

# 海洋変動

中塚 武

名古屋大学環境学研究所  
地球環境科学専攻・地球環境変動論講座

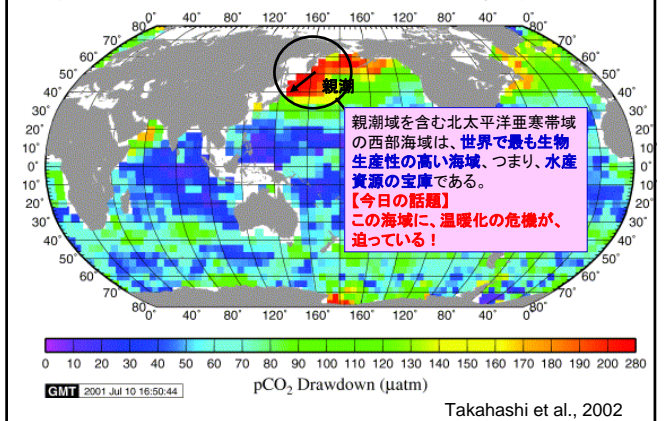
## 温暖化したら、海はどうなるのか？ —陸上(人間)側の論理—

- 1) 大陸氷床が融けたり、海水が膨張したりして、**海水準が上がる!**  
⇒ 低地が浸水して、高潮被害が増大する、等々。
- 2) 海水温が上がって、**台風が巨大化する!**  
⇒ 暴風雨による被害が増大。

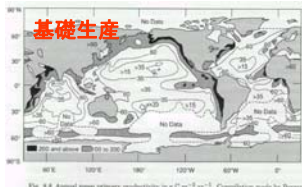
## 温暖化したら、海はどうなるのか？ —海(海洋生物)側の論理—

- 1) 海水の鉛直循環(対流)が不活発になって、**深層水が酸欠状態**になる!?  
⇒ 底生生物の大量死など(富栄養化とも関係...)
- 2) 海水の鉛直・水平循環が不活発になって、**表面水が栄養不足**になる!?  
⇒ 海洋の生産力が減少する(漁獲高にも、跳ね返る!)

海洋表面における二酸化炭素分圧の“生物による”季節変動幅の分布

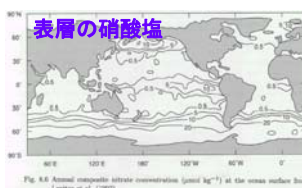


そもそも、海の生物生産(基礎生産)は、何が決めているのか？



『基礎生産(植物プランクトンによる光合成炭素固定量)の分布』

- 生産力が高い海域は、
1. 高緯度海域
  2. 赤道海域
  3. 沿岸海域



『海洋表層における硝酸塩(栄養塩の一種)の分布』

栄養塩濃度が高い海域は、基礎生産力が高い海域と一致。

**生物生産量は、栄養塩が決めている。**

## 海洋において、栄養塩とは、何か？ -海洋における栄養塩問題の基本-

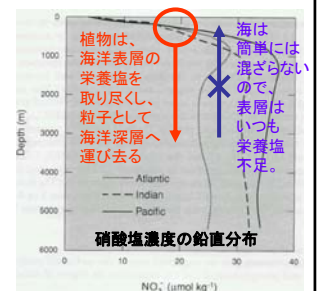
**栄養塩とは？**

生物生産に必要で、かつ不足しがちな元素(窒素、リン等)。炭素や水素も必要だが、栄養塩とは言わない。それでは、何故、栄養塩は不足するのか？

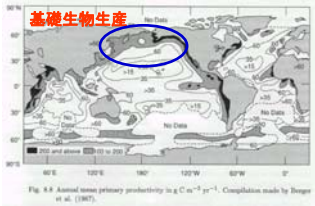
海洋における栄養塩問題の根源  
「大気は、太陽光線を透過させるが、水は、殆ど透過させない」ということ

