

## 2 水温と塩分の鉛直構造

海面付近の海水は太陽放射によって暖められ、また、風や波によってよく混合されている。このため、水温が高く、上下の温度差が小さい。一方で、深海の水は一般に低温であることが多い。実は、海洋の鉛直構造を考えるとときには水温だけでなく塩分の変動にも注目する。海水の密度は水温だけでなく、塩分によっても変化するからである。塩分は、降水や蒸発などの影響で変動する。そこで、海水の水温と塩分に着目して海洋の鉛直構造を論じる。

### 2. 1 海水の塩分

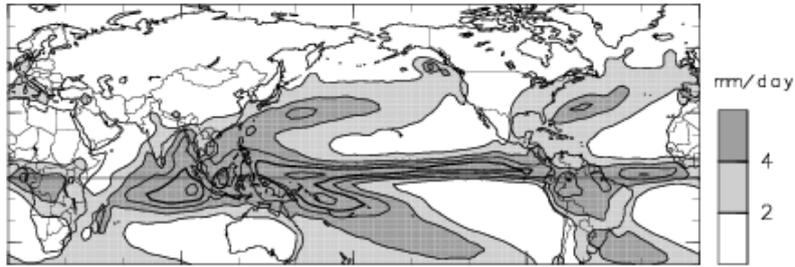
海水には、**塩化ナトリウム**(sodium chloride) (食塩の主成分) や**塩化マグネシウム**(magnesium chloride) (にがりの主成分) などの塩 (えん) が溶けている。海洋学では、海水 1 kg に溶けている塩の質量[g]を**塩分(salinity)**として定義するのが基本である。単位としてはパーミル‰ (千分率) を用いる。ここで、塩とは、塩化ナトリウムに限定せず、溶解している塩すべてを指す。学術研究では、塩分の単位として **psu (practical salinity unit)** を用いることが多い。これは、**電気伝導度**(electrical conductivity) を測定して塩分の値に変換してものである。近年では海水の塩分は電気伝導度計による測定が主流である。psu は実用的にはパーミルと同等の単位とみなしてよい。実際の海水の塩分は 32~38 psu 程度の値を取ることが多い。なお、生理食塩水は 0.9% (=9‰) の塩化ナトリウム水溶液である (ただし、濃度は重量パーセントではなく重量体積パーセントで定義されている)。

海水中の主要なイオン

イオン	存在量[g/kg]
ナトリウムイオン Na <sup>+</sup>	10.8
マグネシウムイオン Mg <sup>2+</sup>	1.3
カルシウムイオン Ca <sup>2+</sup>	0.4
カリウムイオン K <sup>+</sup>	0.4
塩化物イオン Cl <sup>-</sup>	19.4
硫酸イオン SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.7

熱帯収束帯付近や中高緯度のストームトラックのように、蒸発に比べて降水の多い海域では、海面付近で塩分の低い水が生成されることが多い。一方、亜熱帯高圧帯のように、降水に比べて蒸発の多い海域では、塩分の高い水が生成されやすい。このように、現実の海洋では塩分は変動するが、上の表で示した

