

衛星海面高度計記録に見る海面上昇  
ARGO float 観測による熱膨張成分の推定と  
ENSO による短期的乱れ

Sea level rise from satellite altimetry :Estimation of  
thermal expansion contribution using the ARGO float data  
and short-term disturbances by ENSO

北海道大学 理学部 地球惑星科学科  
宇宙測地学研究室4年

徳井 雄太  
Yuta Tokui

指導教官名 日置 幸介

2018年2月2日

## 概要

近年、地球温暖化による海面上昇が話題になっている。海面上昇には大きく2つの原因があると考えられており、1つは陸域から大陸氷床や山岳氷河などの融解水の形での海への流入、もう1つは海水自体が温まることにより起きる熱膨張である。それらがどれほどの比率で海面上昇に寄与しているのか、またそれぞれの要因がもたらす変化率は時間によってどう変わるのか、それらに加速度はあるのか、などがこれまでに多く議論されてきた。また、ENSO（エルニーニョ南方振動）に代表されるような気候変動によって世界中で降雨パターンの変化や海水温の変化が引き起こされているが、それらによる短期的な海水準変動の乱れはどのように現れるかも重要な課題である。

衛星海面高度計は、1992年8月に TOPEX/Poseidon 衛星が打ち上げられて以降、それまでの験潮儀などでは測定することのできなかつた広範な地域の海水準の変化を均一な精度でとらえることができるようになった。一方 ARGO 計画は、世界中の海洋での水温、塩分濃度などの深さ方向のプロファイルを得ることを目標とした国際プロジェクトであり、ARGO float と呼ばれるその場観測を行う装置が世界中の海洋に展開されている。現在では約3,900個の ARGO float が配備され、日夜データを取得している。

本研究では、1993年12月～2017年12月における衛星海面高度計による海面上昇の様子について解析を行い、全球平均で約3.0 mm/年の割合で海面が上昇していることを見出した。また、海域ごとの海水準のデータから、変化率や季節変化の海域ごとの特徴やそれらの特徴が現れる原因について考察した。次に、ARGO float が全球に配備されたといわれる2005年1月から現在にかけての海水温の深さ分布データから0 m～2,000 mの深さの海水の熱膨張による海面高変化を計算した。グリッド化された緯度経度1°ごとのデータからは、インド周辺で変化率が大きいこと、太平洋や大西洋北部では東西で変化の符号が異なっている等のが分かった。全球平均では、熱膨張による海水準の上昇量は約1.4 mm/年であるという結果を得た。

最後に、代表的な気候変動である ENSO について、その指数として広く用いられる NINO.3 海域の海水温異常と、衛星高度計による海面高度のデータや ARGO float による海水温のデータとの相関を調べた。NINO.3 の海水温異常と GMSL のモデルからの残差は正の相関を示した。それらに線形の関係性を仮定して推定された比例係数を用いて GMSL のデータに ENSO の補正を行い、陸水の影響を取り除いた海面上昇の曲線を得る試みを行った。その結果 ENSO に伴う海面変動をある程度取り除くことができたが、ENSO 以外の気候変動の関与もあり、ENSO の指数のみを用いた陸水の補正は限定的なものであることがわかった。

## 目次

1. はじめに.....	1
1.1 地球温暖化による海面上昇.....	1
1.2 衛星による海面高の測定.....	1
1.3 ENSO.....	3
1.4 ARGO 計画.....	5
1.5 本研究の目的.....	6
2. 衛星海面高度計.....	8
2.1 海面高度のデータ.....	8
2.2 GMSL.....	8
2.3 様々な海域の比較.....	9
3. ARGO float.....	15
3.1 データの処理方法.....	15
3.2 時系列比較から見る海洋現象.....	16
3.3 過去 12 年での海洋の熱膨張.....	17
4. ENSO 指標との比較.....	20
4.1 比較する指標.....	20
4.2 GMSL.....	21
4.3 各海域の海水準.....	22
4.4 熱膨張量.....	24
5. ENSO 指標による GMSL データの補正.....	26
5.1 ENSO 補正を加えるモデル.....	26
5.2 補正とその結果.....	26
6. データセットの違い.....	30
6.1 データ及び解析結果の比較.....	30
6.2 考察.....	34
7. まとめと今後の展望.....	35
8. 謝辞.....	36
9. 参考文献.....	37

## 1. はじめに

### 1.1 地球温暖化による海面上昇

近年、地球温暖化の影響によって世界の海洋の平均海水面が上昇している。図1は IPCC5 次報告書にある、検潮（験潮）によって観測された1900年から現在に至る海面上昇の様子である。1900年から現在までの間に、海面は約20cm 上昇している。この海面上昇には大きく2つの原因があると考えられている。

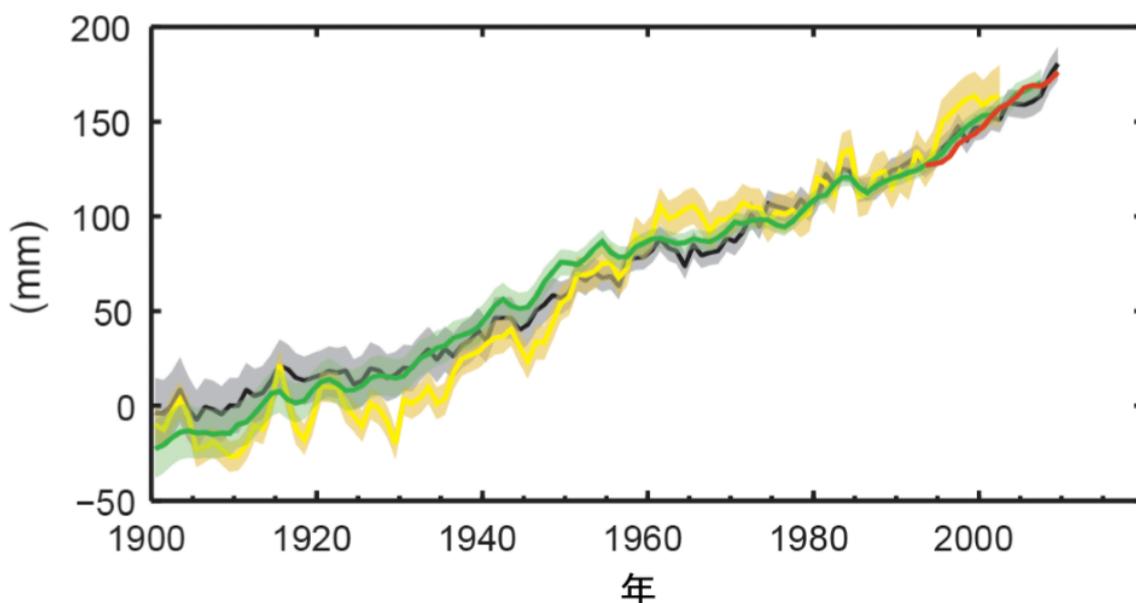


図1-1: IPCC5次報告書より、1900年から現在までの海面上昇を表したグラフ。赤は後述する衛星海面高度計によるデータ、それ以外は験潮儀、検潮儀によるデータの世界平均を計算したもの。ここ110年余りで地球の平均海水準は約20cm上昇している。

原因の1つ目は陸域からの水の流入である。これは山岳氷河やグリーンランド、南極の氷床の融解によって本来陸域にあった水が海洋にもたらされて海水の量が増えて起こるものである。2つ目は海水の体積増加である。これは気温上昇によって海水が暖かくなり、海水の密度が低下して体積が増加することによって海面が上昇するものである。前者は海水量の増加を伴うので重力の増加（海底圧力の増加）を伴うが、後者はそれらを伴わない。

### 1.2 衛星による海面高の測定

衛星海面高度計では、人工衛星の直下にマイクロ波のパルスを発射し、海面で反射された

マイクロ波を受信する。マイクロ波の往復時間を計測することによって海面と衛星間の距離を計測する。衛星の軌道は別途 GNSS やレーザ測距技術を用いて精密決定する。衛星の地球重心からの距離から計測された衛星と海面の間の距離を差し引くことによって、地球重心から海面までの距離が計算できる。そこから地球の重力場による恒久的な海面の凹凸（ジオイド面）を差し引くことによって海面高度の変化を特定することができる。

20世紀終わり頃まで、海面高は潮位計（験潮儀、検潮儀）による計測が主流であった。しかしこれらは沿岸部にしか設置できず、また地殻上下変動によって見かけの海面高変化が生じる等の欠点があった。1970年代から衛星を用いた海面高の測定の試みが行われるようになったが、初期の衛星は軌道誤差が非常に大きかったため、実用に向くものではなかった。1992年に運用を開始した TOPEX/Poseidon(T/P)衛星では、人工衛星の軌道が長期間安定するために軌道高度をこれまでより高くとり、Ku バンド・C バンドという2周波を用いて観測を行って電離圏遅延を取り除くなどの改良を加えることで、誤差2-3cm という高精度の観測ができるように改良された。以後、後継衛星の JASON-1,JASON-2,JASON-3とその海面高度計としての役割が引き継がれ、海洋の各種研究において重要な役割を果たしている。

図1-2は T/P が運用を開始してから現在に至る約25年間における全球平均海水準（Global Mean Sea Level:GMSL）の上昇の様子を表す。ここ25年では平均して $2.949\pm 0.026\text{mm/yr}$  の速度で海面が上昇している。

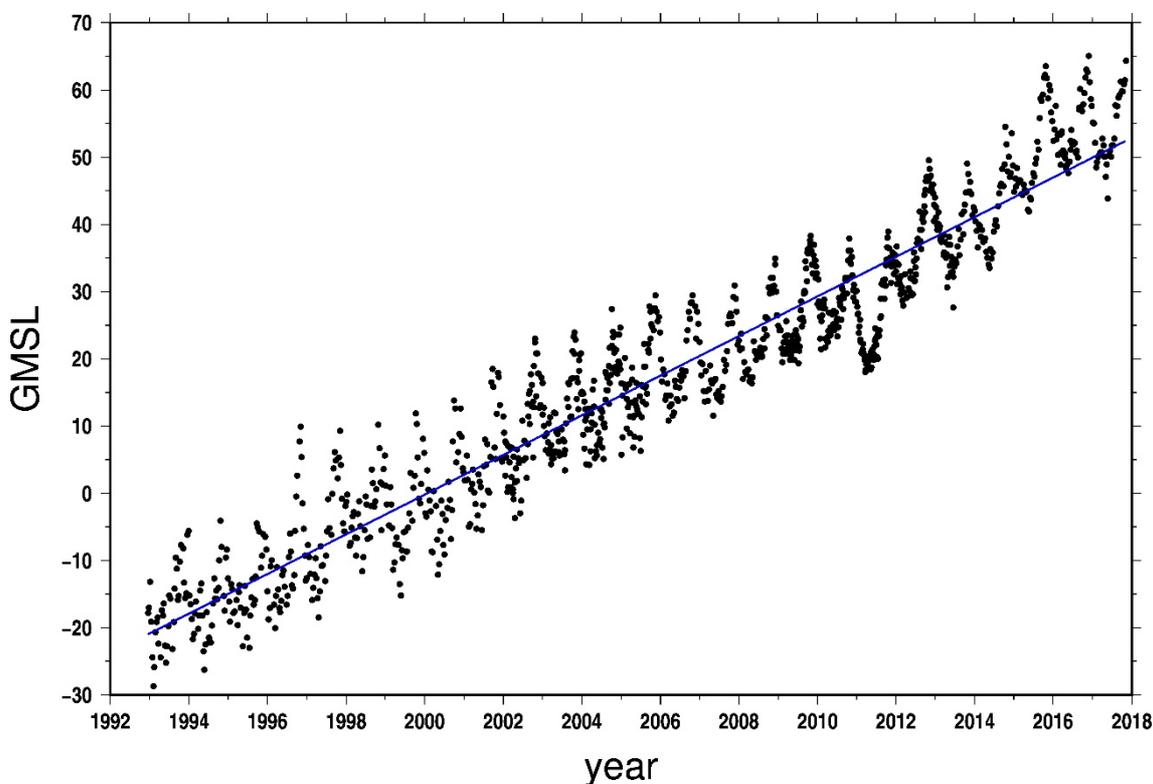


図1-2：最近25年の衛星海面高度計の記録（黒）と直線近似を行ったモデル（青）。衛星高度計のデータはアメリカ海洋大気庁 HP

([https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries\\_regional.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries_regional.php)) から取得した。

