

太平洋海盆内各層の水溫塩分変化と海面水位上昇への寄与  
Contribution of temperature and salinity change to the sea level  
rise in the Pacific Ocean

学籍番号 47-106644 乗松 祐里

指導教員 佐藤 徹、河野 健 教授

(平成 24 年 3 月 22 日修了予定)

Keywords: 海面高度変化、地球温暖化、温度、塩分、深層水の経路

Keywords: Steric height change, Global warming, Temperature, Salinity, pathway of circumpolar deep water

## 1. 序論

地球温暖化は海面水位の上昇を引き起こす。IPCC4 次報告書[1]によると、海面高度上昇は、過去数十年('61-'03)で 1.8mm/年、最近('93-'03)は 3.1mm/年で、その半分は熱膨張による。海面水位が上昇する原因は、主に水温の上昇にともなう海水の膨張及び氷床の融解など、真水の流入にともなう海水の増加と考えられている。真水流入の影響は塩分の変化としてあらわれる。海面水位上昇は社会へ影響を与える。海面水位の上昇によって、海岸浸食、高潮・高波・異常潮位などの沿岸災害の激化、沿岸湿地喪失などによる沿岸生態系・淡水生態系への影響などが起こりうるとも言われている。また、海面水位の上昇は、特に、海拔高度の低い珊瑚礁の島や環礁からなる国にとっては深刻な脅威となる。海拔の低いツバルなどの地域では、すでに海面高度上昇の影響により、浸水した陸地が増加していると言われている。このような社会への影響を軽減するあるいは適応策を考えるにあたっては、将来の予測が非常に大切になる。IPCC4 次報告書[1]では、今後の人類の生活シナリオを 6 つ仮定して、気温上昇、海面上昇について、それぞれ将来予測を立てているが、不確実性が大きい。

最近になって、地球温暖化の影響が海洋深層にも達しており、海底付近での水温が上昇していることが明らかになった。しかし深層の水温上昇はモデルで再現されておらず、モデルによる将来予測の不確実性の要因の一つになっている可能性がある。そこで、本研究ではこのような深層の環境変化が海面上昇にどのように寄与しているのか、を太平洋において詳しく調べることにした。

## 2. 解析方法

### 2.1 先行研究

重要な先行研究として以下 3 つがあげられる。Kawano et al. (2010) [2]では太平洋において観測線によって海洋を矩形メッシュにわけて貯熱量・塩分変化を計算している。しかし、海面高度変化については、詳しくはしらべておらず、太平洋全体の定性的な傾向を算出している。

Purkey and Johnson (2010) [3]は、太平洋、インド洋、大西洋を 4000m 深の地形によって海盆にわけ、4000m 以深の貯熱量変化と熱膨張における海面上昇を見積もっている。しかしこれは塩分を扱っておらず、また 4000m 以深でしか計算していない。

Kouketsu et al. (2011) [4]では、太平洋、インド洋、大西洋を観測線による矩形のボックスにわけ、各層における貯熱量・塩分変化を見積もり、海面上昇への寄与を見積もっている。しかし他の深度層における詳細な記述はない。

これらの研究をみると、海の分け方としては、メッシュに切る方法と海盆に切る方法の 2 種類があり、また水温変化の影響のみを考慮したものと水温変化と塩分変化の両方の影響を考慮したものがあることがわかる。海盆ごとに区分する場合、算出された海面高度変化などの値は「海盆ごとの特徴」として解釈することが可能である。また、深層の流れは海底地形に影響されるので深層循環との関連も理解しやすくなる。一方、メッシュで海洋を区分した場合、手法は単純であるが、上述のような利点はない。また塩分の変化も海面上昇には寄与しているので、水温変化の影響のみ考慮するのは適切とは言えない。そこで本研究では、