ような塩の組成はほとんど変化しない。

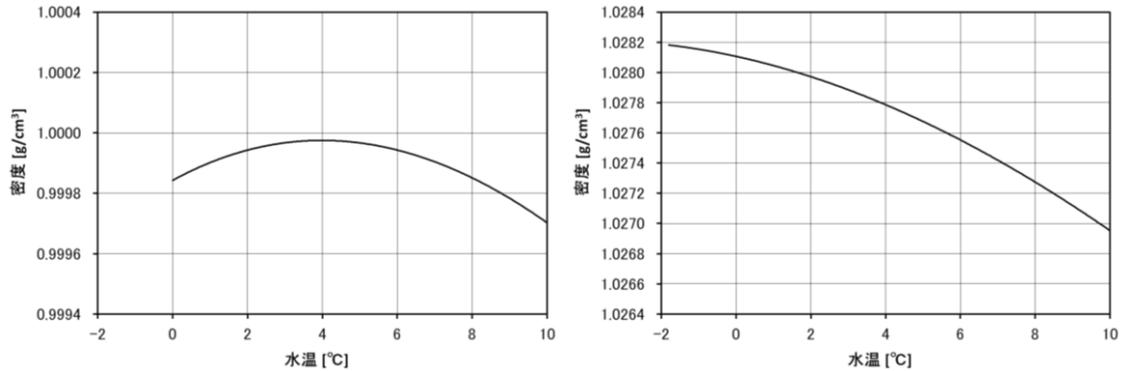


(CMAP データを用いて作成)

年平均した降水量

## 2. 2 海水の密度

海水の密度は水温だけでなく、塩分にも依存する。一般に塩分が多いほど密度は高くなる。真水と海水について、温度変化に伴う密度の変化を計算すると以下のようなになる。真水は 4°C 付近で密度が最大になるが、海水は低温になるほど密度が高くなる。なお、海水は塩分を含むため、**凝固点降下**(freezing-point depression)により凝固点が 0°C より低くなっている。平均的な塩分の海水の場合、凝固点は -1.8°C 程度である。

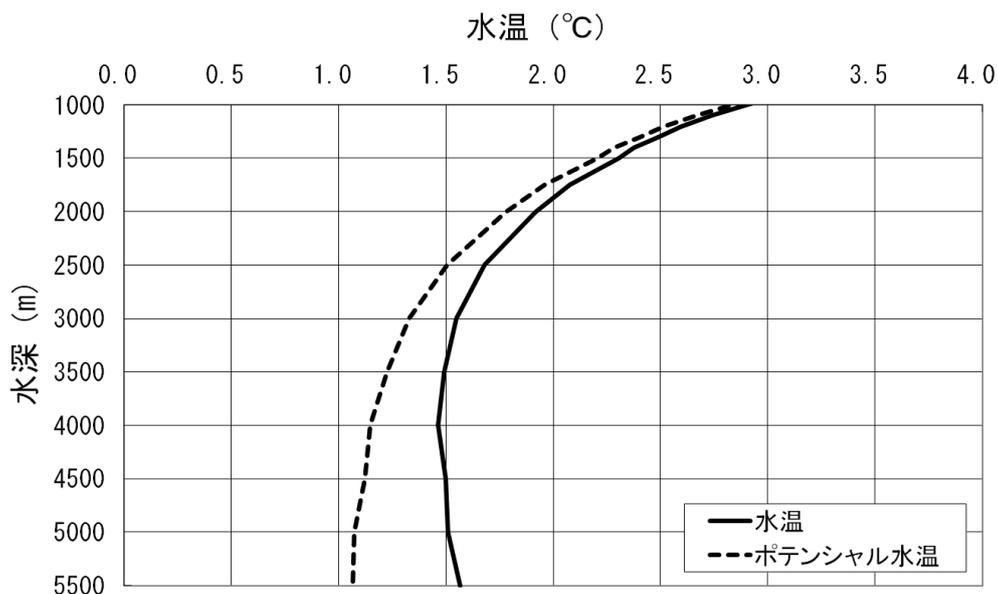


真水 (左) と海水 (35 psu) (右) の密度

大気の場合と同様、海洋物理学においては、海水の密度成層に注目することが多い。真水の密度はほぼ  $1000 \text{ kg/m}^3$  であり、海水の密度は  $1020 \sim 1030 \text{ kg/m}^3$  である。海水の密度は、真水と比べてせいぜい 3% 程度の差しかない。このため、海洋物理学では、密度 [ $\text{kg/m}^3$ ] の値から 1000 を差し引いた値を  $\sigma$  (シグマ) とよんで、密度の指標としている。たとえば、 $1025 \text{ kg/m}^3$  であれば、 $\sigma = 25$  である。