### 1.3 ENSO

ENSO とは El Niño 現象と南方振動(Southern Oscillation)の2つの現象の総称である。本来 El Niño とは南米のペルーやエクアドルの沖で12月頃に深層からの海水の湧昇が弱くなることによって海水温が上昇する現象のことを意味する。しかし、数年に一度、ペルー沖の海水温が高いままの状態が続くという現象がおき、1970年代の調査でこの水温が高い状態がペルー沖から太平洋の広い範囲にかけて起きていることがわかった。この現象は広く El Niño と呼ばれるようになった。本研究では、El Niño を後者の現象を指すものとする。また、El Niño とは反対にペルー沖及び太平洋赤道域の海水温が低くなる現象も同様に起き、この現象のことを La Niña という。さらに最近ではどちらの減少も発生していない時期のことを La Nada と呼ぶこともある。図1-3はそれらの模式図である。

南方振動とは、南太平洋における海面気圧がインドネシアやオーストラリア北部沿岸で高い時は太平洋東部のタヒチで低く、逆にインドネシア付近で低い時はタヒチで高いというシーソーのような変動のことである。この南方振動と El Niño/La Niña 現象は、近年の研究において深い関わりがあるということがわかってきた。

El Niño/La Niña には世界共通の定義は無く、各国が各々の基準で判断している。日本の気象庁では、北緯5度から南緯5度かつ西経150度から西経90度の範囲の海域（NINO.3海域）をエルニーニョ監視海域と定義し、この海域の海面水温の基準値（その年の前年までの30年間の各月の平均値）との差の5か月移動平均値（その月および前後2か月を含めた5か月の平均値）が6か月以上続けて+0.5度以上となった場合を El Niño、-0.5度以下となった場合を La Niña と定義している。本研究でも、El Niño/La Niña 現象の定義は気象庁と同じものとする。

図1-4は近年の El Niño/La Niña の監視指数の変化を示したグラフである。ここ25年では1997年春～1998年春、2002年夏～2003年初頭、2009年夏～2010年春と2014年夏～2016年春に El Niño が発生している。一方、1995年夏～1996年初頭、1998年夏～2000年春、2005年秋～2006年春、2007年春～2008年春と2010年夏～2011年春に La Niña がそれぞれ発生している。

El Niño/La Niña 時には太平洋赤道域で吹いている貿易風の強さが変わるため、太平洋での降雨地域に変化が起こる。よく知られている変化としては、太平洋赤道域の降雨の中心が東に移動するために、南米の砂漠地帯で通常降らない雨が多く降り、逆にインドネシアやパプアニューギニアなどでは降雨量が減少する。こういった降雨異常は太平洋だけではなく世界中の熱帯や中緯度地域で起こるが、このような世界各地に気候変動が同時発生することをテレコネクション（遠隔相関）という。

El Niño/La Niña に伴う降雨異常は地球全体での海水準の上昇にも影響を与えている。Fasullo et al. (2013)は、2010-2011年に La Niña を含む複数の気候変動が重なって、陸域から

海への流出量が少ないオーストラリア大陸に大量の降雨が地下水として貯留され、その結果地球全体の海水準を下降させたことを論じている。

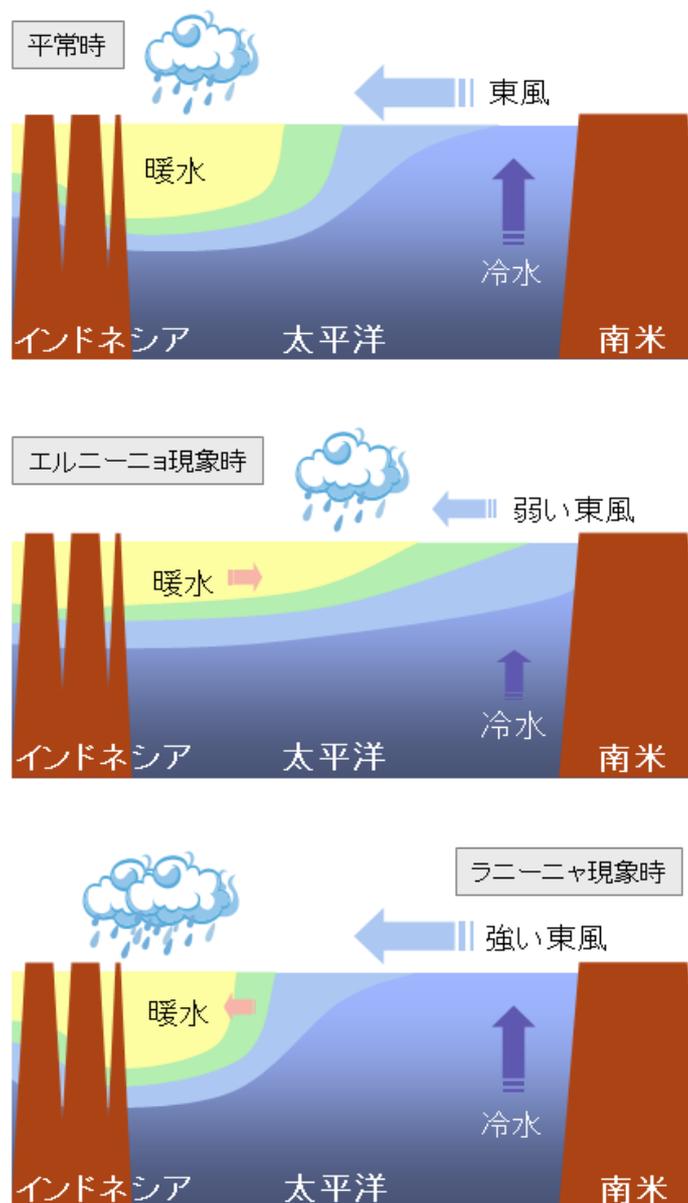


図1-3：気象庁 HP より、平常時および El niño/La niña 現象が生じた時の太平洋赤道域における降水地域の移動、貿易風の消長、ペルー沖における海水の湧昇の変化等を説明したもの。

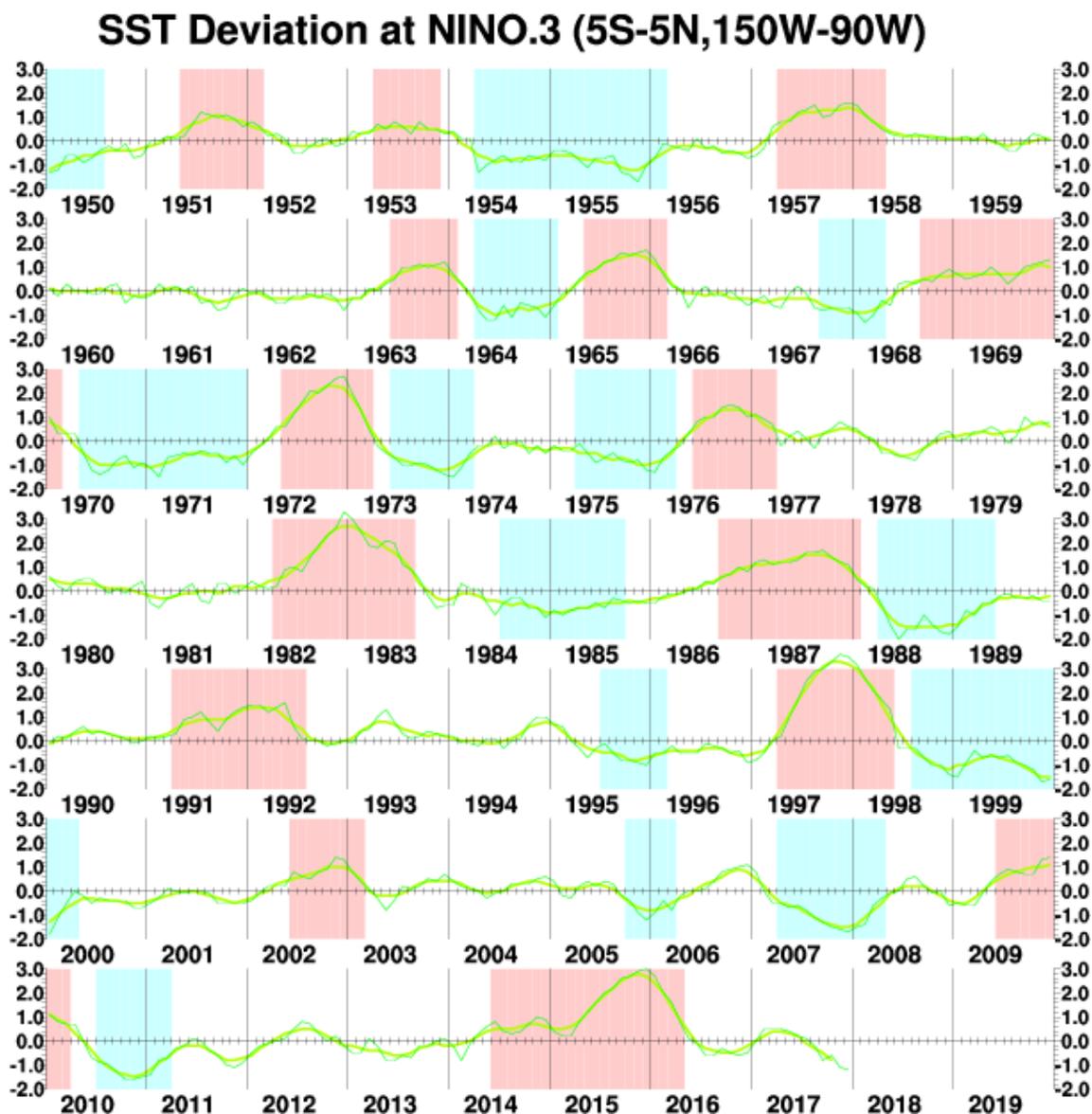


図1-4 気象庁 HP より、El niño/La niña 現象の監視指数の変化を表したグラフ。折れ線は月平均値、太線は5か月移動平均値を表している。赤の陰影は El niño 現象、青の陰影は La niña 現象の発生時期をそれぞれ示している。

#### 1.4 Argo 計画

Argo 計画は、地球の海洋全体の変動を観測するために2000年頃から行われている国際プロジェクトである。この計画では、Argo float とよばれる、海洋のその場観測を行う機器を世界中に海域に展開する。個々の観測機器は、海面から水深2,000m 程度までの範囲を自動的に上昇、沈降し、水温、塩分濃度などを計測し、データを float と人工衛星との間での通信によって取得することによって、それらの値の深度プロファイルを作成することを目的

としている。図は2017年11月の段階で、世界中で稼働している Argo float の位置を示したものである。現在26カ国が計3,862個の Argo float を稼働させている。現在はほとんどの海洋で経度、緯度共に約1度ごとに Argo float が配備されている。

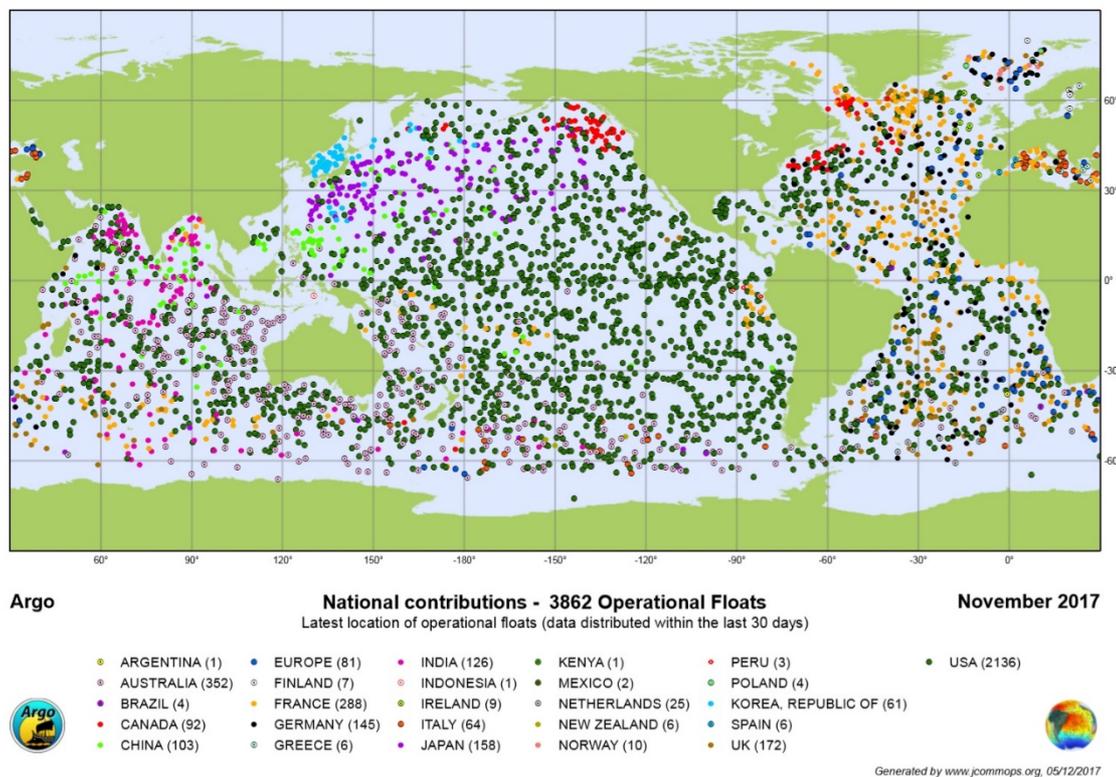


図1-5 2017年11月段階での Argo float の世界全体での配備図。(JAMSTEC の HP より抜粋) 配備数に多少の粗密はあるが、おおむねすべての海域で緯度、経度ともに1度ずつ配備されている。また、全 Argo float の約55%がアメリカによるものである。