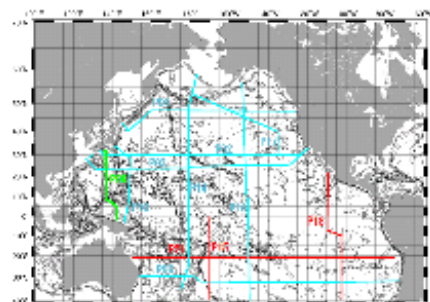


Fig.2-1 Observation line

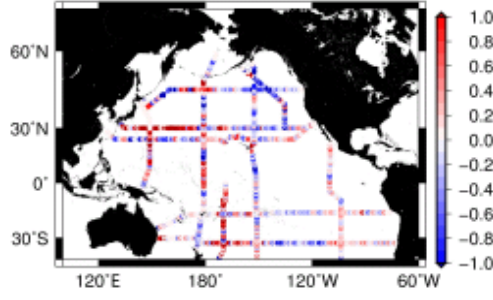


Fig.2-2 Observation line

は、国際共同によって実施されている。Fig.2-1 は、その中でも、概ね 10 年ないし 15 年の間隔で 2 回以上の観測がなされてる観測線を抜き出したものである。水色の観測線は Kawano et al. (2010) [2] で使われているデータ、赤は Kouketsu et al., (2011) [4] で使用されているデータを示す。本研究ではさらに最新のデータ（緑）をとり入れ、合計の 14 本のデータセットを用いて研究を行う。この 14 本のデータセットから、2000 m における海面高度変化を計算してプロットすると Fig.2-2 のようになる。観測データの中には、測定誤差をはじめ様々な誤差も含まれているため、この図からは明確な傾向を知ることは困難である。そのため、ある程度の広さをもつ海盆に区切って平均することで、この結果のなかから大規模な現象を探り出すことが重要である。

### 2.3 計算プログラム

海盆区分を自由に変えて、水温や塩分の変化、海面水位変化の計算を実施するためプログラムを作成した。はじめに地形データ、温度、塩分等の海水データの読み込み、海盆区分データの読み込みを行う。次に、海盆の内外判定を行い、海盆ごとに、体積、各層の面積の計算、水温差、塩分差の算出を行う。最後に、再び海盆の内外判定を行いながら海面高度変化  $\Delta h$  を計算する、という流れになっている。

海面高度の上昇  $\Delta h$  は以下の式で算出する。

$$\Delta h_{T-k} = -\alpha(P, T, S) \cdot \Delta T \cdot dz \quad (1)$$

$$\Delta h_{S-k} = \beta(P, T, S) \cdot \Delta S \cdot dz \quad (2)$$

$$\Delta h_T = (1/n \cdot A_0) \sum \Delta h_{T-k} \cdot A_k \quad (3)$$

$$\Delta h_S = (1/n \cdot A_0) \sum \Delta h_{S-k} \cdot A_k \quad (4)$$

$$\Delta h = \Delta h_T + \Delta h_S \quad (5)$$

ただし、P、T、S はそれぞれ圧力、水温、塩分、 $\Delta T$  は水温変化、 $\Delta S$  は塩分変化を表す。 $\Delta h_{T-k}$  はある観測点の第 k 層における温度変化による海面高度変化、 $\Delta h_{S-k}$  はある観測点の第 k 層における塩分変化による海面高度変化、 $\Delta h$  はある海盆表面での海面高度変化、n は観測点数、 $A_0$  は表面での海盆面積、 $A_k$  は第 k 層での海盆面積である。従って  $\Delta h$  は、各深度における体積変化が海面高度上昇に与える影響を示すことになる。

### 2.4 海盆区分

太平洋における深層の循環は、南極周辺で冷やされた海水が太平洋の海底を北上する、という基本構造となっている。また循環の経路によって水温や塩分の変化の度合いが違うことが予想され、循環の経路は、海底地形に影響されるので、海底地形で区分する方式を採用した。Purkey and Johnson (2010) [3] の海盆区分を参考に、また顕著な海底地形にのっとり、太平洋を 13 に区分した (Fig.2-3)。

まず、Samoa Passage と Wake Island Passage を通るように区分した。南極周辺域で沈みこんだ海水が太平洋を北上する際、必ずこの 2 つ水路を通過すると考えられているからである。

さらに、顕著な地形である、マリアナ諸島、伊豆小笠原諸島、天皇海山列、ハワイ諸島、マーシャル諸島などで区分した。北太平洋の部分は、アリューシャン列島で区分した。

東太平洋北部は顕著な海底地形はないものの、データを見ると南北に勾配があったので、北緯 40 度から 0 度まで 5 度ずつ区分線をずらし、 $\Delta h$  の南北差が極大となる北緯 30° で区分した。