↓ その結果、

1. 光合成は、海洋表層のみで可能  
= 植物プランクトンは、表層に集中
2. 大気は底から、海は上から暖まる  
= 鉛直成層の発達(海は混ざり難い)



## 生物生産の規定要因(1) 栄養塩の供給速度



『生物生産力が、高いところ』には、

栄養塩を、下層から海洋表層に運び込む特別なメカニズムが存在する。

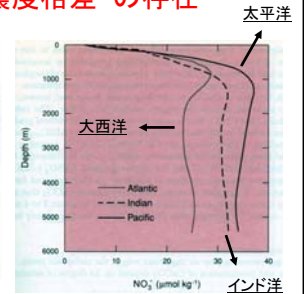
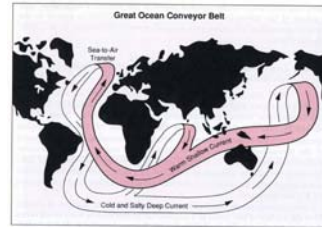
ということ！

高緯度海域において、栄養塩が大量に表層にもたらされるメカニズムとは？

『冬季の海面冷却による鉛直対流』

## “北太平洋”の栄養塩濃度は、何故、特に高い？

深層水の大循環による北大西洋と北太平洋の間での“栄養塩濃度格差”の存在



深層水は、北大西洋から北太平洋へと、2千年かけて流れ、その間に、沈降粒子の分解により栄養塩を、水中にどんどん溜め込む。

硝酸塩(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)の濃度の比較

## 生物生産の規定要因(2) 栄養塩の利用効率

せっかく栄養塩を表層に運び込んでも、植物プランクトンにそれを利用する条件が整っていなかったら、意味が無い。

栄養塩を十分に利用するために**必要な条件**：

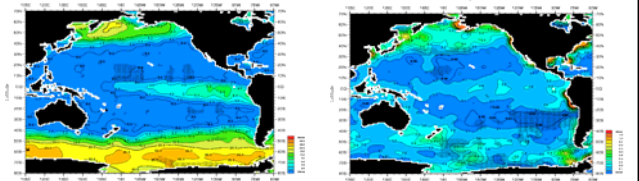
### 1. 『光』

=暗いところでは、光合成は、できない！

### 2. 『微量元素(鉄など)』

=窒素やリン等の主要栄養塩以外にも、実はマイナーな、しかし重要な栄養元素があった...

## 北海道東方の海の生産力を、実際に決めている要因は何か？

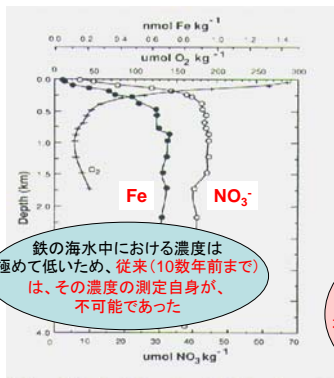


北海道の近海では、深層大循環の終着点であると共に、冬に海面が冷えて対流が起こり、深層から表層に、大量の窒素やリン等の栄養塩が上がってくるので、生産力が高い。

ただし、夏でも、表層水に大量の栄養塩が残存(光が当たるのに...) = 長年の謎 **High Nutrient & Low Chlorophyll (HNLC) 海域**

北海道東方沖の北太平洋で、夏の植物プランクトンの生産を制限している要因は、微量元素の1つ、「鉄」であった。

## 北太平洋亜寒帯域の夏の溶存鉄と栄養塩(硝酸)濃度



東部北太平洋亜寒帯域 (北緯50°、西経145°) (Martin et al., 1989)

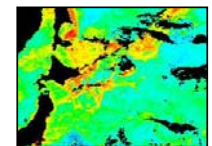
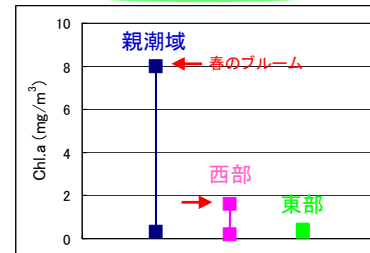
北太平洋亜寒帯域の表層では、栄養塩(硝酸塩)以上に鉄の不足が目立つ。つまり、栄養塩は未だ余っているのに、鉄の方が、先に枯渇する。