Argo float は自身に搭載された浮力調節機能を用いて観測を行っている。海面にある Argo float はまず設定された漂流深度（通常水深1,000m）まで沈み、その水深で約10日間漂流する。その後、観測最深部である水深2,000m まで沈み、水温、塩分濃度の鉛直分布を観測しながら海面まで浮上する。海面では衛星経由で観測データを送信し、再び漂流深度まで沈降する。このサイクルを約140回（通常3～4年）にわたって繰り返すことができるように設計されている。これにより得られたデータは、海洋の熱循環や気候変動の解明に用いられている。

## 1.5 本研究の目的

本研究では、まず衛星海面高度計の記録を用いた最近25年間の海水準の時系列について解析を行う。次に Argo float を用いて得られた世界中の海水温のデータから海水の熱膨張に

よる海面上昇の量を計算し、全海面上昇量に占める割合や異なる海域ごとの特徴などを考察する。そしてその2つのデータのそれぞれについて、代表的な気候変動の一つである ENSO との関係調べる。

## 2 衛星海面高度計

### 2.1 海面高度のデータ

衛星海面高度計によって得られたデータは複数の機関によって処理され、公開されている。フランス国立宇宙研究センターの海洋データアーカイブ (AVISO)、オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO)、アメリカ航空宇宙局 (NASA)、アメリカ海洋大気庁 (NOAA) やコロラド大学 (CU) がそのデータセンターであり、本研究では NOAA のホームページ ([https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries\\_regional.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries_regional.php)) で公開されているデータを用いる。NOAA では CSV 形式でデータが公開されており、そのデータを txt 形式に変換した。

### 2.2 GMSL

衛星海面高度計で観測されたデータについて、全地球の海域の平均(Global mean sea level, GMSL)をとって解析を行った。図2-1では直線変化のモデルを過去25年、15年と5年の3つの時系列でとったものである。この3つの時系列での傾きはそれぞれ $2.95 \pm 0.03$  (mm/yr)、 $3.045 \pm 0.05$  (mm/yr)、 $4.25 \pm 0.18$  (mm/yr)となり、現在に近いほど傾きが大きくなる地球温暖化の一般的な傾向と調和的である。

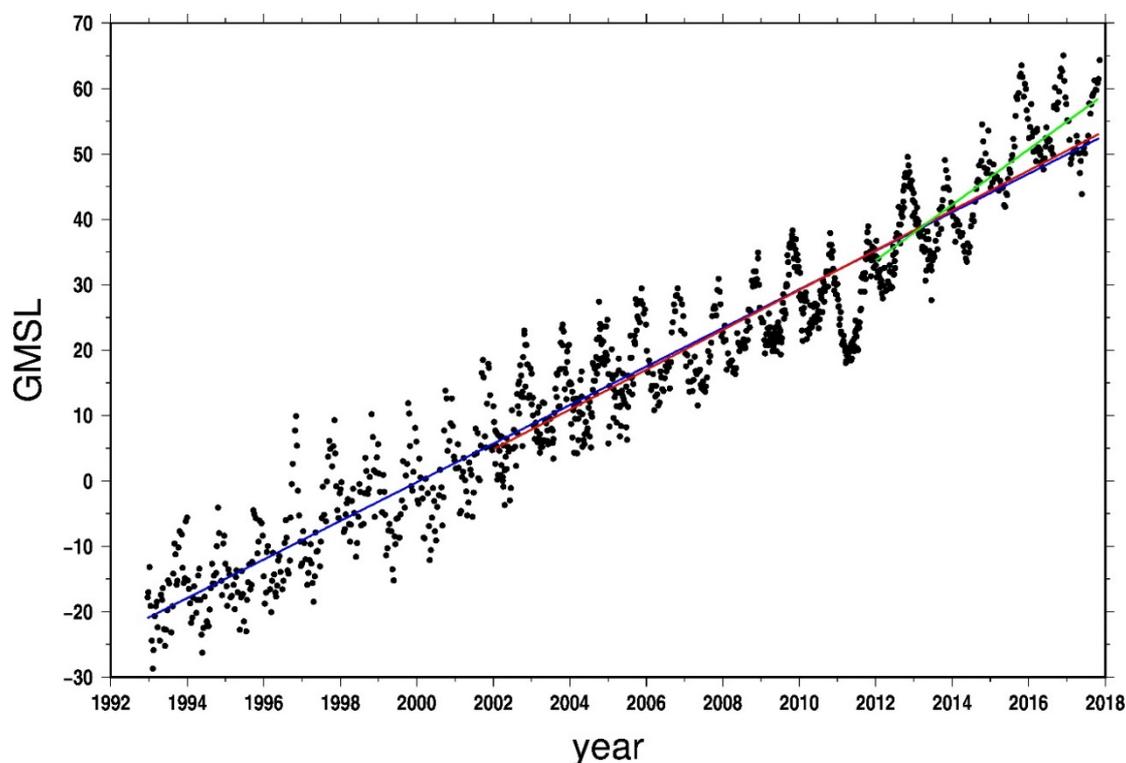


図2-1：最近25年における GMSL の時系列。縦軸の単位は mm である。個々の黒丸が一月毎の GMSL を示す。3本の直線はそれぞれ25年間全体（青）、最近の15年間（赤）、最近の5年間（緑）のデータを平均的な直線として近似したものである。

### 2.3 様々な海域の比較

今度は太平洋、大西洋というように異なる海域での海水準の上昇を比較する。NOAA では独自の分類（図2-2）を行った計24個の海域での平均をとったデータを公開している。本研究では公開されているデータのうち季節変化成分を除去していないものを用いて、各海洋の海水面の変化を直線と季節変化（年周と半年周）の項を持つモデルで近似した。表2-1は各海域でのモデルの傾きを示したものである。

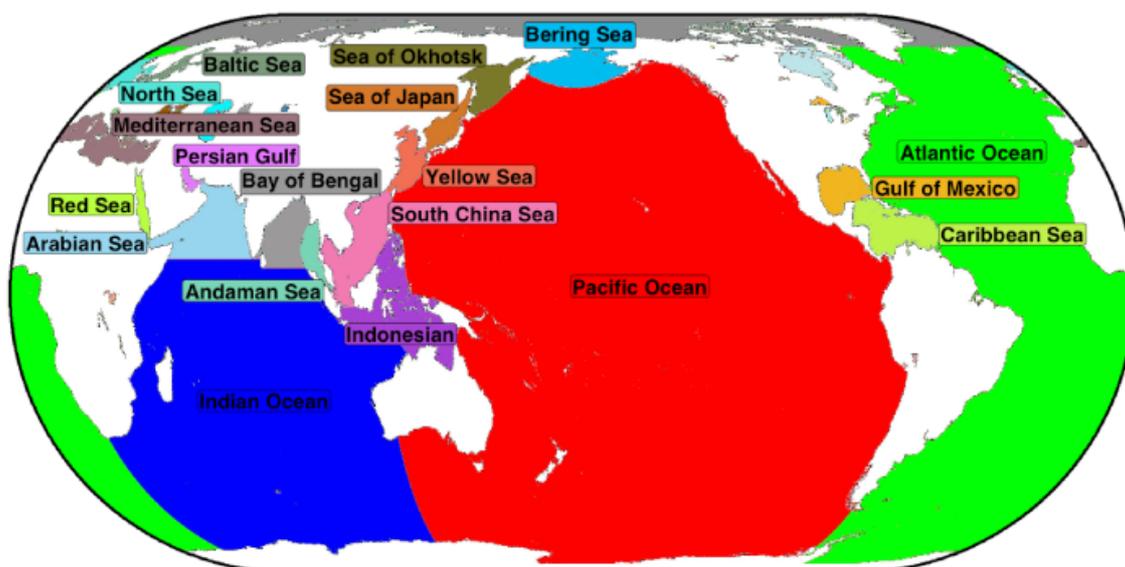


図2-2: NOAA のデータにおける海洋の分類。図で色分けされている海域の他に北太平洋、北大西洋、南極海、および熱帯太平洋の nino3.4の5つがあり、全部で24の海域に分類されている。

海域	変化率 (mm/yr)	誤差 (mm/yr)	季節変化の振幅 (mm)
Indonesian	4.67	0.25	129
南シナ海	4.22	0.13	123
アンダマン海	4.06	0.25	165
ベンガル湾	3.94	0.12	50.9

アラビア海	3.86	0.10	113
インド洋	3.53	0.05	19.9
メキシコ湾	3.44	0.12	132
南半球	3.25	0.03	43.1
日本海	3.20	0.16	149
ペルシャ湾	3.10	0.22	101
Tropics	2.99	0.02	11.7
大西洋	2.92	0.04	27.1
nino34	2.92	0.07	31.7
北太平洋	2.70	0.05	108
カリブ海	2.66	0.10	75.2
太平洋	2.63	0.04	11.0
黄海	2.35	0.16	184
地中海	2.19	0.16	143
オホーツク海	2.15	0.11	34.6
北大西洋	2.10	0.06	110
北海	1.98	0.26	123
バルト海	1.93	0.56	176
アドリア海	1.74	0.21	99.9
ベーリング海	1.69	0.13	52.9
全球平均	2.95	0.02	11.8

表2-1：各海域でのここ25年の海面高の変化率。赤道～北回帰線にかけての範囲にある海域で変化率が大きく、北極に近い海では変化率が小さいという傾向があった。

傾きが最大なのはインドネシアの海や南シナ海などの海域で4 mm/yr を超える上昇を示す。一方傾きが最小なのはバルト海やベーリング海等であり、その上昇率は2 mm/yr を下回る。一般的に北極域に近い海洋では傾きが小さくなる傾向があり、逆に北半球の亜熱帯域にある海洋では傾きが大きくなる傾向があった。また季節変化の振幅という点では、三大洋のような広大な海洋で小さく、日本海などのあまり広くない海で大きい傾向があった。これは

狭い海域では季節が均一で熱膨張による海面高の季節変化がそのまま出るのに対して、太平洋のような南北半球にまたがる大きな海域では季節変化が場所によって異なることが一つの要因であると考えられる。

それではいくつか特徴的な海域での変化を見ていく。まずは半年周変化がよく表れた海域である。図2-3はインド洋東部にあるアンダマン海での海面高変化である。北回帰線と南回帰線の間にある海であるため、太陽高度のピークが年に2回あることを反映して半年周の変化もよく表れている。また、北極に近い海域でも半年周変化が少し現れているものがあった。図2-4はベーリング海のグラフである。