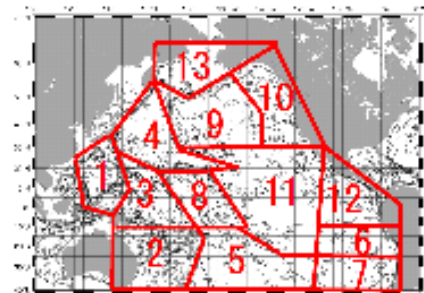


Fig.2-3 Basin classification

Table.1 Steric height  $\Delta h$ -2000

Basin	$\Delta h$ -T(mm/year)	$\Delta h$ -S(mm/year)	$\Delta h$ (mm/year)
フィリピン海盆(海盆1)	6.81E-02	-3.62E-02	3.18E-02
オーストラリア東部(海盆2)	2.57E-02	4.37E-03	3.01E-02
東カロリン海盆(海盆3)	-1.18E-01	2.08E-01	9.04E-02
北西太平洋海盆(海盆4)	2.63E-01	2.05E-01	4.68E-01
南西太平洋海盆(海盆5)	1.38E-01	1.19E-01	2.56E-01
ペルー沖(海盆6)	1.48E-01	-8.98E-03	1.39E-01
南西太平洋海盆東部(海盆7)	1.55E-01	1.80E-02	1.73E-01
中央太平洋海盆(海盆8)	2.82E-01	-2.50E-02	2.57E-01
北太平洋中央部(海盆9)	1.61E-01	-1.38E-01	2.27E-02
北太平洋東部(海盆10)	-5.80E-02	-3.16E-01	-3.74E-01
東太平洋海盆(海盆11)	1.50E-01	-1.51E-01	-8.44E-04
東太平洋海盆東部(海盆12)	1.14E-01	-2.30E-03	1.11E-01
ベーリング海(海盆13)	5.11E-02	-4.72E-02	3.83E-03

した結果を表(Table.1)、及び水平分布図(Fig.3-1~3.3)で以下に示す。実際には、2000~5000 m 以深での計算結果、及び各層での計算結果を示したが、ここでは、本研究で「深層」と位置付けた「2000 m 以深」での結果を示す。

北西太平洋海盆(海盆4)、南西太平洋海盆(海盆5)、南西太平洋海盆東部(海盆7)は水温変化、塩分変化の両方の寄与により海面高度が上昇している。フィリピン海盆(海盆1)、オーストラリア東部(海盆2)、ペルー沖(海盆6)、中央太平洋海盆(海盆8)、北太平洋中央部(海盆9)、東太平洋海盆東部(海盆12)、ベーリング海(海盆13)は温度による寄与が大きいいため、海面高度が上昇している。海盆3は塩分による寄与が大きいいため海面高度が上昇している。北太平洋東部(海盆10)は水温変化、塩分変化の両方の寄与により海面高度が下降している。東太平洋海盆(海盆11)は水温変化、塩分変化の寄与があるが、相殺して、見かけ上の海面高度変化はほとんどない、ということがわかった。

### 3.2 深層水の経路

貯熱量の変化は、太平洋では、北向きの周極深層水(Circumpolar Deep Water : CDW)の量が減少したためであると考えられている(Fukasawa, 2004[5])。Kawano et al (2010) [2]によると、4000m 以深では貯熱量は太平洋全域で増加しているとしており、それは深層水の経路に沿って顕著にみられるとしている。Fukasawa, 2004[5]によると、深層水の経路は、本研究の海盆に照らし合わせて考えると、南西太平洋海盆(海盆5)→中央太平洋海盆(海盆8)→北西太平洋海盆(海盆4)→北太平洋中央部(海盆9)となっている。詳細に、調べた結果、CDWの流れている深さは、3000m 以深で、北上するに従って深くなるという知見(Kawano et al, 2010[2])とつじつまがあった。即ち、海面高度上昇は、塩分変化の影響を考慮した上でも、CDWの経路に沿って大きく変化している。

また、海面高度変化に対するCDWの影響は北太平洋中央部(海盆9)まではほとんど届いていないということもわかった。

全体として、温度による海面高度変化 $\Delta h_T$ は上昇に寄与している部分が多く、塩分による海面高度変化 $\Delta h_S$ は特に北東太平洋において下降に寄与している地域が多かった。それらの和 $\Delta h$ を見ると、南西部では上昇、北東部では下降といった大きな構造が見られた。