海水の密度は、水温と塩分の関数である。しかし、厳密に言えば、水にも圧

縮性があるので、海水の密度は、水温、塩分と圧力の関数である。圧力変化に伴って密度が変化するときには、大気の場合と同様に、断熱圧縮、断熱膨張によって水温が変化する。したがって、密度成層を考えるとときには、圧力を一定にしたうえで密度を比較しなければならない。そこで、気象学で温位を定義したのと同じように、海洋物理学においても**ポテンシャル水温（温位）** (potential temperature) を定義する。大気においては基準となる気圧は 1000 hPa とすることが多いが、海洋においては海面を基準とする。ただし、水深数千メートルの深海を除けば、断熱圧縮に伴う温度変化はわずかであり、ポテンシャル水温は水温にほぼ等しいとみなせる。深海においては、ポテンシャル水温のほうが水温よりも低い値をとる。下の図のように、下層のほうが水温が高くなることもあるが、そのような場合であってもポテンシャル水温は下層で低くなっていて、密度成層が保たれている。圧力をゼロとみなして、水温（現地水温）と塩分から算出した密度を  $\sigma_t$  と表す。一方、ポテンシャル水温と塩分から計算した密度（断熱膨張させながら海水を海面まで持ち上げたときの水温）を  $\sigma_\theta$  と表し、**ポテンシャル密度** (potential density) という。



(World Ocean Atlas を用いて作成)

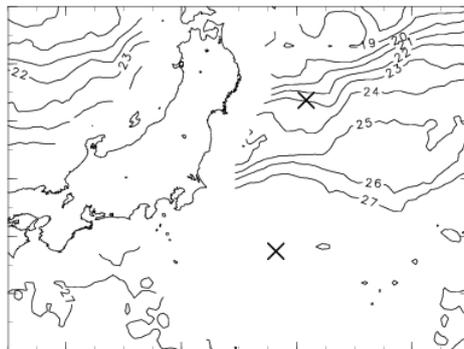
水温とポテンシャル水温の鉛直分布の例

### 2. 3 海水の鉛直構造と水塊

海水の水温と塩分の鉛直構造の観測例を下の図に示す。気象学で気圧座標を用いたのと同じように、海洋物理学においても鉛直座標として圧力を用いることが多い。1 db (デシバール) = 100 hPa  $\approx$  1 m である。