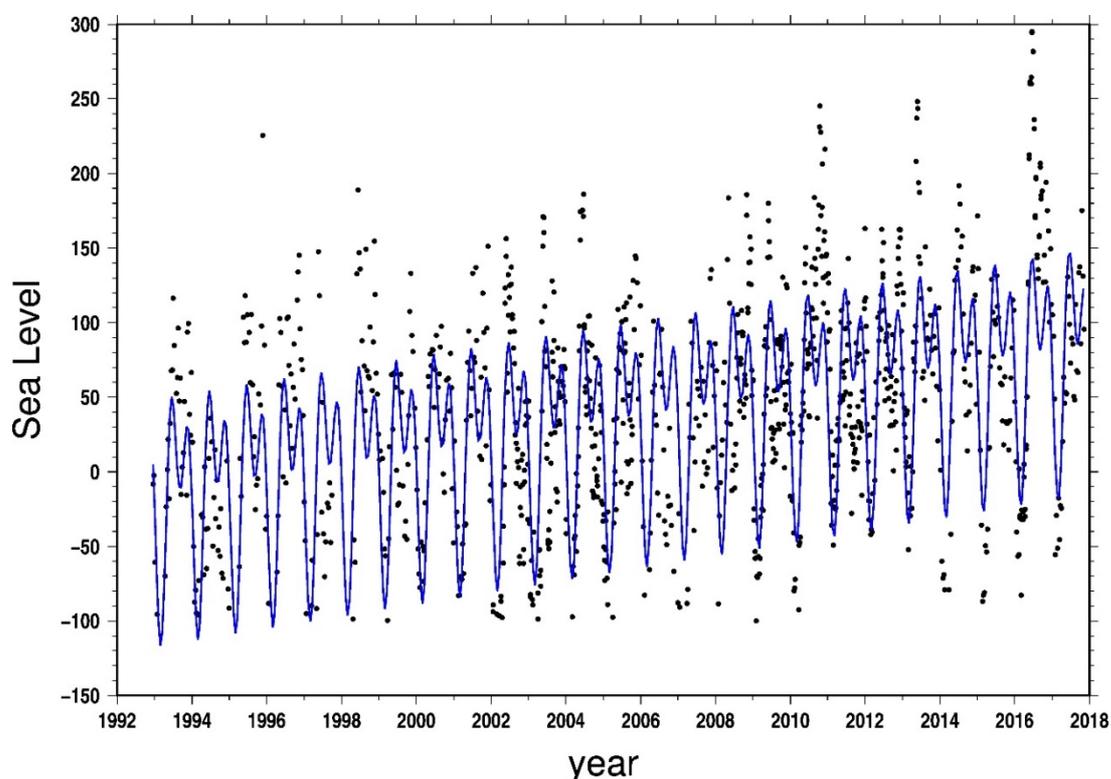


図2-3：アンダマン海での海水準の変化(mm)。年周変化の他に日照時間の変化を反映した半年周のピークもはっきりと表れている。

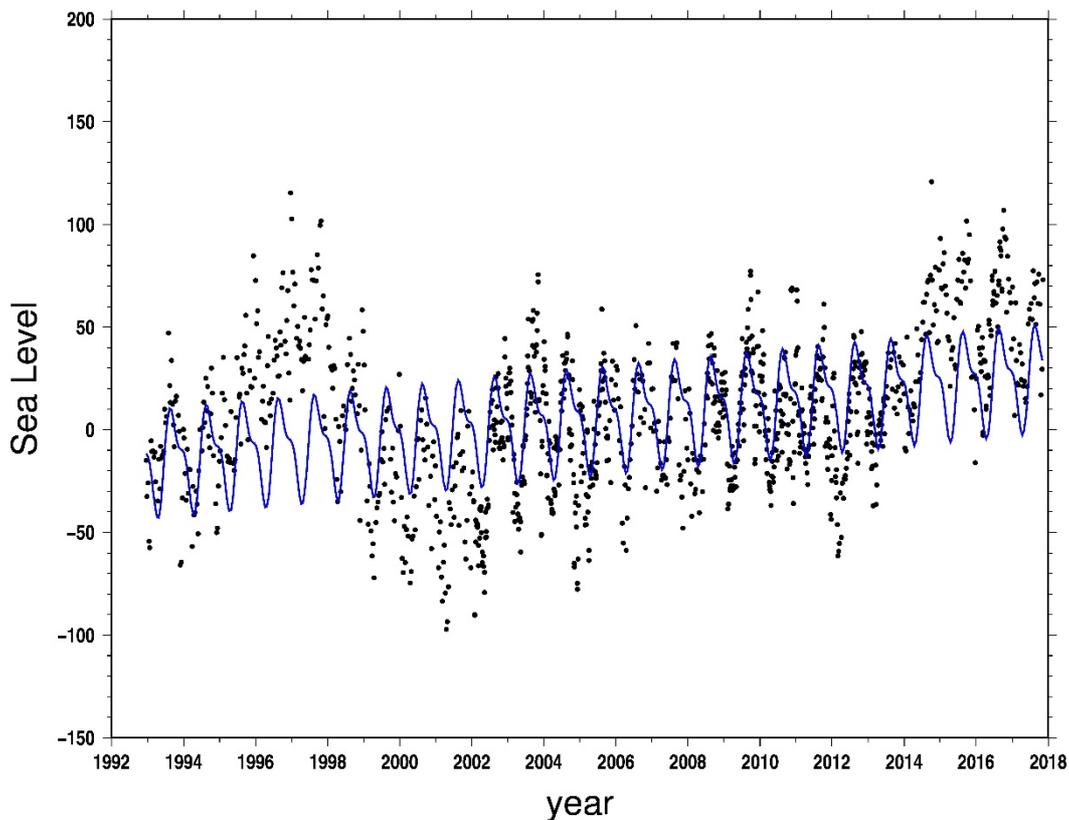


図2-4：ベーリング海での海水準の変化(mm)。1999年～2002年ではモデルを大幅に下回っている。反対に1996年～1998年、2014年～現在はモデルを上回っている。海水温の高い秋の始まりに最も海面が高く、春先が最も低い。11月～1月にかけて海水準の下降が減速する。

次に季節変化の振幅が大きい海域である。図2-5は日本海の海面高の時系列である。先ほど述べた、季節変化の一様性による熱膨張の影響以外に、実際の水の量の季節的な増減もあると考えられる。例えば日本海には中国大陸と日本列島に囲まれているため冬季に降った雪が解けて海に流れ込む。海域が小さいためにこの融雪による海水準の変化もある程度大きくモデルに現れる可能性がある。

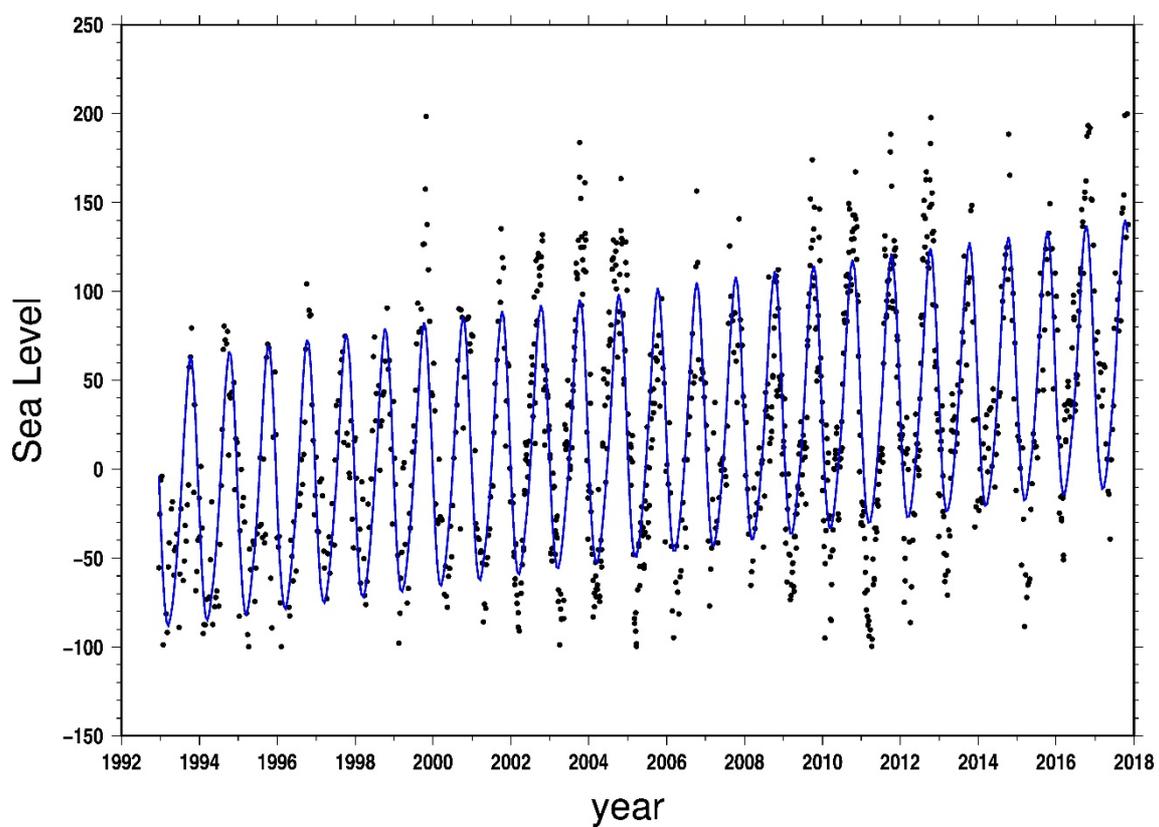


図2-5：日本海での海水準の変化(mm)。季節変化の大きな部分は海水の熱膨張だと思われるが、周囲の大部分を陸域に囲まれた小さな海域では河川からの陸域への流入量も海水準の変化に影響を与えている可能性がある。

最後、図 2-6 に広い海洋である太平洋のグラフを示す。太平洋と大西洋は南北の半球にまたがる海洋のため、季節変動の幅は大変小さい。

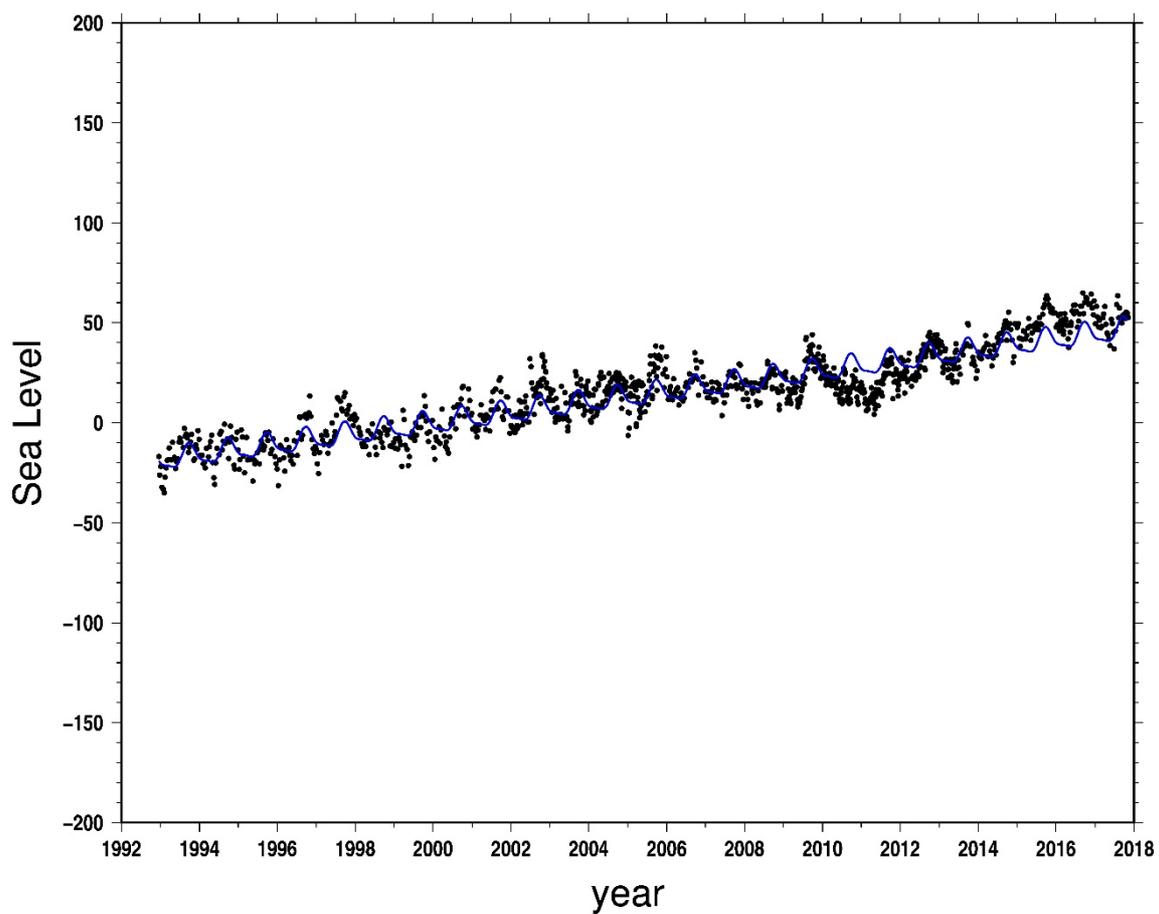


図 2-6: 太平洋全体での海水準の変化 (mm)。モデルからのばらつきは全体的に小さいが、2010～2012 年の間はモデルよりやや小さく、反対に 1998 年や 2015～2016 年にかけてはやや大きい。これは ENSO に伴う海水量の全球的な影響が表れていると思われる。

## 3 ARGO float

### 3.1 データの処理方法

ARGO float によって得られたデータはアメリカ海軍気象海洋センター (FNMO) とフランス海洋開発研究所 (IFREMER) がそれぞれ運営している全球データセンター (GDAC) に送られ、世界中に公開されている。本研究では海洋研究開発機構 (JAMSTEC) で公開されている IFREMER のデータセットを用いる。個々のデータファイルは Net CDF で公開されているが、まず公開されているソフトウェアである NCDUMP を用いて通常のアスキーファイルに変換した。ファイルの各レコードには観測点の位置 (緯度、経度と水深) と観測した量 (水温と塩分濃度) の5つの数値が入っている。今回は塩分濃度を用いず水温のデータを用いる。また ARGO float の数が十分増えて地球の全海域を覆うようになった2005年以降のデータを用いる。