温度、塩分ともに上昇に寄与している北西太平洋海盆(海盆4)では非常に大きな上昇をみせる。「海面高度上昇がLCDWの流れに影響されている」という観点だけでは、南西太平洋海盆(海盆5)、中央太平洋海盆(海盆8)よりも北西太平洋海盆(海盆4)の方が、上昇が大きくなってしまふことの説明がつかない。逆に、温度、塩分ともに下降に寄与している北太平洋東部(海盆10)では大きな下降を示す。したがって、海面高度変化を議論する際には、温度だけでなく、塩分による変化の寄与も考慮する必要があることがあらためてわかった。

太平洋の北東部にも顕著な海底地形はないものの、データには東西に勾配があった。そこで東太平洋北部と同様に、5度ずつ区分線をずらしながら $\Delta h$ の東西差を算出し、東西差が顕著に変わるような線で区分した。

## 3. 解析結果・考察

### 3.1 海面高度変化

温度変化による海面高度変化 $\Delta h_T$ 、塩分による海面高度変化 $\Delta h_S$ 、及びその和 $\Delta h$ を計算

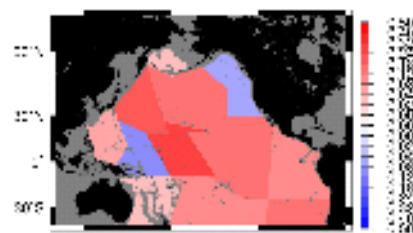
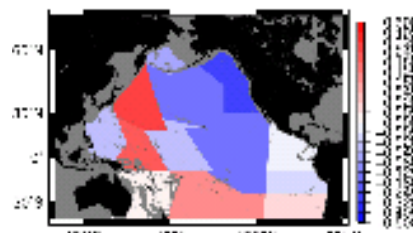
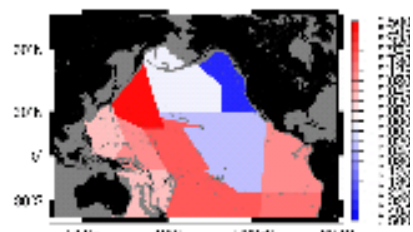
Fig.3-1  $\Delta h_T$ 2000Fig.3-2  $\Delta h_S$ 2000Fig.3-3  $\Delta h$ 2000

Table.2 Comparison of coefficients  $\alpha$  and  $\beta$ , temperature, and salinity

Basin	TEOS-10-EOS-80			(TEOS-10-EOS-80)/TEOS-10		
	(mm/year)	(mm/year)	(mm/year)			
フィリピン海盆(海盆1)	0.0140	0.0002	0.0142	5.14%	-0.52%	15.00%
オーストラリア東部(海盆2)	0.0043	0.0000	0.0042	-2.35%	-0.54%	-2.04%
東カリフォルニア海盆(海盆3)	-0.0348	-0.0009	-0.0357	14.65%	-0.44%	-13.68%
北西太平洋海盆(海盆4)	0.0581	-0.0008	0.0574	7.15%	-0.35%	2.89%
南西太平洋海盆(海盆5)	0.0206	-0.0005	0.0201	0.08%	-0.39%	-0.16%
ペルー沖(海盆6)	0.0385	0.0000	0.0385	11.03%	-0.23%	11.91%
南西太平洋海盆東部(海盆7)	0.0392	-0.0001	0.0391	10.33%	-0.44%	9.02%
中央太平洋海盆(海盆8)	0.0567	0.0000	0.0567	5.99%	-0.02%	6.92%
北太平洋中央部(海盆9)	0.0337	0.0004	0.0341	6.11%	-0.32%	-313.20%
北太平洋東部(海盆10)	-0.0150	0.0013	-0.0137	10.61%	-0.42%	1.04%
東太平洋海盆(海盆11)	0.0337	0.0006	0.0342	7.18%	-0.38%	-37.72%
東太平洋海盆東部(海盆12)	0.0301	0.0000	0.0301	11.07%	-0.62%	11.36%
ベーリング海(海盆13)	0.0116	0.0002	0.0119	7.16%	-0.48%	-68.45%