鉄の海水中における濃度は極めて低いため、従来(10数年前まで)は、その濃度の測定自身が、不可能であった

鉄は、陸上では非常にありふれた元素だが、水に溶けにくいので、海水中には、ほとんど存在しない。しかし、光合成や硝酸塩を取り込む際に使う酵素を作るには、欠かせない元素。

## 北太平洋亜寒帯域における植物プランクトンの増殖

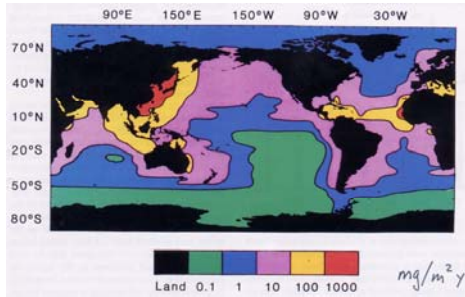
北太平洋亜寒帯域の東西での植物色素の季節変動



親潮域における春季の植物プランクトンブルーム

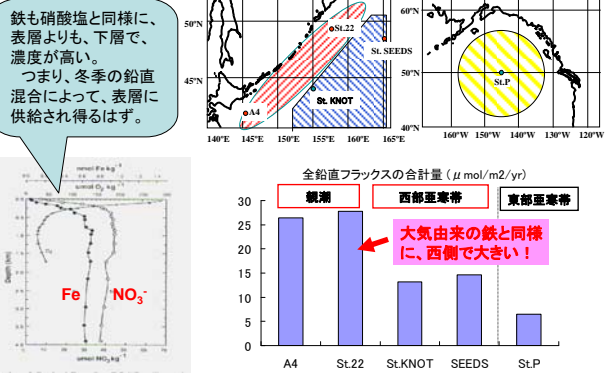
西部亜寒帯域および親潮域(北海道近海)では、東部と違って、植物プランクトンが、毎年必ず、春に大增殖する  
→春の増殖を支える鉄は、どこから供給される？

### 海洋表層の鉄は、どこから来るか？ 一般的理解 (鉄は大気から...)

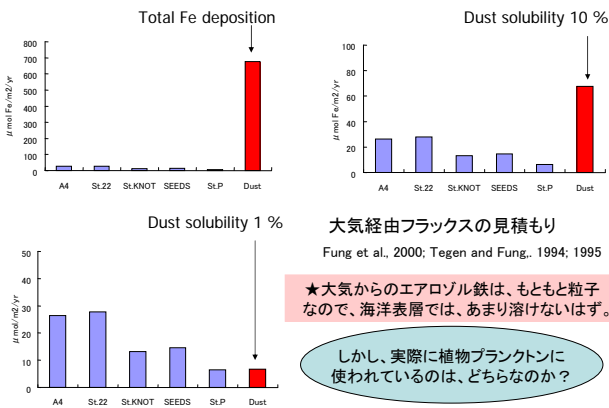


大気から海面に落下するエアロゾル態の鉄のフラックス  
Duce and Tindale, 1991

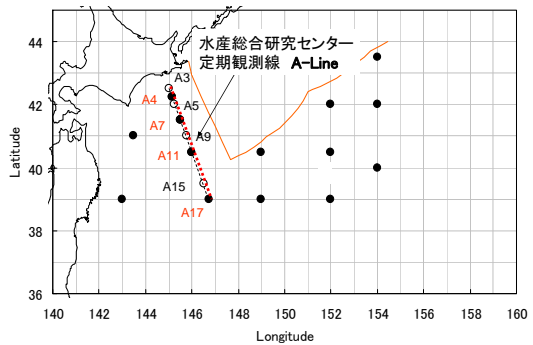
### 北太平洋における“下から”表層に供給される溶存鉄の見積もり (西岡, 2004)