真水は大気圧下では摂氏3.98度で密度が最大となり、単位質量あたりの体積が最小となる。一方、海水は真水と異なり温度が低くなるほど密度が大きくなる。そこで、本研究では以下の方法で海洋での熱膨張による海面上昇量を計算する。全海水が真水での密度最大の状態 (本研究では4度) であった場合に比べ、熱膨張によりどれだけ海面が上昇しているかを計算する。海水の密度を求めるのにあたっては、JFE アドバンテック (株) の HP (<http://ocean.jfe-advantech.co.jp/sensor/img/density.pdf>) に掲載されているパラメータ・計算式を用いた。この計算式では塩分濃度も任意の値にすることができるが、今回の計算では35‰に統一する。本研究では海水の底面積は一定で、熱膨張は海面高の上昇によって吸収されると仮定した。ARGO float では原則水深2,000m までしか観測を行っていないため、本研究においては水深2,000m 以下での熱膨張量は考慮しないこととする。水温についても全ての深さで観測を行っていないので、次のように仮定して計算する。水深  $A, B, C$  (単位は全て m,  $A < B < C$ ) での水温がそれぞれ  $a, b, c$  であったとする。この場合、水深  $(A+B)/2$  から  $(B+C)/2$  までの範囲は全て水温が  $b$  であると仮定する。

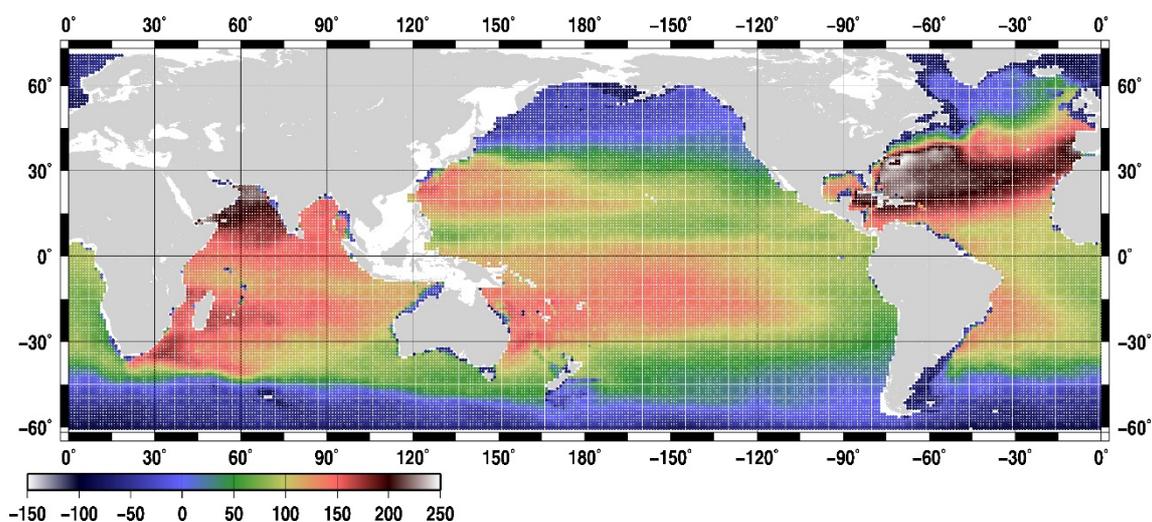


図3-1：2016年1月の全海洋での海面の熱膨張による上昇量（海水の温度をすべての深さで摂氏4度としたときの値からの差）を示した（単位 cm）。

以上の仮定を行うと、 $(C-A)/2$ に温度  $b$  における密度と真水での最大密度との差をかけた値が水深  $B$  の領域での熱膨張量を表している。この計算を観測した深さ全てで行った値を合計すると、ある観測点での熱膨張量による海面高変化を求めることができる。例として、図3-1は2016年1月での熱膨張量を表したものである。

### 3.2 時系列比較から見る海洋現象

図3-1のような各月での熱膨張量の地図を比較することで、海洋の特徴的な現象を視覚的に捉えることができる。図3-2は2005年1月と2007年1月の熱膨張による海面高度の差である。日本近海では、2004年から2005年にかけて日本南側を流れる黒潮の大蛇行が発生していた。大蛇行による日本列島太平洋沿岸での冷水塊の発生が見て取れる。また、図3-3は2016年1月（El Niño 発生時）と2008年1月（La Niña 発生時）の比較図であり、太平洋赤道域の東西での El Niño/La Niña 現象に伴う海水温の変化の特徴が表れている。

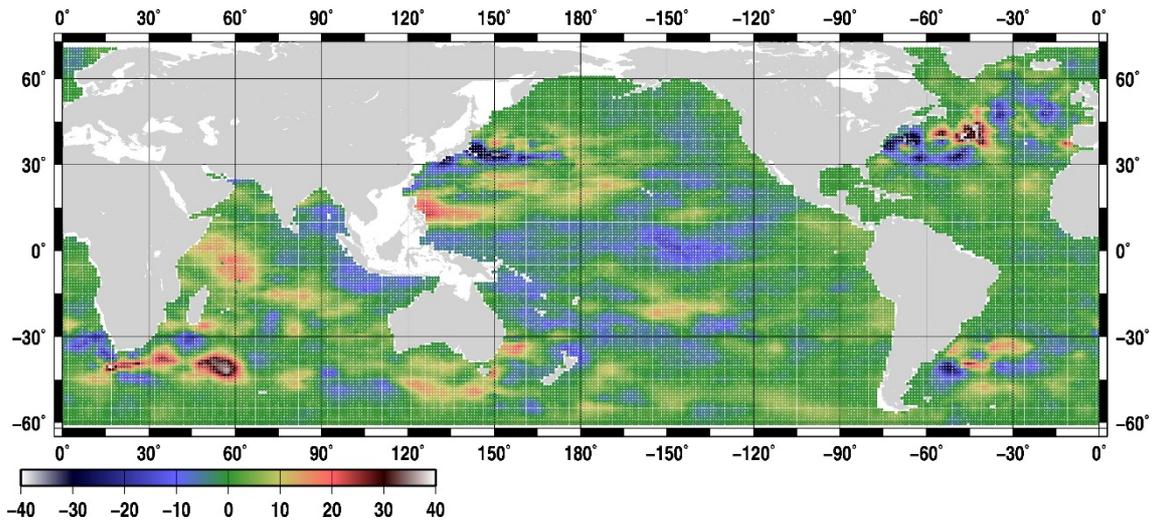


図3-2：熱膨張による海面高度の差を（2005年1月の値）－（2007年1月の値）として示したものの。2005年における黒潮の蛇行に伴う冷水塊が日本列島の南に見えている。

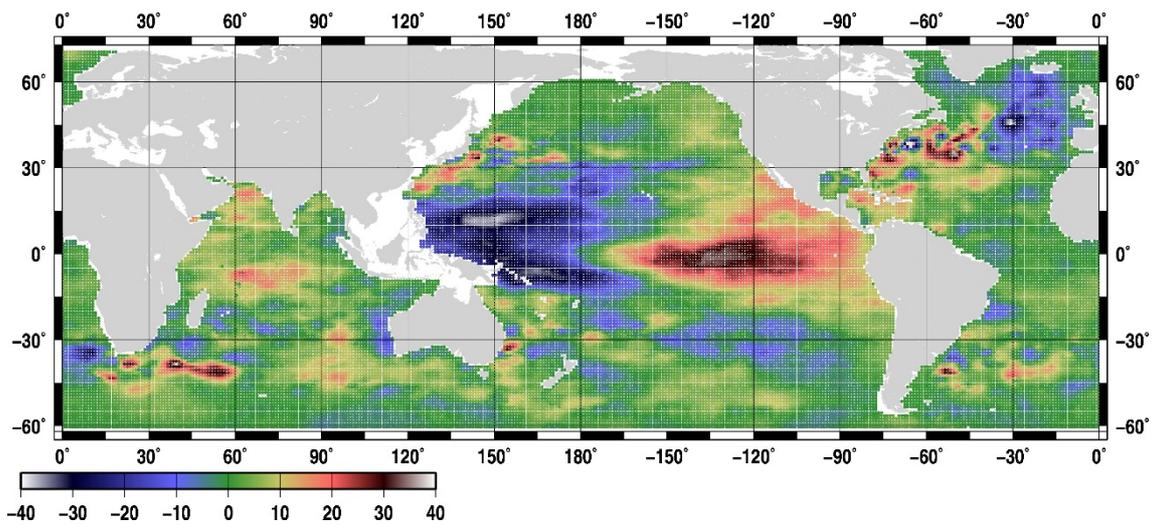


図3-3：熱膨張による海面高度の差を（2016年1月の値）－（2008年1月の値）として示したものの。太平洋赤道域には ENSO に伴う顕著な熱膨張による海面高の高低（東部で海水温の上昇、西部で下降）が見られる。また大西洋の北部やインド洋でも様々なパターンが表れている。

### 3.3 過去12年での海洋の熱膨張

各月毎の海水温から計算された海面高を時間の順番に並べて時系列を作ると、その傾きから海水温の変化による海面高変化を求めることができる。図3-4は2005年から2017年までのデータを用いて求めた熱膨張による海面高変化率である。全体に一樣な変化率が見えるのではなく、海域による差が大きく表れている。特に大西洋北部では近接した海域でも大きく異なる値を示すことがある。大西洋の変化率は非常に幅が生じているが、これには気候変

動が作用していると考えられる。太平洋でも東部と西部で大きなコントラストが生じている。また、日本東岸の太平洋域、アメリカ東岸や南アフリカ東岸などの西岸境界流の流域で目立つ正の変化率が出ている。これは20世紀以降、西岸境界流域における水温上昇率が全球平均よりも高いことが表れていると考えられる。(Wu, L et al. (2012))

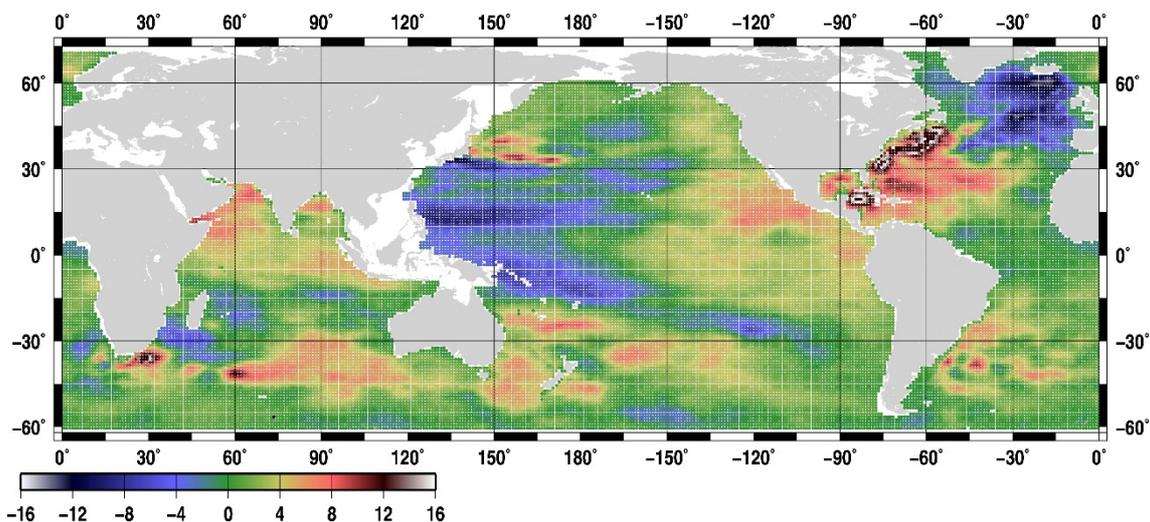


図3-4：世界中の海域の一度毎のグリッド点における、最近12年の海水温変化による海面高の変化率を示した（単位は mm/yr）。太平洋赤道周辺や大西洋北部では東西のコントラストが強く表れている。

次に、いくつか特徴的な海域について、最近12年間の海水温変化による海面高の変化の時系列を見ていく。以下示すグラフでは、黒丸が ARGO float の月ごとの海水温から計算した値、赤い曲線が直線変化と季節変化（年周+半年周）を仮定して推定したモデルである。図3-5はインド西部沖（N20.5,E65.5）での変化である。全体的にはばらつきが大きく、ほかの場所に比べ半年周での変化が顕著に表れている。これは北回帰線と南回帰線に囲まれた地域では太陽高度のピークが年に二回生じることを反映している。次に示す図3-6は大西洋北部（N48.5,W27.5）のグラフである。全体的に減少傾向であるが、2014～2016年にかけて一時的に大きく減少している。

