

黒潮一親潮混合水域における水理環境と栄養塩分布

：2014年7月の事例解析

2024年3月31日

北海道大学大学院水産科学研究 大木淳之

コメント：課題研究では、初っ端のテーマ探しが一番苦労すると思います。レポートを書くにしても、初めてだと、何から記せばよいか分からないでしょう。そんなときは、過去の研究やレポートを真似すればよいです。そんな人のために、「海洋のオープンデータでサイエンスを始めよう」の課題研究レポートのひな型を作りました。これを原形として、一般の高校生が課題研究のレポートを仕上げることを目的としています。本ひな型と同じ年月のデータを、より深く解析するのでもよいし、別の年月のデータを同様に解析して、年ごとの違い、毎年共通点を探すのもよいでしょう。ほんの小さな事柄でもよいので、執筆者(あなた)独自の発見やアイデアが盛り込むとよいです。その点が、あなたの研究論文の独創的な部分(オリジナリティ)になるので、そのことを論文で主張しましょう。このレポートひな型では、まず、東北沖太平洋に設定した南北ライン(A-Line)の観測結果(水温、塩分、密度)を南北鉛直断面のカラーコンター図にして、全体像を視覚的に捉えることにしました。水温については、気象庁HPより当該年月の水平分布図が提供されています。気象庁の図も参考にしながら、水がどのように移動していたのかを解釈することができます。しかし、水温以外の塩分や生化学パラメタ(栄養塩やクロロフィルa)について、気象庁より水平分布の提供はありません。A-Lineの観測結果から、あなたが独自に解析をして理解を深めてください。解析するポイントを探す際には、まず、複数パラメタの鉛直断面のカラーコンター図を並べて見て、共通する特徴、異なる特徴、面白そうな特徴を見出してください。そうしたら、その特徴を鮮明に炙り出すのに必要な図や表を独自に作るとよいです。何かを基準とした平均値(例えば、表層水中の平均、暖水塊や冷水塊での平均など)をとって、特徴を数値で表すのもよいです。ただし、これらの特徴を解釈するには、海洋学の知識が必要になります。「LASBOS」サイトの海洋学コース(<https://repun-app.fish.hokudai.ac.jp/course/view.php?id=457>)などを利用して学んでください。

1. はじめに

日本列島東北沖の太平洋では、北に位置する亜寒帯海域から南下してくる親潮系水と、南に位置する亜熱帯海域から北上してくる黒潮系水がせめぎあっている。親潮と黒潮が混ざる海域なので、「親潮黒潮混合水域」や「親潮黒潮移行水域」と呼ばれている。このような場所では、植物プランクトンによる基礎生産が豊富であることが知られている。基礎生産が豊富であることから、高次捕食者の動物プランクトンから大型魚類までが多く生息し、豊かな漁場を形成することでも知られている。表層への栄養塩供給が植物プランクトンの生産性に影響を与えるならば、その供給パターンがどのように決まっているのか。気候変動が栄養塩供給にどのような影響を与えるのか、それが海洋生態にどのような影響を与えるのかを知る必要がある。国立研究開発法人水産研究・教育機構では、1987年にこの水域にモニタリング定線（Aライン）を設置し現在まで観測を行ってきている。本研究では、Aラインモニタリングの公開データを利用して、2014年7月の海洋環境の特徴を把握することを目的とした。水温・塩分・密度から水理環境を把握して、親潮系水と黒潮系水の影響範囲を調べた。主要栄養塩の硝酸塩、光合成色素のクロロフィルaを用いて、植物プランクトン分布を決める要因を調べた。

【コメント】

「はじめに」に記す内容は、(なるべく) 全て、引用文献を記すべきです。まずはインターネットサイトでもよいですが、インターネットサイトの中でも、気象庁や海上保安庁海洋情報部、水産庁などの公的機関のサイト情報がよいでしょう。海洋学を学ぶ際には、北海道大学のLASBOSも利用してください。より良いのは、教科書や学術書、学術論文にあたることです。自ら学術情報を探すには、「J-stage」サイトにて、例えば「親潮 黒潮 Aライン」で検索してみてください。すると、検索結果のトップに、「フィールドステーションの紹介：親潮モニタリング観測ライン(A-ライン) (津田敦)」がヒットします。この論文のPDFをダウンロードしましょう。