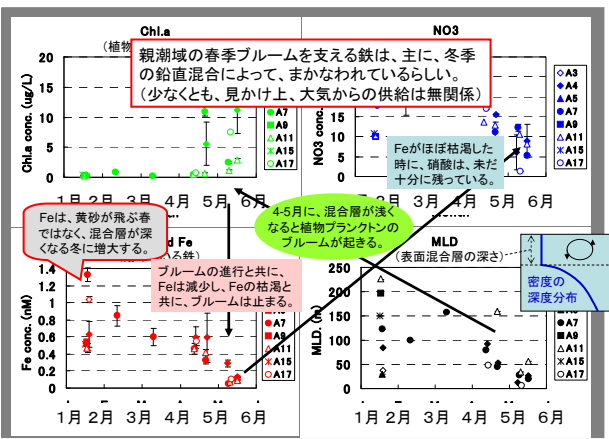
### 下層からの鉛直フラックスと大気経由のフラックスの比較



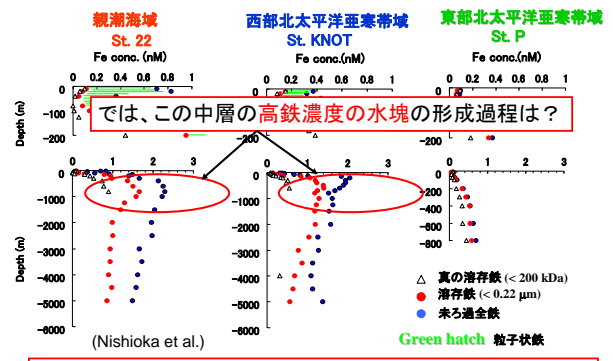
### 親潮域における溶存鉄の鉛直分布の季節変動観測 -鉛直輸送された鉄は、春季ブルームに、どう利用されているか- (Nishioka et al., 2007)



### 1-5月までのAライン各測点の表層混合層内平均値の変化 (西岡ら)

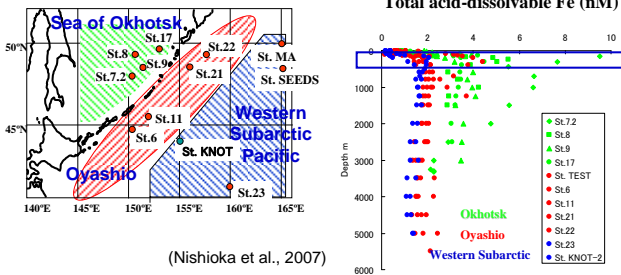


### 親潮域や西部北太平洋亜寒帯域では、鉄は、冬季の海水の対流によって、下層から供給される



表層混合層の下、中層に、鉄の濃度の高い水塊が存在する

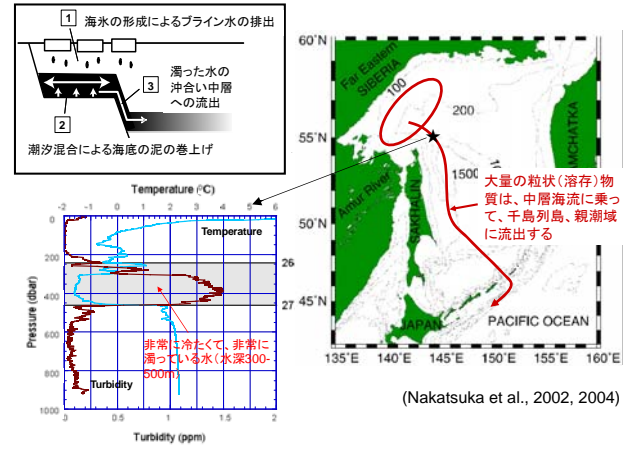
“中層鉄”は、オホーツク海から来る！



(Nishioka et al., 2007)