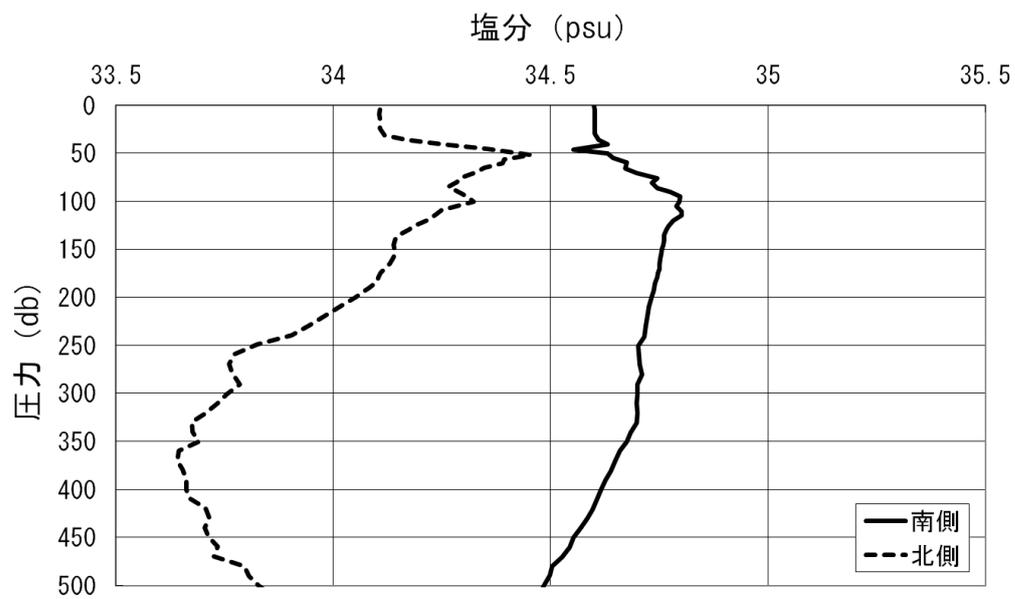
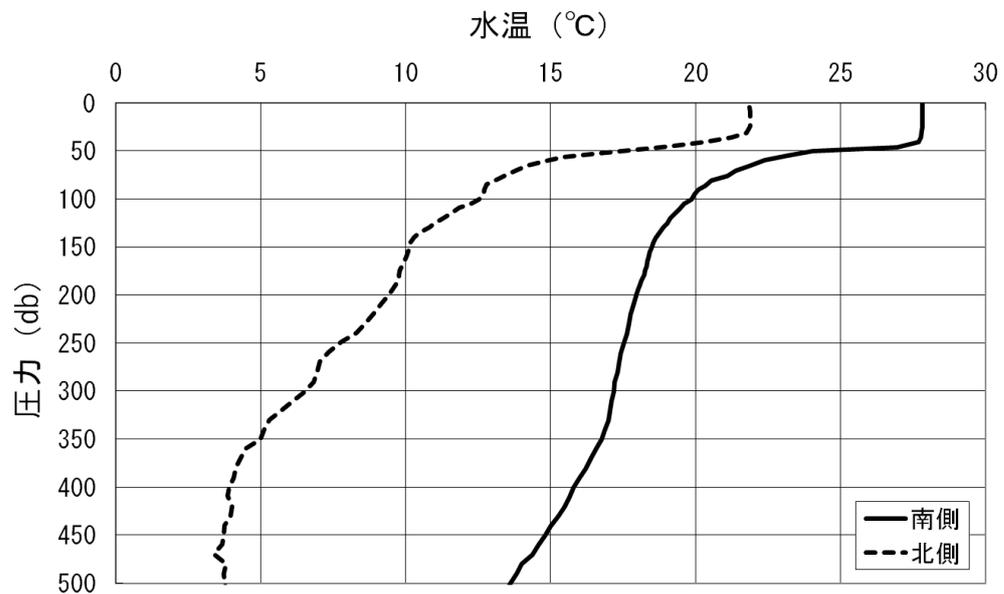
海面の近くでは、海水が太陽放射によって暖められるので、水温が高い。また、風や波によってよく混合されるので、上下の温度差が小さい。この層を**混合層(mixed layer)**という。冬季は海上風が強だけでなく、大気の熱交換によって冷却された海水が沈みこむので、混合層は厚くなる。混合層の下では深さとともに急激に水温が低下する。この層を**水温躍層 (温度躍層) (thermocline)**という。

一般に、水温が低いほうが、また、塩分が高いほうが海水の密度は大きくなる。通常、海水が不安定成層になることはなく、密度（またはポテンシャル密度）は下層ほど大きくなっている。以下に、黒潮続流の南側と北側での観測例を示す。



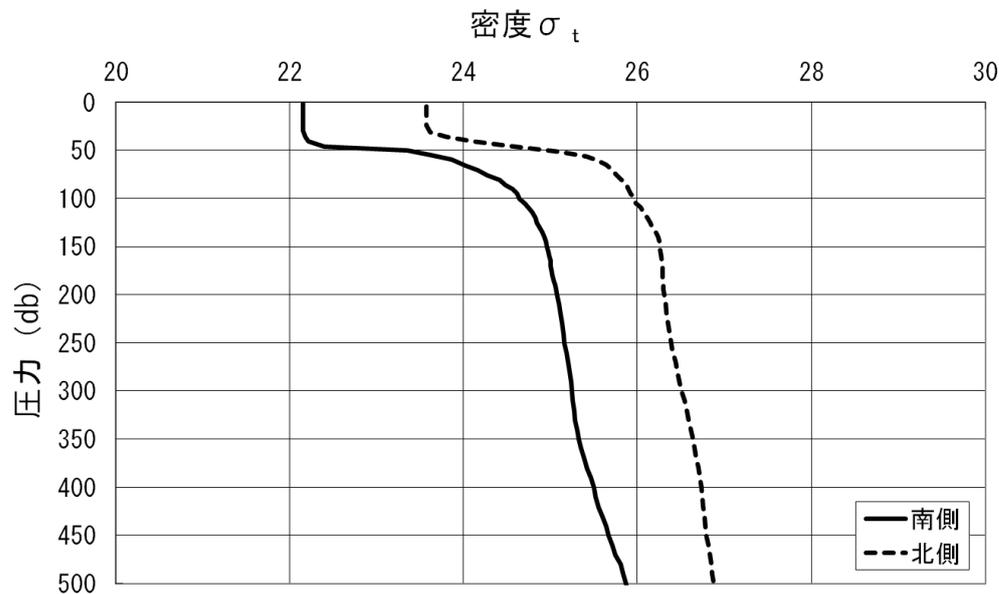
(WindSat による観測データを用いて作成)