「はじめに」が充実した論文は、素晴らしいです。あなたの関心事(※地球温暖化や水産資源変動など)も加えてイントロダクションを記すのもよいでしょう。

※関心事との関連の例： 地球温暖化が進行すると、混合水域での水理環境がどのように変わり、海洋生態系にどのような影響を与えるのか。水理環境が変わると、水産資源魚類の回遊ルートに対して、どのような影響を与えるのか。ある水産資源種について、年々減る傾向、もしくは増える傾向があるとすれば、海洋環境との関わりがあるのか。マイクロプラスチックの移動は、基本的に水の流れに支配されます。マイクロプラスチックは、どのように移動し、どのような場所に集積するのか。深海魚が棲む環境を詳しく知りたい！ 単に、自然環境の仕組みを深く知りたい！ など。

2. 手法

国立研究開発法人水産研究・教育機構では、調査船の若鷹丸（母港：宮城県塩釜港）と北光丸（母港：北海道釧路港）の調査航海により、毎年およそ4回、北海道厚岸沖から北緯39度まで、南東に向かう観測定線（Aライン）でモニタリングを継続している。Aラインの観測点を図1に示す。本研究では、2014年7月にAラインモニタリングで得られた観測データ（国立研究開発法人水産研究・教育機構）を利用した。Aラインモニタリングに関する論文（Reference）より、その観測手法を以下にまとめた。

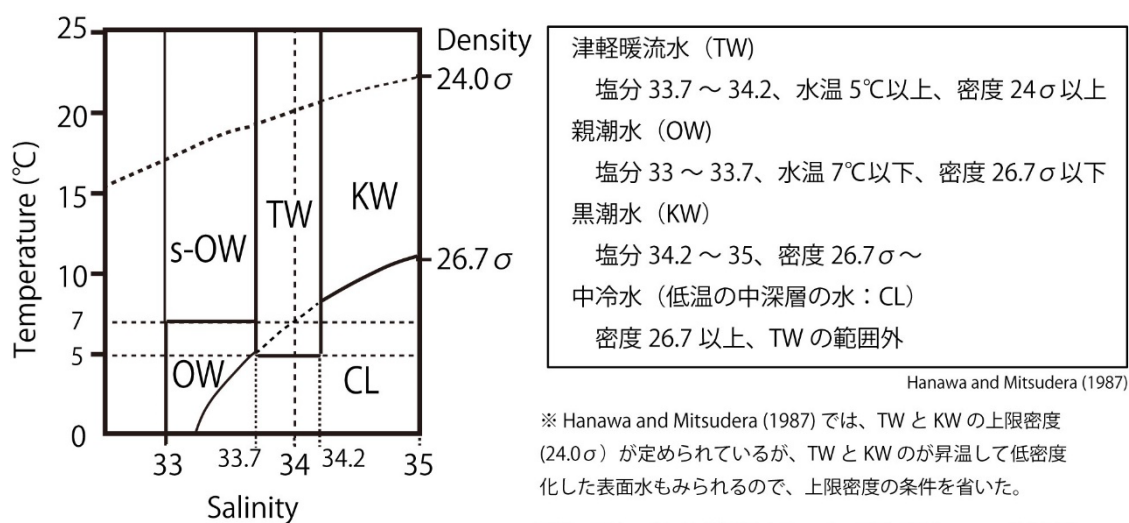
2-1. 水理環境の調査と水塊区分

CTD 観測

海水の起源や履歴（太陽放射加熱や冷却、蒸発、淡水流入）を特徴づけるのが水温と塩分である。例えば、亜寒帯の親潮系水は、塩分34未満で比較的低水温である。亜熱帯の黒潮系水は塩分34以上で比較的高水温である。水塊は亜寒帯水と亜熱帯水で大別される。海水が鉛直的に混ざることの特徴づけるのは密度であり、これも水温と塩分で決まる。したがって、水理環境の調査では、調査船からCTD（Conductivity-Temperature-Depth）センサーを海面から降下させて、水温と塩分を計測する。なお、塩分は電気伝導度（Conductivity）から計算される。

水塊区分

東北沖の親潮黒潮混合水域には、亜寒帯系水の親潮に派生する冷水塊と、亜熱帯系水の黒潮続流に派生する暖水塊が移動してくる。黒潮続流とは、南方から北上してきた黒潮が千葉県沖で向きを変え、東進する流れのことである。また、黒潮分岐の対馬暖流が津軽海峡を抜けて出て、東北沖で津軽暖流水に由来する暖水塊を形成することがある。これらの水塊は表層 0~300 m 程の厚さを持つ渦を成しており、それ以深には深層水の影響を受けた中冷水（中層にある冷水）が存在する。これらは、それぞれ特徴的な水温と塩分範囲で分けられる（図 2）。