では、何故、オホーツク海の中層水中には、これほど大量の鉄が含まれているのか？

オホーツク海の中層水(深さ500m付近)に大量の鉄が含まれている訳とは？

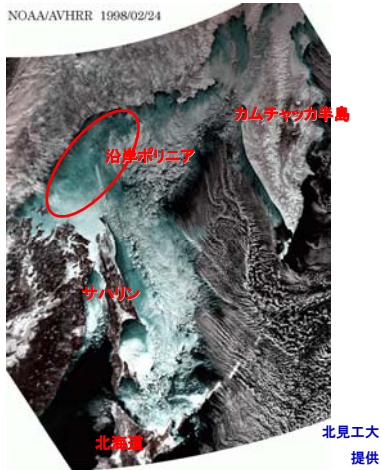


(Nakatsuka et al., 2002, 2004)

冬季のオホーツク海における海水と季節風の状況

東シベリアから吹く、冷たい冬季モンスーンによって、オホーツク海の北西部大陸棚の沿岸ポリニアでは、毎冬、大量の海水が形成される。

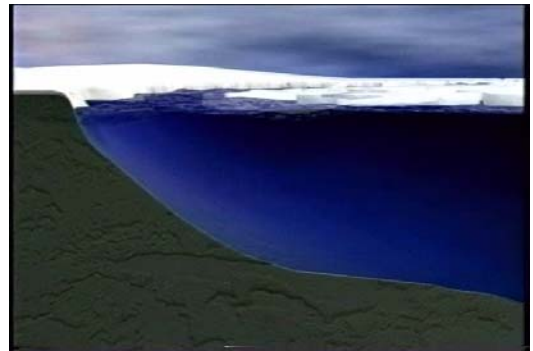
北西風と、南向きに流れる東サハリン海流によって、海水(と海水由来のブライン水)は、オホーツク海南部に運ばれる。



北見工大 提供

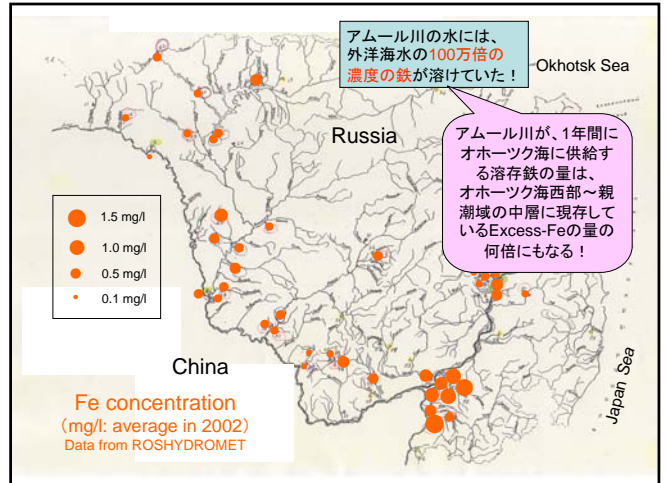
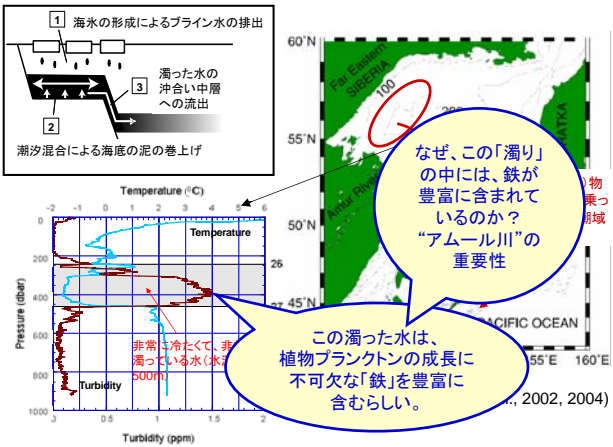
海水形成時のブライン水排出のイメージ