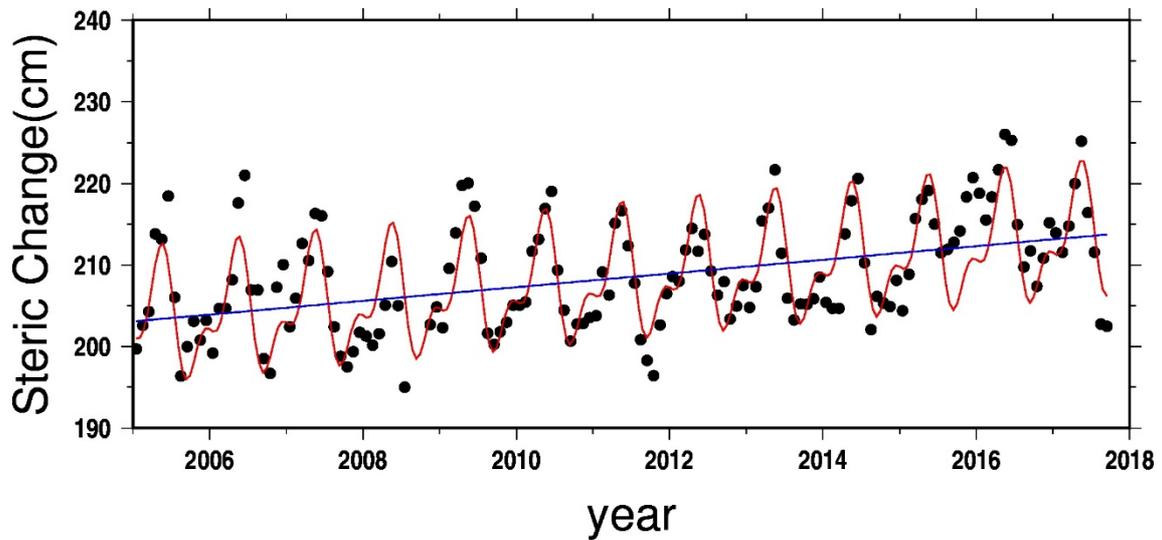


図3-5: インド西部の海 (N20. 5, E65. 5) での2005年からの熱膨張量の変化を示したグラフ。この海域での平均的な変化率は $8.56 \pm 0.94$  mm/yr である。

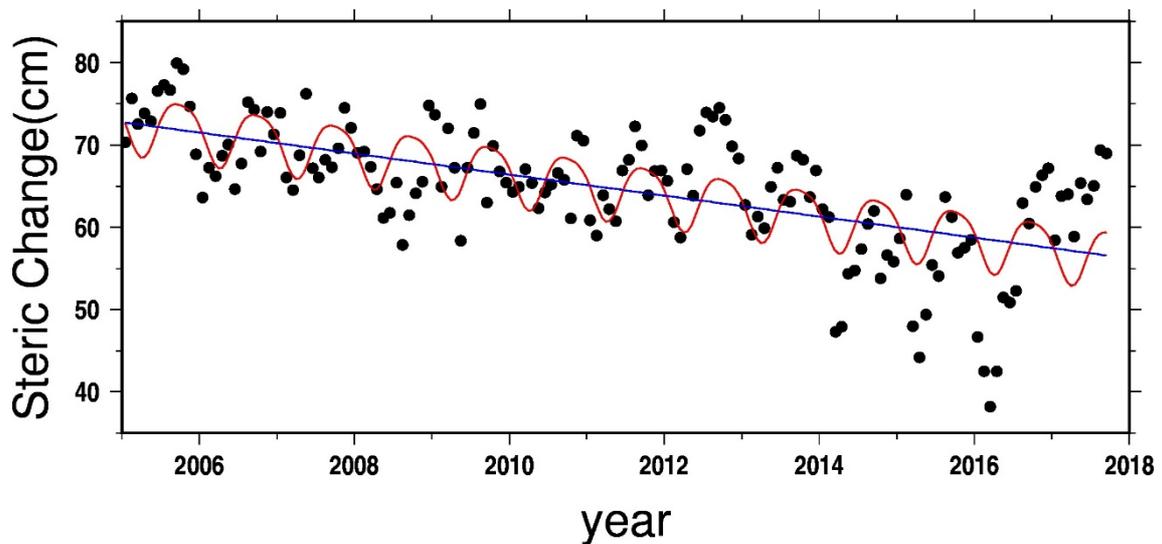


図3-6: 大西洋北部 (N48. 5, W27. 5) での熱膨張量のグラフ。この海域での平均的な変化率は $-12.96 \pm 1.22$  mm/yr である。

最後に、全世界での平均をとったデータを示す。局地的には海面高の上昇を示す海域と下降を示す海域が混在しているが、全海域の平均は地球温暖化を反映して正の値(海面高の上昇)を示している。ここで求めた平均的な直線変化の傾きは  $1.36 \pm 0.04$  (mm/yr) であった。これは前の章で求めた衛星搭載海面高度計による過去25年間の平均的な海面高の変化率の約45%に相当する。

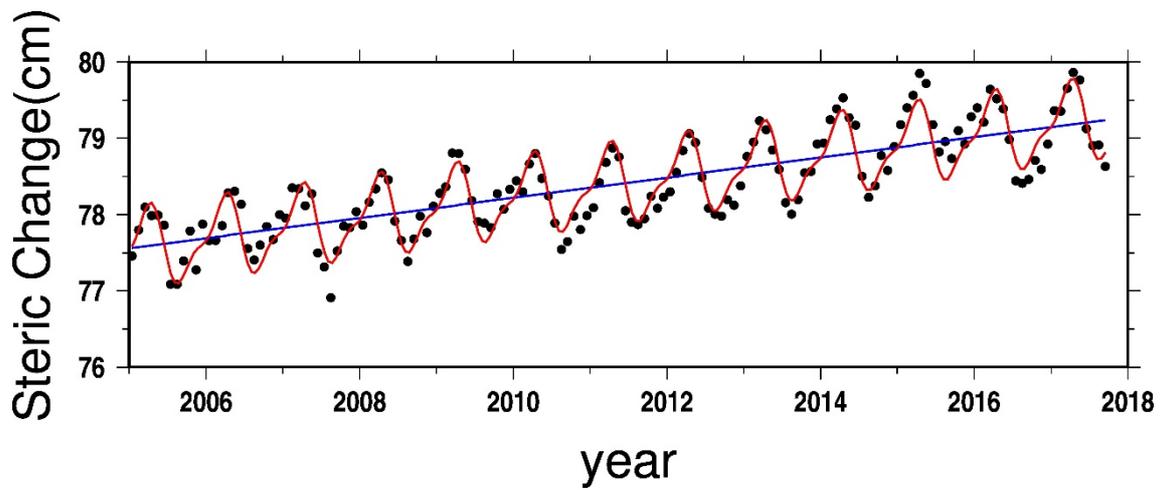


図3-7：全海洋での平均の熱膨張量の時系列を示したグラフ。青線は直線変化、赤線は「直線+季節変化」のモデルをそれぞれ表している。この12年間では熱膨張により約2cm海面が上昇したことがわかる。

## 4 ENSO と各パラメータの関係

### 4.1 比較する指標

本章ではほかのパラメータとの比較に用いる ENSO 指標は、D-SST (Difference in Sea Surface Temperature) と呼ばれる特定の地域における海面温度の異常である。これは「1.3 ENSO」で述べた気象庁が El Niño/La Niña の監視指数として用いているものである。太平洋には大きく分けて4つの El Niño 監視海域が設けられている (図4-1上)。このうち、気象庁が用いている D-SST は NINO.3海域での海水温である。本研究で用いる NINO.3海域の D-SST のデータは気象庁の HP ([www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/db/elnino/index/datab.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/db/elnino/index/datab.html)) から取得した。

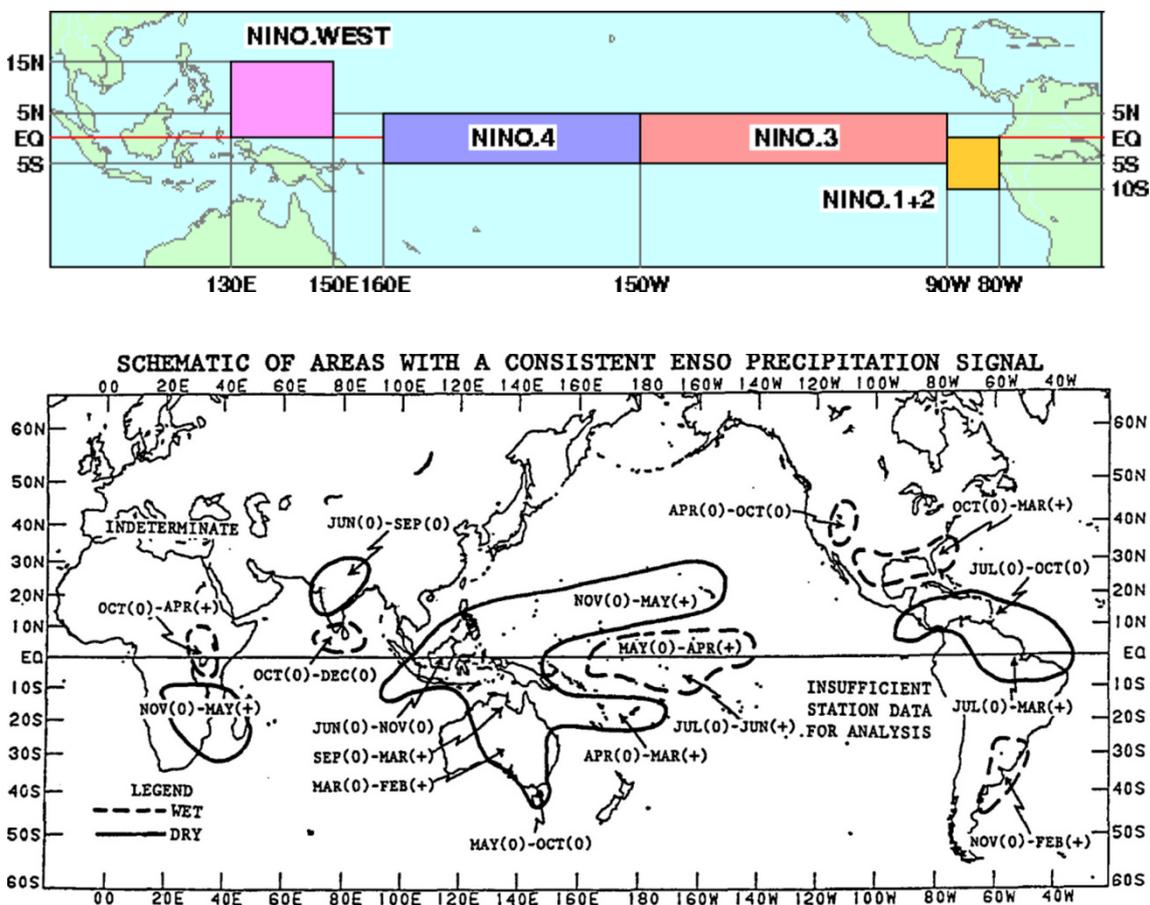


図4-1：(上) 気象庁の定義する El Niño 監視海域の地図。これらの中から NINO.3海域の海水温異常を使用する。気象庁 ([www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo\\_hp/elniinyo.html](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/elniinyo.html)) の図。(下) Ropelewski and Halpert (1987)による、El Niño 時の降雨異常の平均的な分布。実線と破線で囲まれた地域で ENSO 発生時に降雨がそれぞれ減少、または増加する。オーストラリアでの降雨の減少は全球海面高度の増加につながる。

## 4.2 GMSL

図4-1下に Ropelewski and Halpert (1987)による、ENSO 発生時の降雨異常の分布を示す。La Niña の発生時はほぼこれと逆パターンの降雨異常が生じると考えられている。Fasullo et al. (2013)の研究にあるように、ENSO は陸域と海域での降水に影響を与え、GMSL の増加に擾乱を引き起こしている。これは、例えば2010年から2011年にかけて La Niña が発生し、それに伴って増えたオーストラリア大陸における降雨が砂漠の地下に貯留されることによって、全球の海面高度が下がるという現象として現れる。

本研究では、GMSL のゆらぎと NINO.3海域における D-SST の相関を調べてみた。GMSL のゆらぎは、衛星高度計による GMSL の時系列を「直線+季節変化」で近似し、データのモデル曲線からの差として求めた。また平滑化のため、それらの移動平均（前後1ヶ月とその月の値を1:2:1の重みで移動平均をとった）を求めた。それらの値と、ENSO 指標の NINO.3 の D-SST を比較した（図4-2）。両者には正の相関が見られるが、極端に大きな D-SST に対しての GMSL 残差は頭打ちとなっており、単純な比例関係ではない。