観測点と人工衛星によって観測された海面水温の分布 (9月)



(アルゴフロートによる観測データを用いて作成)

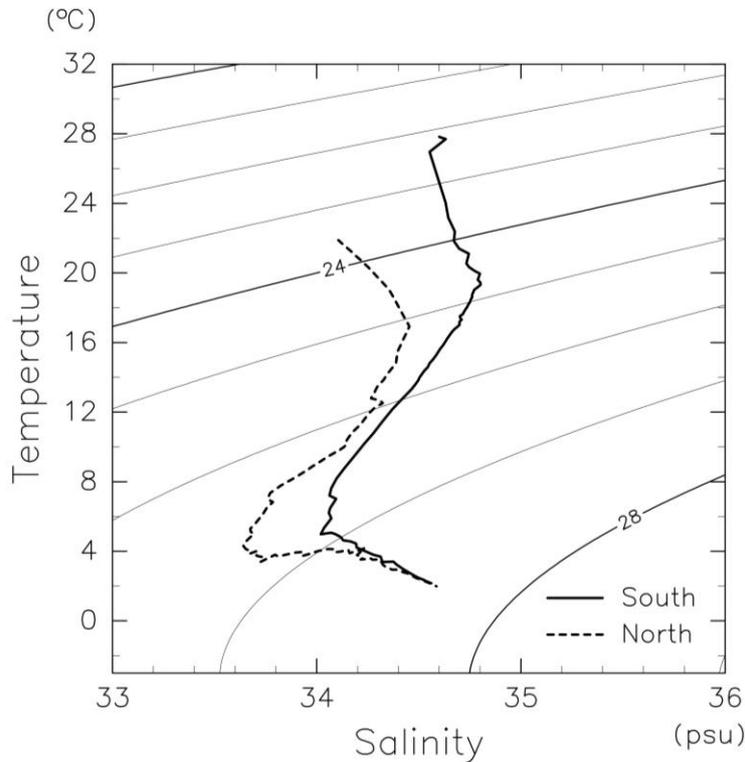
水温（上）と塩分（下）の鉛直分布の観測例  
 （黒潮続流の南側と北側、9月）



上の水温、塩分の観測データから計算した密度  $\sigma_t$

特定の水温、塩分をもった海水の集まりを**水塊(water mass)**という。水塊は、気象学における気団に相当する。たとえば、上の図で、黒潮続流の南側では水深 150~350 db 付近で水温が 17~18°C 程度のほぼ一定値を示している。この層は、冬季に北西季節風によって海面が冷やされてできた深い混合層の名残りである。この海域では、冬季の活発な鉛直混合によって、このような水温、塩分をもつ水塊が多量に生成されている。このように特に多く存在する水塊を**モード水(mode water)**という。黒潮／黒潮続流のすぐ南側の海域で生成されるモード水を**亜熱帯モード水(subtropical mode water; STMW)**、あるいは**北太平洋亜熱帯モード水(North Pacific subtropical mode water; NPSTMW)**とよんでいる。