科学技術振興事業団 提供



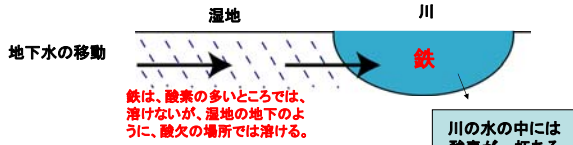
海水形成時に、冷たくて塩分の濃い水(ブライン水)=高密度水が、海水から排出され、深さ300-500mの中層に沿って、オホーツク海の南部に流出する

オホーツク海の中層水(深さ500m付近)に大量の鉄が含まれている訳とは？

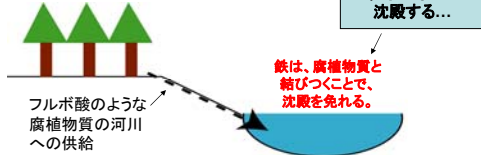


## アムール川の水に、鉄が大量に溶けている理由

(1) 広大な湿地の存在—「酸欠」環境下での鉄の溶解

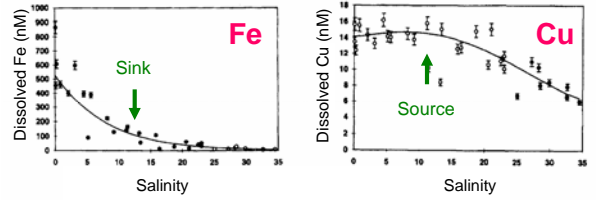


(2) 広大な森林の存在—「腐植物質」の供給



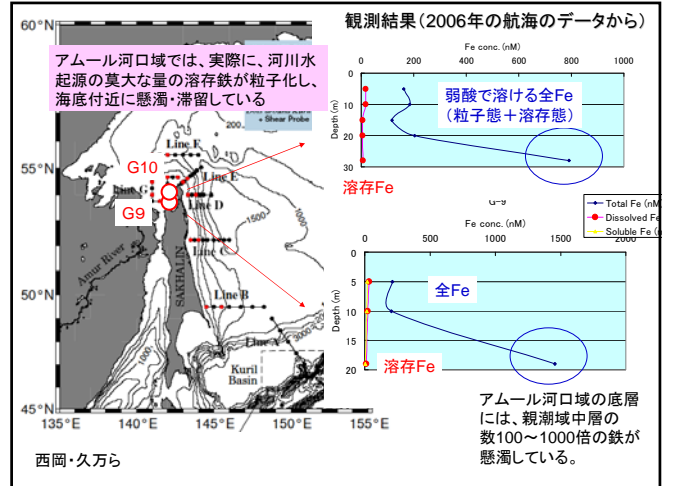
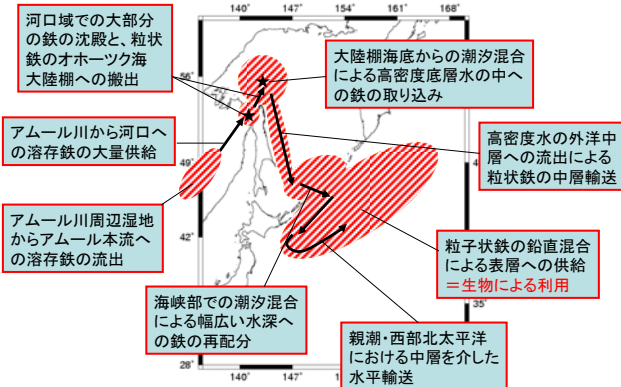
しかし、河口域で、塩分に触れると、ほとんどの溶存鉄は一旦、海底に沈殿してしまう  
(粒子として大陸棚海底を経て、オホーツク海の中層へ)

レナ川河口の場合 (Guieu et al., 1996)