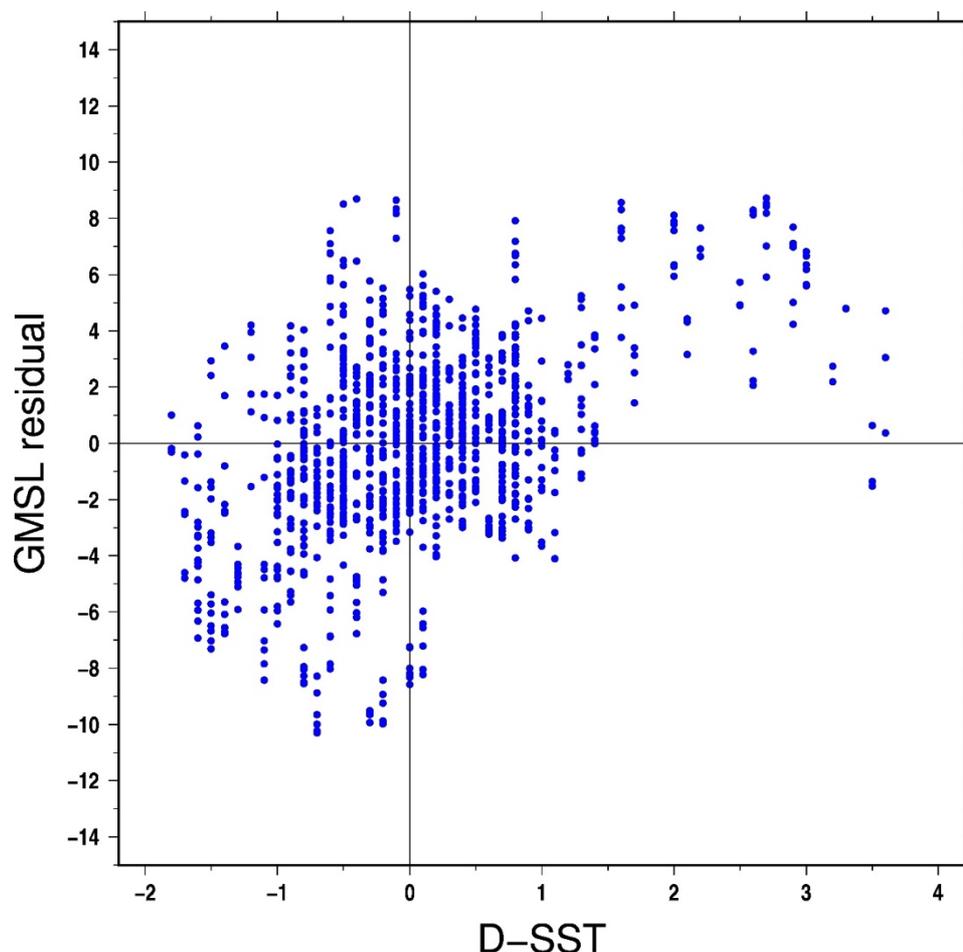


図4-2 : NINO.3の D-SST と GMSL 残差の関係。両者の間には正の相関があることがわかる。

### 4.3 各海域の海水準

GMSL と同様に、世界の海をいくつかの異なる海域に分けた時の、それらの海域における衛星高度計データに基づく海水準の変化についても ENSO との関係を調べてみた。まず正の相関があった海域として、図4-3に NINO.3.4海域での相関を示す。NINO.3.4は図4での NINO.3、NINO.4海域の間にある海域である。この海域は El Niño 時に温度が高く、La Niña 時に低いことが知られている。図4.3で明らかなようにこの海域の海水準は D-SST と強い正の相関を持っていることがわかる。これは主に海水温度の増減による熱膨張が海面高に現れているのだろうと思われる。

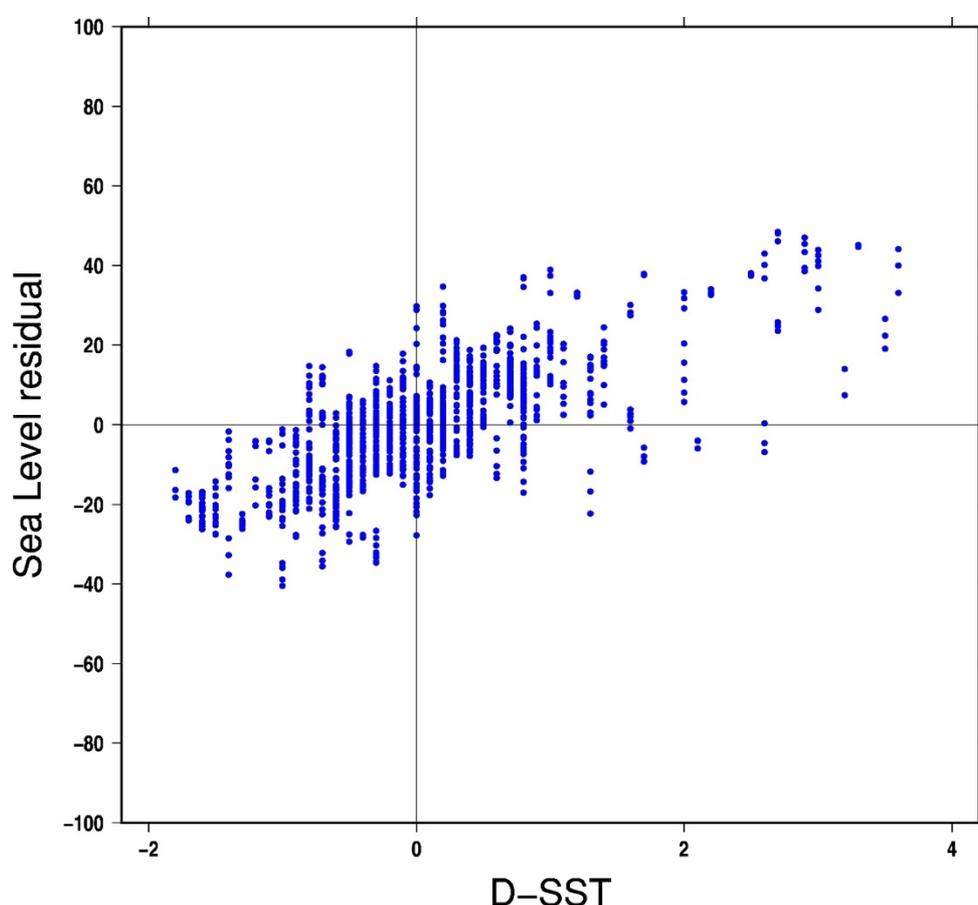


図4-3 : NINO. 3. 4海域での相関を示したグラフ。両者の間には強い正の相関が見える。

次に負の相関があった海域として図4-4にインドネシア近海の例を挙げる。El Niño 時にはインドネシア近海では海水温が下がり、La Niña 時には反対に海水温が上がるため、熱膨張によってこのような負の相関が生じていると考えられる。

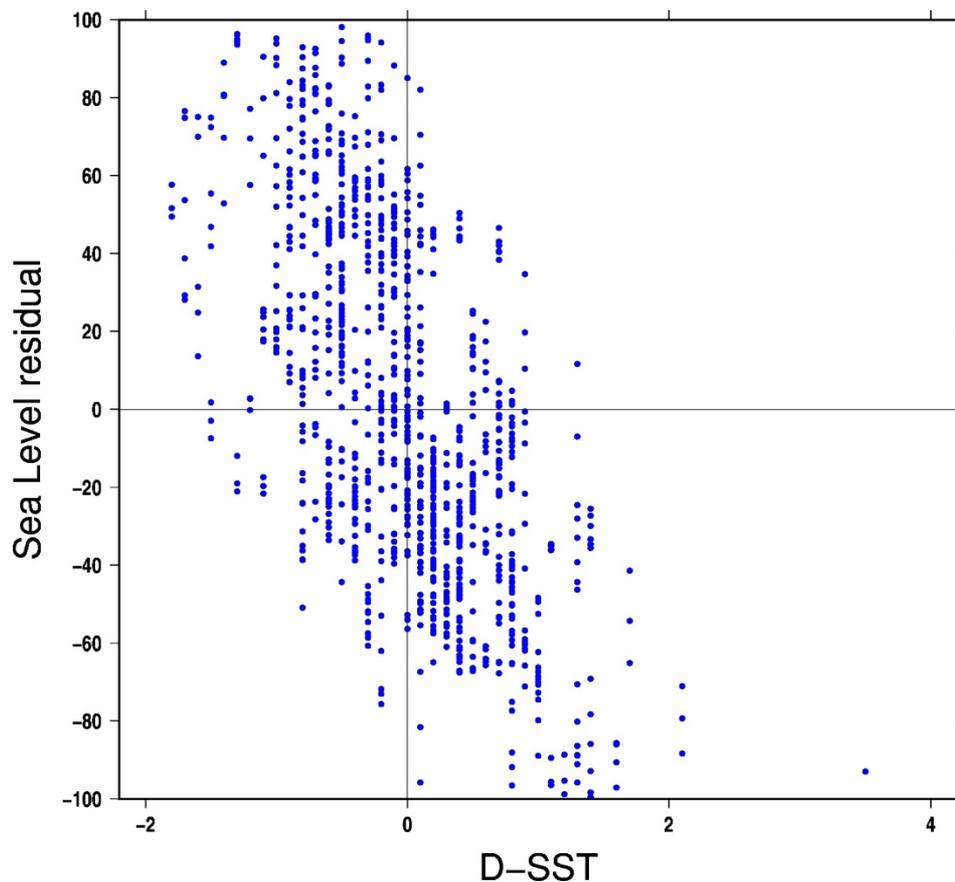


図4-4：インドネシア近海（図2-2での Indonesian）での海水準の残差と NINO. 3. 4海域の D-SST との相関を示したグラフ。傾きの大きな負の相関が顕著である。

最後に全く相関がみられなかった海域として図4-5に日本海の例を示す。北日本を除く日本列島太平洋側では、ENSO 発生時は冷夏や暖冬になるという ENSO の遠隔相関が有名であるが、日本海の海水温や海面高度には El Niño/La Niña による降水異常や海水温異常は生じていないことがわかる。

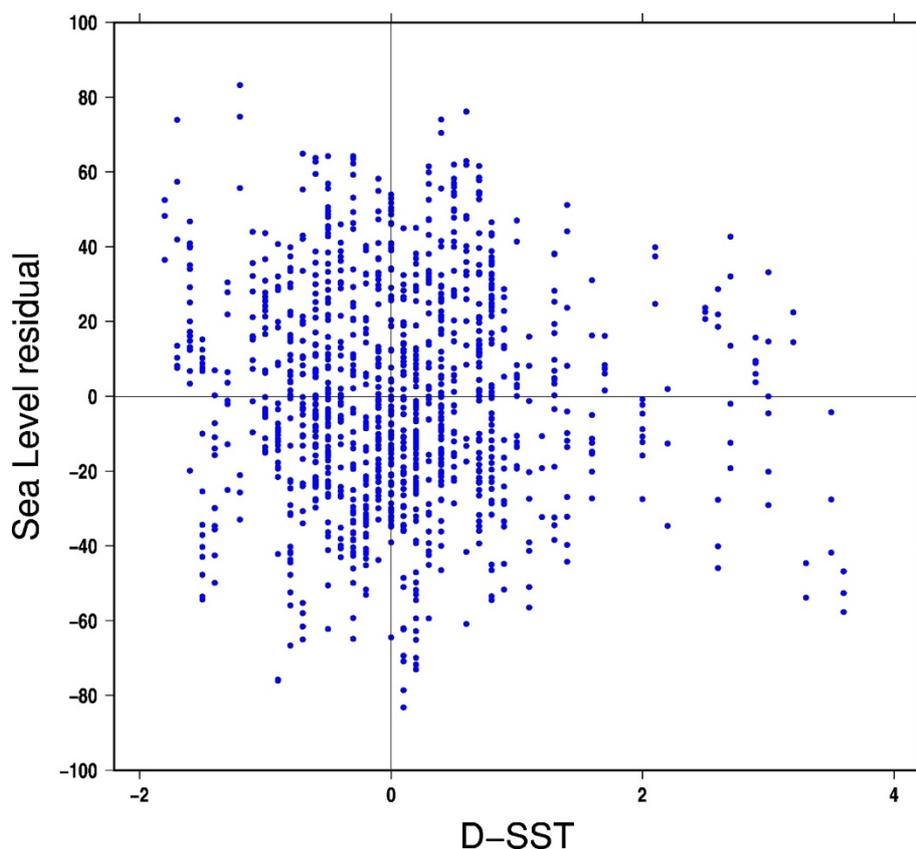


図4-5：日本海の海水準の残差と NINO.3における D-SST との相関。両者は無相関である。

#### 4.4 熱膨張量

「1.3 ENSO」で述べたように El Niño/La Niña 現象は、本来太平洋の特定の海域の海水温が変化する現象である。そのため、Argo float の海水温プロファイルの観測データに基づく熱膨張による海面高の変化との関係についても NINO.3の D-SST との関係調べた。本研究では図3-7を描くために用いた全海域の熱膨張による海面高変化の平均値の時系列データを取り上げ、データのモデルからの残差を NINO.3の D-SST を比較、それらの相関を図4-6に示す。その図からは、El Niño/La Niña 時には世界の平均的な海水温が温かく/冷たくなることを示している。それらの現象時には特定の海域で海水温の上昇や下降が生じるが、世界中の平均をとると、海水温に関しては暖くなる方向に作用するということがわかる。

