとして水温計、電気伝導度計と深度計を搭載し、電池により駆動するポンプの組み込まれた浮き沈みのための浮体をもつ。アルゴフロートは、パーキング深度と呼ばれるある深さまで計測しながら沈降し、パーキング深度の流れに任せて漂流し、ある期間後に浮上し、メモリー内の計測データを衛星通信回線を経由して地上へ伝送する。

アルゴフロートが漂流し、岸边へ打ち上げられることもあるが、船舶の運用が困難な海域において定常的に運用可能であることから、非常に貴重な観測データが収集されつつある。

## 課題 6 海水温度と塩分濃度の鉛直分布

### 1. サンプルデータ

次のフォルダを D:/TEMP の作業領域へダウンロードする。

教材ディスク/env/asanuma/RBRsample

このフォルダには、次のサンプルデータが含まれる。

011749Panay20080210Extract.dat

011748Tsushima20060809Extract.dat

### 2. RBR プログラムによるサンプルデータの表示

次のフォルダを D:/TEMP の作業領域へダウンロードする。

教材ディスク/env/asanuma/RBR\_CTD

このフォルダには、RBR の CTD により計測されたデータを表示するためのプログラムが含まれる。

rbr6w08.exe

#### ① プログラムの起動

Rbr6208.exe をクリックし、RBR の CTD ファイルを操作するプログラムを起動する。

#### ② ファイルの選択

[File]→[Read a DAT file]からダウンロードしたデータファイルを開く。

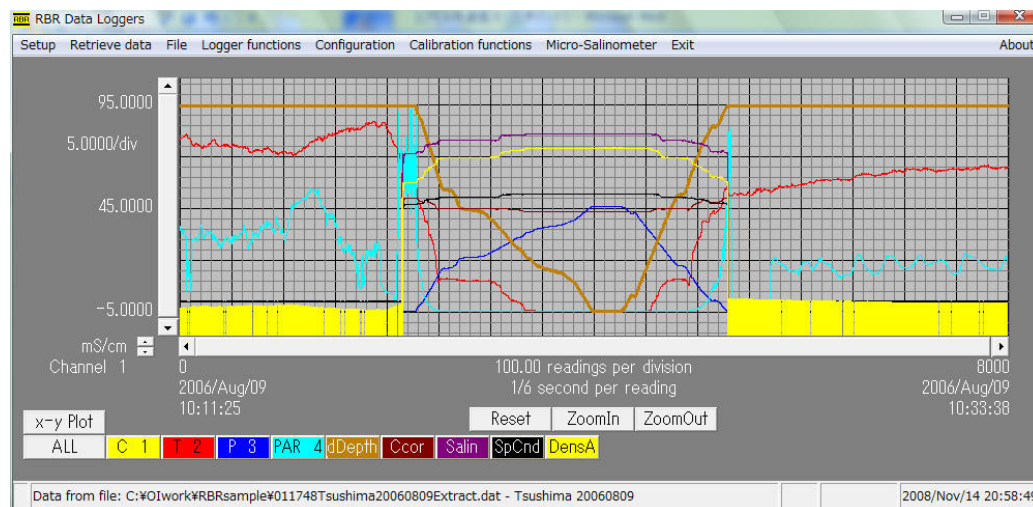


図 4-6 CTD による計測結果の表示例(2008 年 2 月 10 日フィリピン・パナイ島西岸沖合)

3. エクセル操作

- ① エクセルを開き、サンプルデータ(\*.dat)を開く。データは、スペース区切りとし、エクセルへ読み込む。
- ② データのヘッダー部分、計測開始前の無効データ、最も深度の深い部分以降のデータを削除し、サンプルデータを編集する。海面から最も深い部分までのダウンキャスト(下向きの計測)を選択する。
- ③ 挿入から散布図を選択する。第1横軸(X軸上側)に水温、第1縦軸(Y軸左側)に水温の深度、第2横軸(X軸下側)に塩分濃度、第2縦軸(Y軸右側)に塩分濃度の深度を設定する。

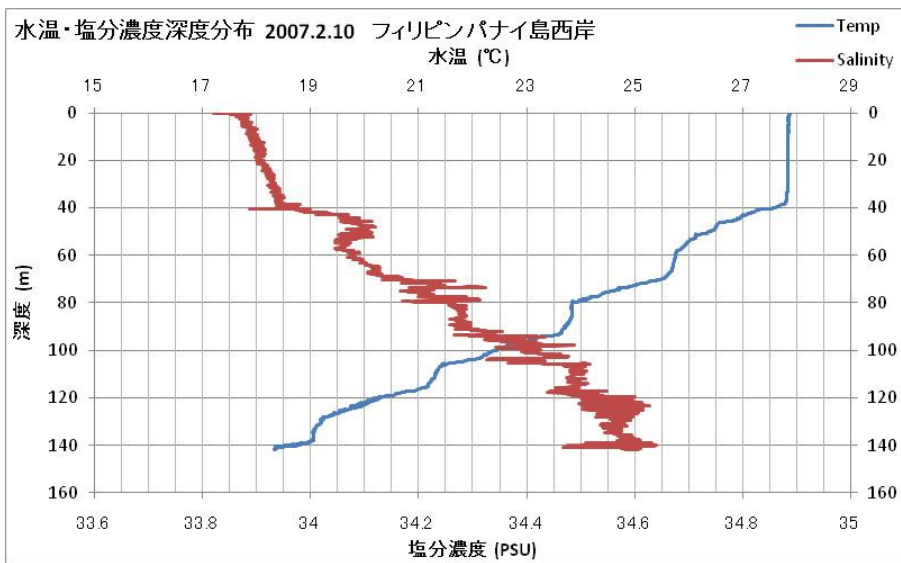


図 4-6 CTD による水温と塩分濃度の深度分布(2008年2月10日フィリピン・パナイ島西岸沖合)

4. パワーポイントへの貼り付け

2 の CTD の計測結果と、3 のエクセルによるプロファイルの図をセットとし、パワーポイントへ貼り付け、提出せよ。