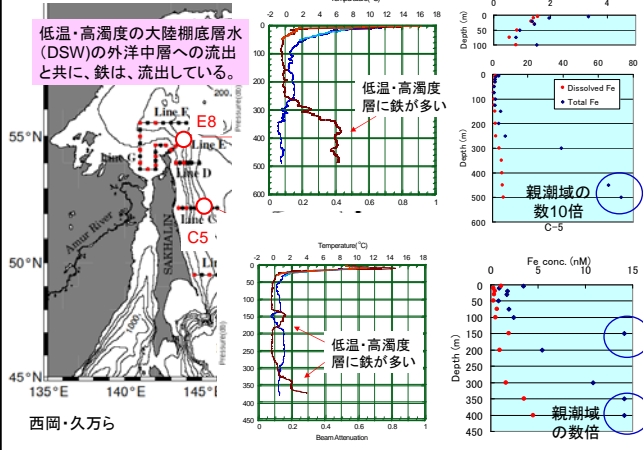


河川水中のほとんどの溶存鉄は、コロイド状であり、それらは河口域で海水と触れると、凝集して、極細粒の粒子となって、沈殿してしまう。  
★一部は、そのまま、東サハリン海流に乗って、オホーツク海を南下するが、大部分は、河口で落ちる。

## 想定される「アムール川」が「親潮域」の生物生産を支えるプロセス—中層水鉄仮説—

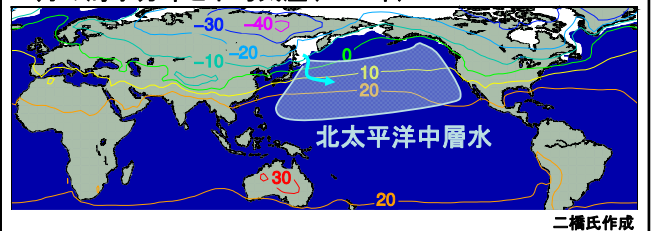


観測結果 (2006年の航海のデータから)



## グローバルな目でみたオホーツク海

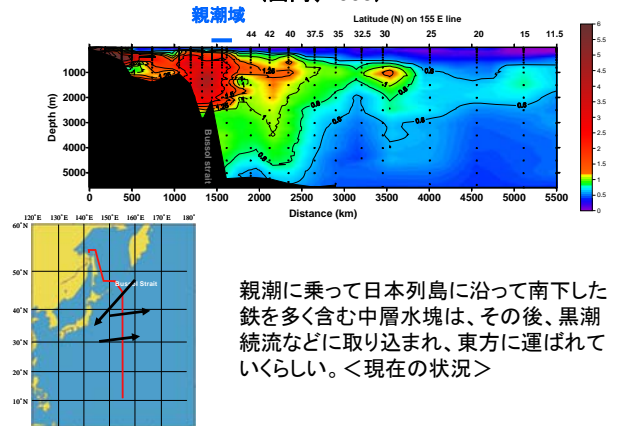
2月の海水分布と平均気温 (2001年)



・北半球における海水域の南限 → 海水の年々変動大

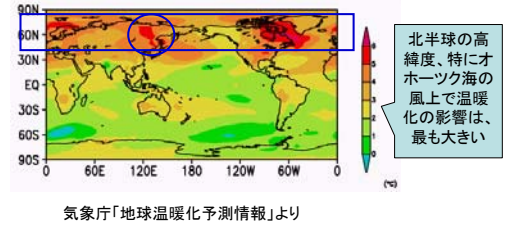
・北太平洋で唯一大気に接した水が中層へ潜り込まれる海 → 大気・陸からの熱・物質を北太平洋中層水(400-800m)へ

オホーツク海及び西太平洋の東経155度に沿った溶存鉄の南北分布 (西岡, 2009)