黒潮 - 親潮移行領域（東北沖）
の水塊区分

図 2 東北沖太平洋の黒潮親潮以降領域（混合域）における水塊区分

混合層深度

海洋表面からある水深まで、鉛直的に水が混合している層を表層混合層という。混合層は密度が一様な層として定義される。なお、混合した結果、密度が一様になると考えればよい。海洋表層の水深 10 m の密度 ($X_{10m} \sigma$) を基準として、その基準密度に対して、0.125 σ 上昇する水深までを混合層とする。その水深のことを、混合層深度という。本来、表面 0 m の密度を基準とすべきとも考えられるが、海洋表面水の密度は蒸発や降水の影響で大きく変動しうるから、もう少し深い所の安定した密度を基準とする。なお、混合層内で水が十分な速さで混合しているのであれば、水温や塩分のほか、生物化学パラメタ（栄養塩やクロロフィル a 濃度など）も鉛直一様になることが多い。

(塩分単位の説明：本来、海水の密度は g cm^{-3} (kg m^{-3}) の単位で表される。真水の密度は、 1.00 g cm^{-3} で、塩類を含む海水の密度は $1.025\sim 1.028 \text{ g cm}^{-3}$ 程度である。世界中、どの海水でも、密度の数値は小数点第一位まで“1.0”で変わらない。毎度、1.0 を記すのが煩わしいので、 g cm^{-3} (kg m^{-3}) の単位に 1000 を乗じて、1000 を差し引いた値、25~28 を海水の密度として表す。その際の便宜的な単位として σ を用いる。つまり、 25.9σ であれば、 1.0259 g cm^{-3} である)

【コメント：海洋観測手法について、より詳しいことを記したければ、LASBOS サイトの海洋観測手法 (<https://repun-app.fish.hokudai.ac.jp/course/view.php?id=467>) を参照するとよいです】

2-2. 生物化学パラメタの分析

海洋観測では、CTD 採水装置に海水を採取するボトル（ニスキンボトル）を 12~24 本取り付け、CTD 装置を海中に降下させる。その装置を上昇させるときに、任意の水深でボトルの上下蓋を閉じて海水を採取する。ニスキンボトル中の海水を、各分析のための採水ボトルに分取する。

クロロフィル a 濃度の測定

光合成色素のクロロフィル a 濃度は、海水中の植物プランクトン量の多少を表す指標となる。海水 100 mL をガラス繊維ろ紙（Glass Fiber /Fine フィルター：GF/F）でろ過し、ろ紙を溶媒抽出液のジメチルホルムアミド 6 mL に浸した。蛍光光度計（ターナー社製）でクロロフィル蛍光を計測して、蛍光値からクロロフィル濃度に換算した。濃度単位として、 $\mu\text{g L}^{-1}$ を使う。

栄養塩濃度の測定

海洋の植物プランクトンの生長に対して不足しがちな栄養成分の代表は、硝酸イオン、リン酸イオン、ケイ酸イオンである。これら栄養塩を比色法により分析した。海水試料に発色試薬を混ぜて、各栄養成分の濃度が高ければ、より濃く発色する。その色（ある吸収波長）の濃さ（吸光度）を分光光度計で測定した。濃度単位として、 $\mu\text{mol L}^{-1}$ を使う。

3. 結果と考察

3-1. 水理環境

3-1-1. 水温・塩分・密度の鉛直南北断面

2014年7月のA-Line観測における、水温、塩分、密度の南北鉛直断面(0~200 m)を図3(a), (b), (c)に示す。図2の水塊区分の水温塩分範囲に従って、黒潮系水(KW)、津軽暖流水(TW)、中冷水(CL)を図中に追記した。これらの水塊以外は親潮系水(OW)に属する。なお、北緯39の0~100 m付近の水で見られたTWとされる水塊については、後述するように、黒潮水と親潮水が混ざった水の可能性がある。そのため、図中で括弧付きで表示した。