高度変化を調べる際に、塩分の考慮は必要不可欠であると言える。また、水温上昇は深層水の経路に沿う、という過去の知見があるが、今回の研究により塩分の影響を含めたうえで水位上昇にも、海面高度上昇は深層水の経路に沿うという傾向がみられることがわかった。

#### 4. TEOS-10 と EOS-80 の比較

2009 年 6 月の Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) で海水の状態方程式 (Practical Salinity Scale 1978 and International Equation of State Seawater 1980 : PSS-78 and EOS-80) に代わる新しい海水の状態方程式 (Thermodynamic Equation of Seawater 2010 : TEOS-10) の採用が承認された。EOS-80 は実用塩分スケール(PSS-78)で定義される実用塩分を用いていたが、TEOS-10 では、実用塩分ではなく、絶対塩分が用いられている。状態方程式 TEOS-10 および EOS-80 を用いて、2000m 以深における、温度変化による海面高度変化 $\Delta h_T$ 、塩分変化による海面高度変化 $\Delta h_S$ 、およびその和 $\Delta h$ を計算した結果、 $\Delta h_T$ に最大 15%の差が表れた (Table.2)。このような差を生む要因としては、TEOS-10 と EOS-80 では温度変化にかかる係数 (熱膨張率)  $\alpha$ 、塩分変化にかかる係数  $\beta$  の計算方法がことなるため、 $\alpha$  と  $\beta$  の値に差がある場合と塩分の定義がことなるため、塩分変化の値に差がある場合が考えられる。そこで、温度変化にかかる係数  $\alpha$ 、塩分変化にかかる係数  $\beta$ 、2 回の観測の温度の差 $\Delta T$ 、塩分の差 $\Delta S$ 、を計算した。その結果、 $\beta$ 、 $\Delta T$ 、 $\Delta S$ 、にはほとんど差が見られず、 $\alpha$  にのみ 7%ほどの差が見られた。すなわち、状態方程式を EOS-80 から TEOS-10 に変えることによって生じる海面高度変化の差は、 $\alpha$  の値の差に起因しているということがわかった。

#### 5. 結言

水温変化、塩分変化が海面高度変化にどのように寄与するかを詳しく解析した結果、

- ・ 深層 (2000m 以深) は、表層の海面高度変化のおよそ-12~16%程度であり、海盆によって大きな差が出た。
- ・ 海面高度上昇は CDW の経路に沿って生じていることがわかった。
- ・ 2000m 以深での海面高度変化 $\Delta h$ は、5000m 深から 3000m 深に極大を持ち、北上するに従って深くなっていることがわかった。これは、CDW の存在する深度が北上するに従って深くなるという過去の知見と一致した。また、この CDW の変化が 2000m 深における海面高度変化 $\Delta h$ に最も強く影響を与えていることがわかった。
- ・ 全体として、温度による海面高度変化 $\Delta h_T$ は上昇に寄与している部分が多く、塩分による海面高度変化 $\Delta h_S$ は特に北東太平洋において下降に寄与している地域が多かった。それらの和 $\Delta h$ を見ると、南西部では上昇、北東部では下降といった大きな構造が見られた。このことから、海面高度変化を考える上で、温度による寄与のみならず、塩分の寄与についても考慮する必要があると言える。

新しい状態方程式 TEOS-10 と今までの EOS-80 の比較を行った結果、海面高度変化には温度による海面高度変化 $\Delta h_T$ にのみ差があった。調べると、その差は、温度にかかる係数  $\alpha$  の値の差に起因しているということがわかった。

#### 参考文献

- [1] IPCC 第 4 次評価報告書
- [2] T.Kawano et al. Deep-Sea Research II 57 (2010) 1141-1151
- [3] S.Purkey, G.Johnson, JOURNAL OF CLIMATE, Volume23 (2010)
- [4] S.Kouketsu et al., JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL.116, (2011)
- [5] Masao Fukasawa, Howard Freeland, Ron Perkin, Tomowo Watanabe, Hiroshi Uchida & Ayako Nishina, 2004: Bottom water warming in the North Pacific Ocean, Nature, 427, 825-827,

以上から言えることとして、Purkey & Johnson(2010) [3]では水温変化による海面高度への影響のみを考慮して、塩分を考慮していなかったが、塩分を考慮することでかなり水位は上昇するばかりではないことは明らかである。即ち、海面