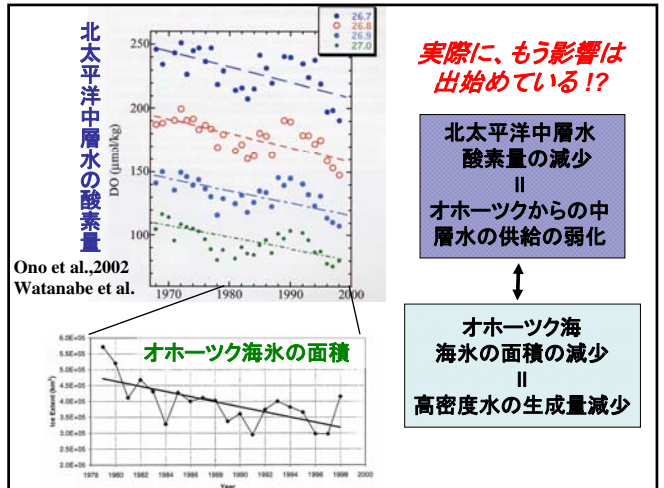
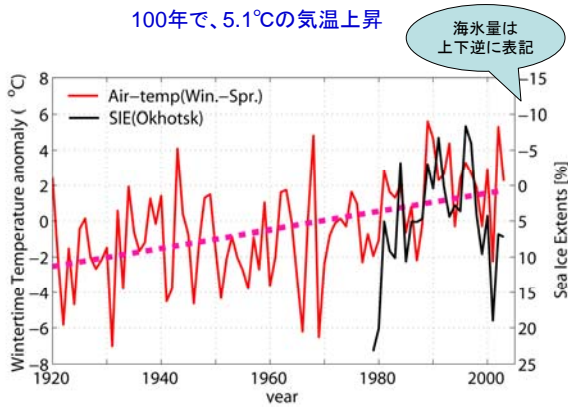
最大の問題としての、地球温暖化！

大気中のCO<sub>2</sub>濃度が、年率1%で増大した場合の100年後の地球の年平均気温の変化

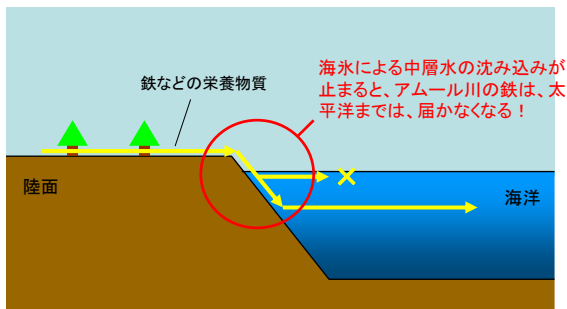


オホーツク海沿岸での冬の気温と海水量の過去80年間の変化

100年で、5.1℃の気温上昇



表層ではなく、中・深層に入り込むことのFe輸送における重要性



★遠方までの輸送 (鉄のような、栄養物質で、かつ粒子化し易い物質の場合、表層だと直ぐに生物に消費されたり、生物に吸着して沈降したりするが、中層だと、生物が少ないので、どこまでも運ばれる...)

西部北太平洋亜寒帯域 (親潮域) における過去数10年間の植物プランクトン量の減少

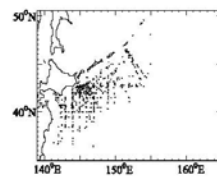


Figure 1. Map of stations used in this study. Note that many stations are repeatedly observed by HMO and thus real data number (2339 Stations) is far larger than the number of data.

Ono et al. (2002)

温暖化による2つの影響  
1. 鉛直混合自身の低下  
2. 鉄の水平輸送の低下

表面混合層におけるクロロフィルaの存在量の変化

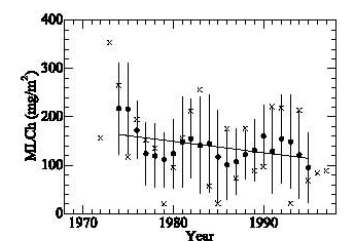


Figure 3. Time series of MLCh (pluse) and their 5-y running mean (circles). Error bar represents LSD of each 5-y average. Regression line of 5-y running mean (solid line) is: MLCh = 2.35 + 1.22 y + 4796.1 (r = 0.47).