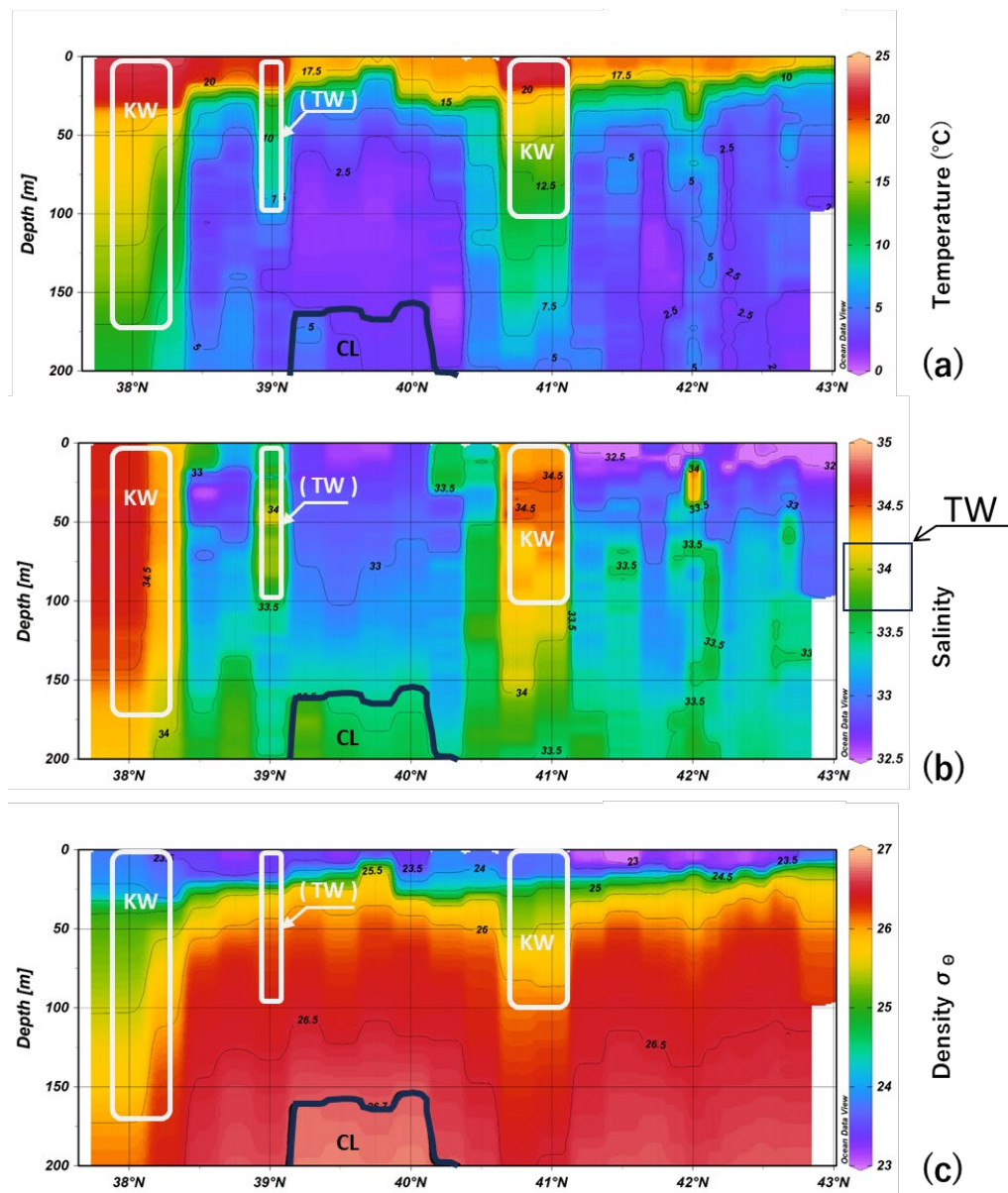


図3 A-Lineにおける水温(a)、塩分(b)、密度(c)の南北鉛直断面図。KW: 黒潮系水、TW: 津軽暖流水、CL: 中冷水

3-1-2. 表層水温の水平分布 (気象庁解析データ)

気象庁ホームページでは、表面、水深 50 m、100 m、200 m、400 m の水温分布の解析結果を公開している。2014 年 7 月中旬 10 日間平均の水温分布図を入手し、A-Line モニタリングの観測線 (赤太線) を加えた (図 4)。