水塊を調べるためには、**T-S ダイアグラム (TS 図) (T-S diagram)**が (TS 図) しばしば用いられる。T-S ダイアグラムは縦軸に水温、横軸に塩分をとり、水温と塩分の鉛直分布をプロットしたものである。等値線は密度  $\sigma$  の値を示している。同じ水塊の海水は、鉛直方向に移動して水温や塩分の鉛直分布が変化しても、加熱、冷却や混合が起これなければ、T-S ダイアグラム上でのプロファイルは変化しない。このため、T-S ダイアグラムは水塊の同定に用いることができる。水塊は徐々に混合されていくが、密度成層の影響で、混合は等密度面上で進みやすい。



T-S ダイアグラムの例（黒潮続流の南側と北側、9月）

上の図では、亜表層に塩分の極大があり、中層に塩分の極小がみられる。塩分の極大は、とくに黒潮／黒潮続流の南側で顕著であるが、これは北太平洋亜熱帯モード水に対応している。一方、中層の塩分の極小は、**北太平洋中層水(North Pacific intermedeate water; NPIW)**に対応している。北太平洋中層水は、低温、低塩分の親潮系の海水の影響を受けて生成されている。

- 課題 2.1** ①以下の3つの観測データについて、T-S ダイアグラムを作成せよ。3つの観測データそれぞれについて、水温と塩分との関係を折れ線で示し、3つの折れ線を1枚のT-S ダイアグラムに重ねて作図せよ。
- ②海面付近以外で温度の鉛直勾配が逆転している層があれば指摘せよ。さらに、T-S ダイアグラムを用いて、その層で密度成層がどうなっているか述べよ。
- ③3つの観測データは、いずれも東経 146 度付近で得られたものである。データ1は、北緯 26 度付近での9月の観測データである。データ2と3のうち、一方は、北緯 26 度付近での3月の観測データ、もう一方は、北緯 37 度付近での9月の観測データである。T-S ダイアグラムを用いて、データ2と3のうち、どちらが北緯 26 度付近での3月の観測データであるか判定せよ。

データ 1 (北緯 26 度、9 月)			データ 2			データ 3		
圧力 [db]	水温 [°C]	塩分 [psu]	圧力 [db]	水温 [°C]	塩分 [psu]	圧力 [db]	水温 [°C]	塩分 [psu]
9.5	29.065	34.598	9.1	23.457	34.071	10.4	22.132	34.834
19.2	29.066	34.598	19.4	23.459	34.071	19.8	22.040	34.837
39.4	27.645	34.763	39.5	19.652	34.337	40.1	21.807	34.819
59.4	24.522	34.932	59.1	16.283	34.494	60.2	21.444	34.785
99.6	21.828	34.782	99.6	14.052	34.513	100.3	20.648	34.729
149.6	19.600	34.742	139.2	12.431	34.402	150.6	19.175	34.775
199.5	18.101	34.748	199.2	8.731	33.998	200.3	18.130	34.761
249.1	17.394	34.748	248.9	6.174	33.781	250.3	17.104	34.730
299.4	16.680	34.713	299.2	5.224	33.785	300.0	16.390	34.687
349.2	15.709	34.641	349.0	5.730	33.985	350.0	15.400	34.615
399.2	14.570	34.554	399.1	4.661	33.901	400.2	13.851	34.500
449.5	13.324	34.461	449.0	4.157	33.942	450.1	12.525	34.400
498.9	11.985	34.362	499.5	3.966	34.013	499.9	11.296	34.318
598.9	8.660	34.144	549.1	4.329	34.138	599.0	8.698	34.150
699.2	6.520	34.064	599.5	4.081	34.172	699.6	6.518	34.085
799.3	5.126	34.119	749.3	3.304	34.242	800.3	5.207	34.123
899.3	4.301	34.237	898.9	3.339	34.368	897.4	4.483	34.207

(アルゴフロートによる観測データを用いて作成)

注意：上のデータは、練習問題として利用するために間引いてある。実際の鉛直分解能はこれよりも細かい。