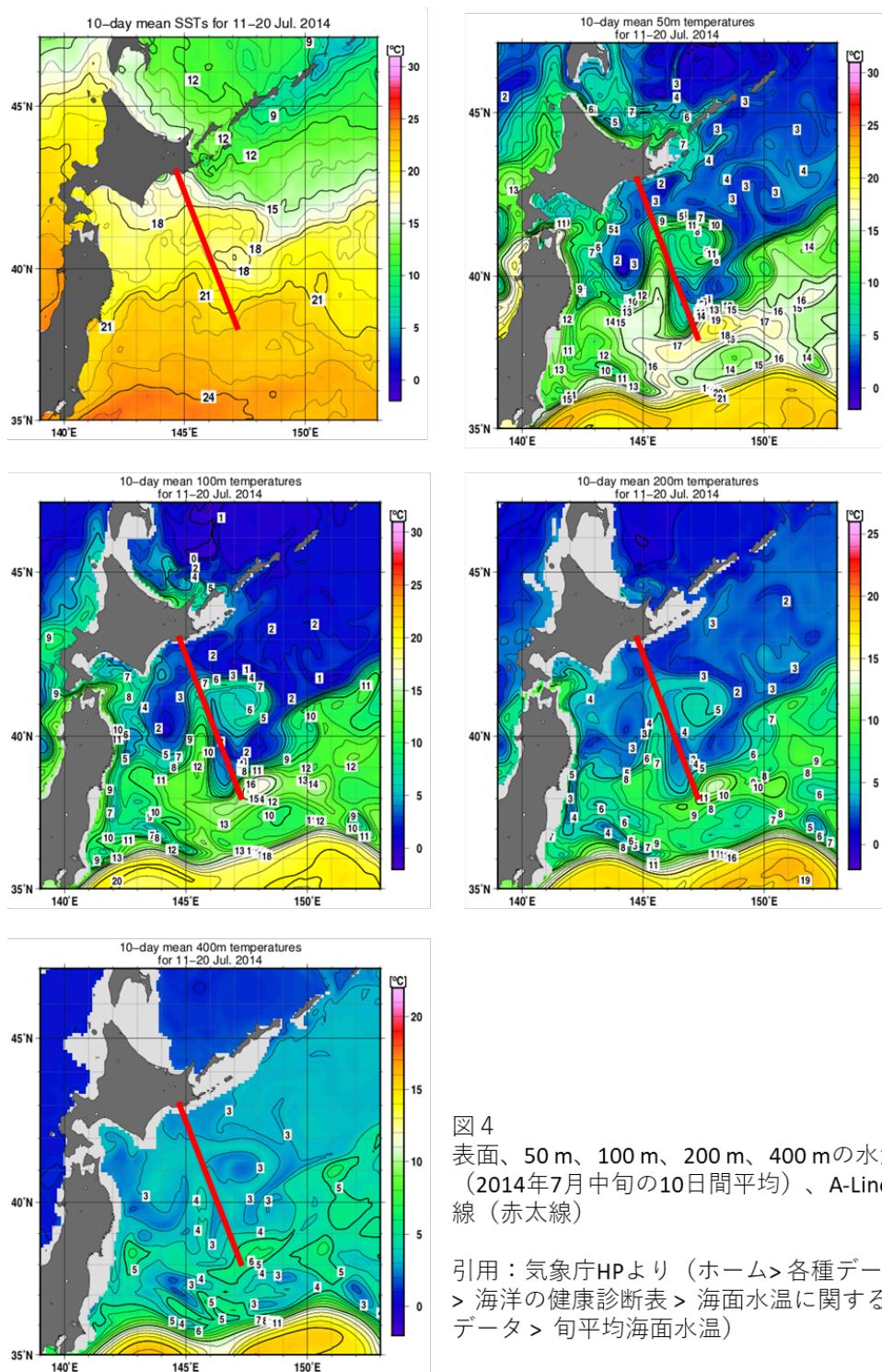


図 4

表面、50 m、100 m、200 m、400 m の水温分布 (2014年7月中旬の10日間平均)、A-Lineの観測線 (赤太線)

引用：気象庁HPより (ホーム> 各種データ・資料 > 海洋の健康診断表 > 海面水温に関する診断表、データ > 旬平均海面水温)

3-1-3. 南北鉛直断面と水平分布の比較

図4の表面水温分布によると、高水温帯が一様に広がっている様子が見られる。しかし、図3(a)の水温鉛直断面をみると、高水温が広がっているのは表層水に限られていることがわかる。高水温帯の直下（水深50m付近）では、水温の南北分布は不連続に大きく変化している。水温分布と塩分分布を見比べると、高水温の場所では高塩分、低水温の場所では低塩分であることがわかる。図2の水塊区分よりより、高水温・高塩分の場所は黒潮水(KW)と判別されている。それ以外の低水温・低塩分の場所は親潮水(OW)である。OWと判別された場所の表層には、亜寒帯特有の低塩分水が覆っており、その表層水が太陽放射加熱でやや高水温(17℃ほど)になったことが考えられた。

水深50と100mの水温水平分布(図4)より、東経146~148度、北緯40~42度に高水温の大きな塊(暖水渦)が見られる。また、その大きな塊から、暖水が帯状に南方へ延びている(東経145~146度、北緯39~42度)。この暖水帯は黒潮続流に派生する渦が北上したときに発生したものと思われた。したがって、図3の北緯39度に見られた高水温帯(図中では(TW)と記載)は、太平洋を北上してきた暖水渦に一致するので、これを津軽暖流水と定めるのは不適切であり、黒潮水(暖水塊)と親潮水が混ざった水と考えられた。

【コメント：以上、水理環境について、かなり詳しく結果と解釈を説明してきました。研究課題の目的によっては、ここまで詳しく記さなくてもよいでしょう。】

3-2. 生物化学パラメタ

3-2-1. クロロフィル a と硝酸塩濃度の南北鉛直断面

2014年7月のAラインモニタリングにおける、クロロフィル a (図 5a) と硝酸イオン (図 5b) の濃度の南北鉛直断面図に示す。黒潮水 (KW) と中冷水 (CL) の水塊区分を太線枠で追加した。光合成色素のクロロフィル a は、表層 50 m 以浅で 0.4 $\mu\text{g/L}$ 以上の高濃度が見られた。十分な太陽光が 50 m 付近まで届くことが理由と思われる。北緯 38 度や 41 度では、表面付近のクロロフィル a 濃度が低いことがわかった。いっぽう、中冷水 (CL) が水深 150 m 付近まで上昇している場所 (北緯 39~40 度) にて、表面付近までやや高い濃度のクロロフィル (0.4 $\mu\text{g/L}$) が見られた。最も北 (北緯 43 度) に位置する北海道沿岸では、0.8 $\mu\text{g/L}$ を超す高濃度のクロロフィルが見られた。海水中の硝酸イオンの鉛直断面図と比べてみると、表面で硝酸イオンの濃度が低い所で、表面のクロロフィル濃度が低い傾向が見られた。逆に、北緯 39.5 度では、水深 20 m に高濃度のクロロフィル極大 (1.3 $\mu\text{g/L}$) と高濃度の硝酸イオン (14 $\mu\text{mol/L}$) が見られた。光が届くような表層 (およそ 50 m まで) は、クロロフィル濃度と硝酸イオン濃度の間に相関があるように思われた。一方、最も北の北海道沿岸では、表面の硝酸イオンが低いにもかかわらずクロロフィル濃度が高かった。

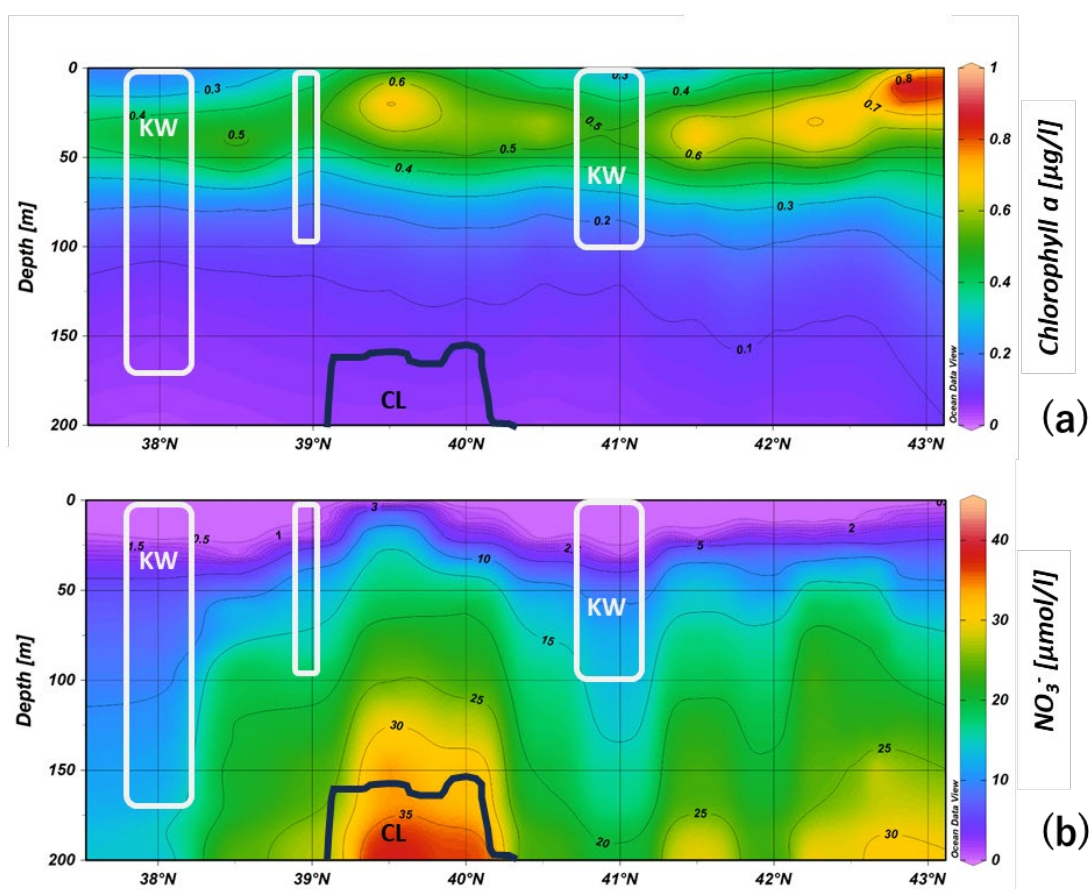


図 5 A-Line におけるクロロフィル a(a)と硝酸イオン(b)の南北鉛直断面図。KW: 黒潮系水、CL: 中冷水

コメント：クロロフィルと硝酸イオンについては、結果から読み取られる特徴だけを記しました。なぜ、そのような特徴が現れたのかは、研究者（あなた）が解析を深めて、考察にまとめてください。以下のサイトで学ぶとよいです。

LASBOS の海洋化学サイト：<https://repun-app.fish.hokudai.ac.jp/course/view.php?id=457>

解析のヒント：

- ・植物プランクトンが光合成で成長するには、水と光、二酸化炭素、栄養塩が必要です。（海中には、水と二酸化炭素は豊富にあります、、、）
- ・表層混合層の役割に着目するとよいです。
- ・冷水塊は、反時計回りの低気圧性渦になっていることが多いです（難易度高し！）
- ・北海道沿岸でクロロフィル濃度が高いのを説明するのは、結構難しそう。栄養塩の供給が鍵になるかもしれません。沿岸親潮がキーワード（プロの研究者も大注目のトピックです）

※ 自然現象が相手なので、決まった答えがあるわけではありません。説をいくつか挙げて、有力な説に絞り込むような作業が必要でしょう。

2014年7月にみられたような水理環境やクロロフィル・硝酸イオンの特徴が、別の時期、別の年でも同様にみられるのか？ 共通点や相違点、それらを生じさせる理由を考察するとよいでしょう。さらに、共通点や相違点を、数値を用いて説明できると、なお良いです。例えば、ある領域や期間の平均濃度を取る、平均との差を取るなどです。領域を定めるのが難しいですが、どのように領域を定義するのか、沢山のパターンを試してみるしかありません。

まとめ方のヒント：

・「高い」「低い」「多い」「少ない」のような言葉だけでなく、「〇〇が△△に比べて $X \mu\text{mol/L}$ だけ高かった。」や「〇〇の□濃度 ($a \mu\text{mol/L}$) が 2012~2018 年の〇〇の平均□濃度 ($b \mu\text{mol/L}$) に対して Y 倍も高かった。」のように、数値を用いて、具体的かつ丁寧に記すとよいです。そして、「2014年の〇〇が16年平均に対して Y 倍も高かった理由として、以下二つ可能性を考えた。一つ目の可能性は、〜〜である。二つ目の可能性は、〜〜である。これらの可能性について、以下に考察をする。」のように、展開すると分かり易いでしょう。

注意点：これらの解釈には、プロの研究者でも、答えを出せないような難しい問題を含んでいることを理解してください。明瞭な説明ができなくてもガッカリしないでください。自然相手なので、答えを出せないことが多いのは当たり前です。