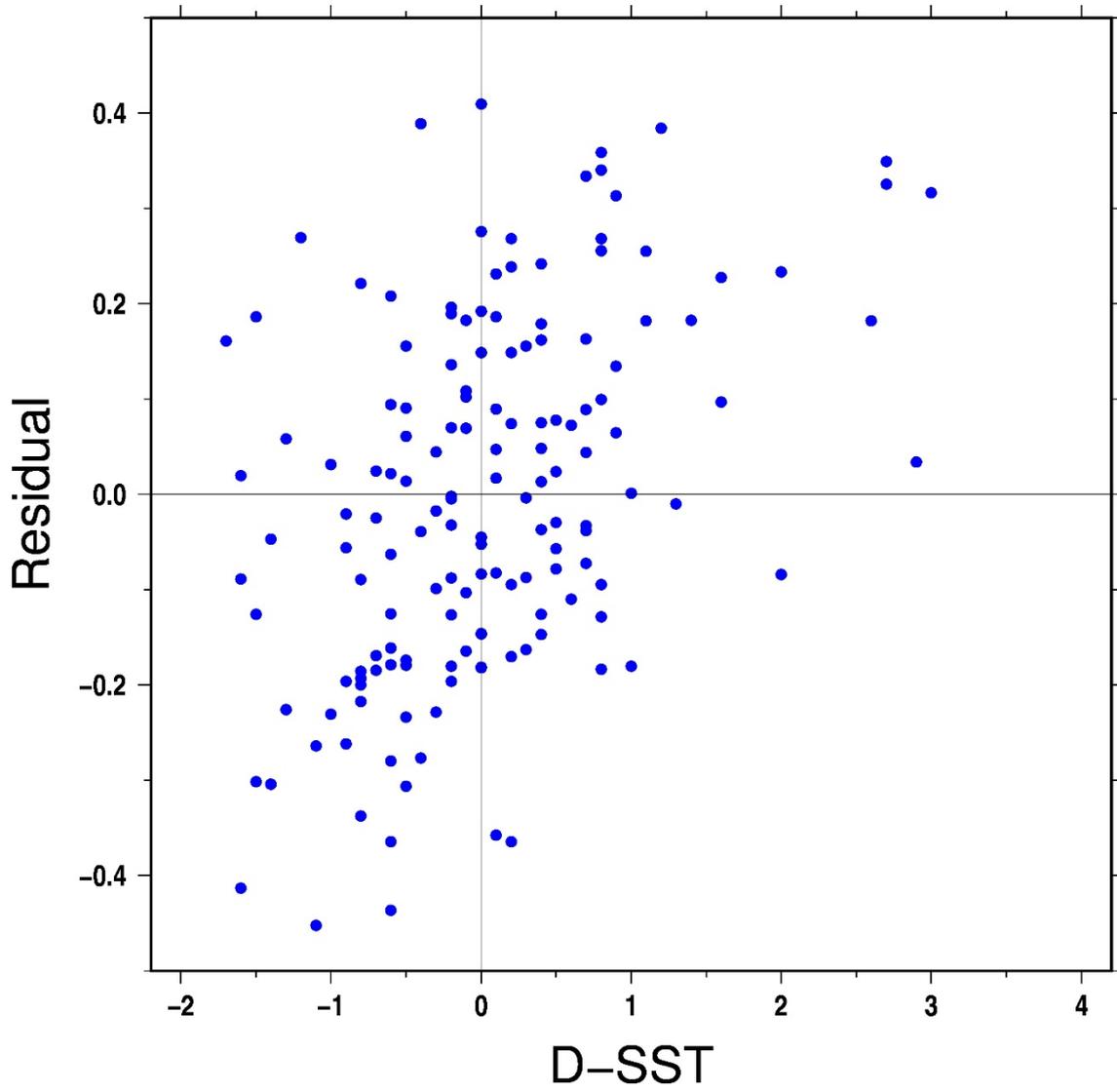


図4-6：海面の熱膨張量と D-SST の相関を示したグラフ。残差の絶対値は海水準のものとは比べ小さいが、正の相関が確かに存在する。

## 5 ENSO 指標による GMSL データの補正

### 5.1 ENSO 補正を加えるモデル

GMSL の近年の上昇の主な原因は地球温暖化によるものである。つまり、ENSO による海水準への影響は一時的なものであり、ゆっくりと着実に進行する GMSL の上昇を考えるにあたって「ノイズ」に相当する。GMSL の将来の上昇量を見積もる際には、単なる直線的な増加率に加え、それらの加速が重要になる。加速度項のわずかな違いが、長い時間幅では非常に大きな違いとなって表れるからである。しかしこのノイズの存在によって、GMSL の上昇モデルでの加速度項が非常に不明瞭になっている。この章では ENSO による影響を除くことで加速度を含む GMSL の上昇のより正確なモデルが作れるかを議論する。

補正の方法としては、「4 ENSO と各パラメータの関係」にあるように、ENSO 補正のない GMSL のデータに対してモデルを作り、モデルからの残差と ENSO 指標である NINO.3 海域の D-SST を比較する。用いるモデルは、直線変化と季節変化を考慮したものを用いる。そして、GMSL データのモデルからの残差と NINO.3 の D-SST の相関を調べ、両者の間に線形関係を仮定してモデルを作る。さらに、その相関モデルと D-SST の値を用いて GMSL のデータの ENSO 補正を行う。ここでは GMSL のデータは NOAA のものを利用する。

### 5.2 補正とその結果

まず、図 5-1 にモデルからの GMSL の残差と NINO.3 海域の D-SST の関係を表したグラフを示す。この相関関係を表す最適な直線モデル (赤) の傾きは 1.7 (mm/degree) であった。このモデルを用いて「D-SST が  $t$  (degree) の場合は GMSL データに  $1.7 \times t$  (mm) を加える」補正を GMSL データに対して行う。

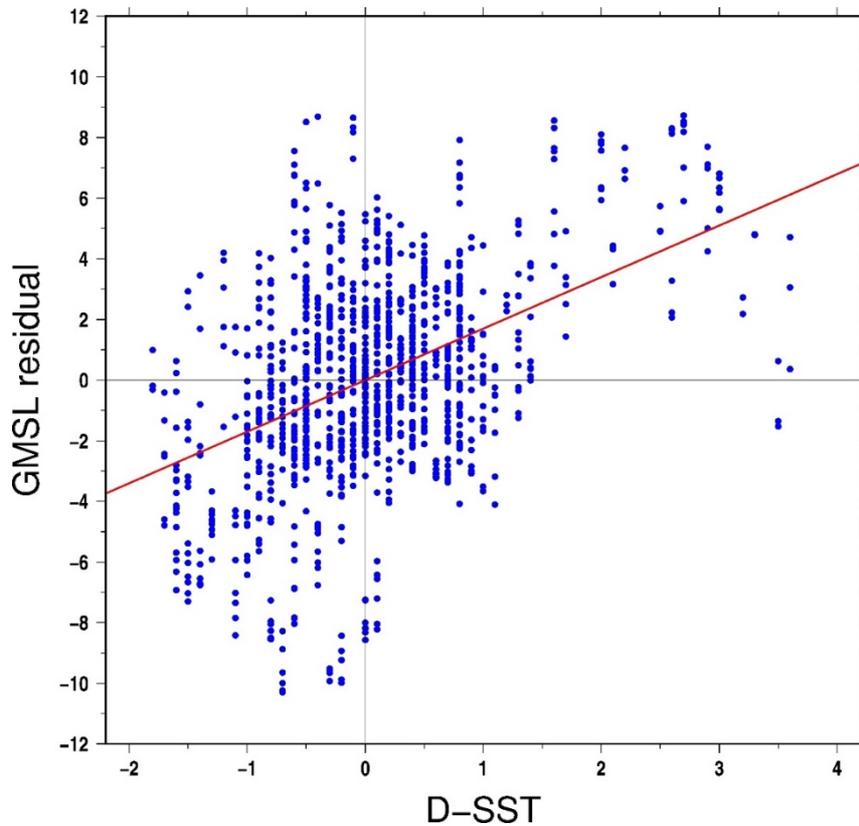


図 5-1 : GMSL 残差と D-SST の相関モデル (横軸 degree・縦軸 mm)。赤い直線が両者の線形関係を仮定した時の最適直線。

補正を行ったデータを図 5-2 に示す。また、残差についての補正前後の GMSL の残差の値および NINO.3 の D-SST の値のグラフを図 5-3 に示す。補正の前後で 1998 年や 2016 年の El Niño に伴う残差の正のずれはかなり効果的に補正されたことがわかる。一方、2010-2011 年の La Niña に伴う残差の負のずれの補正にはあまり効果が見られない。これは Fasullo et al. (2013) が述べているように、この時の降雨域の変化には La Niña だけではなく IOD (インド洋双極子) や SAM (南極振動) などといった ENSO 以外の気候変動の関与が大きいからであると考えられる。

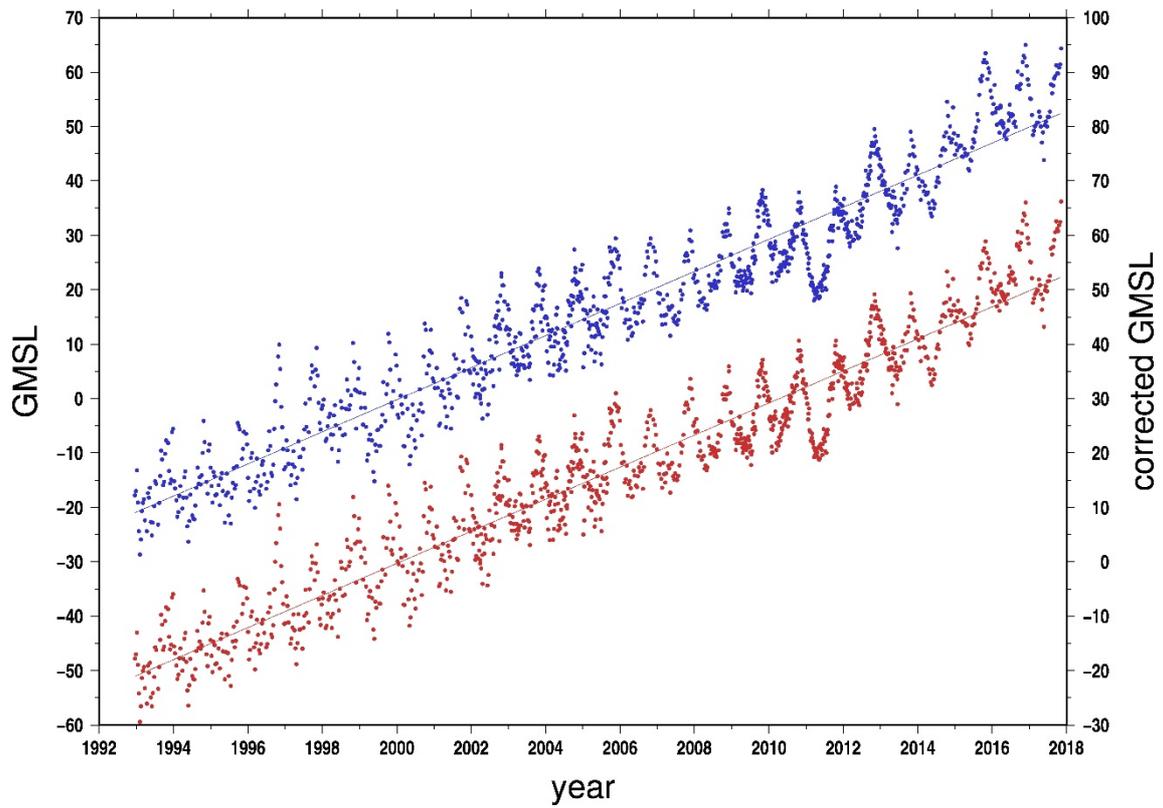


図 5-2 : ENSO 補正を行う前の GMSL データ (左軸・青) と補正を行った後の GMSL データ (右軸・赤) (単位 mm)

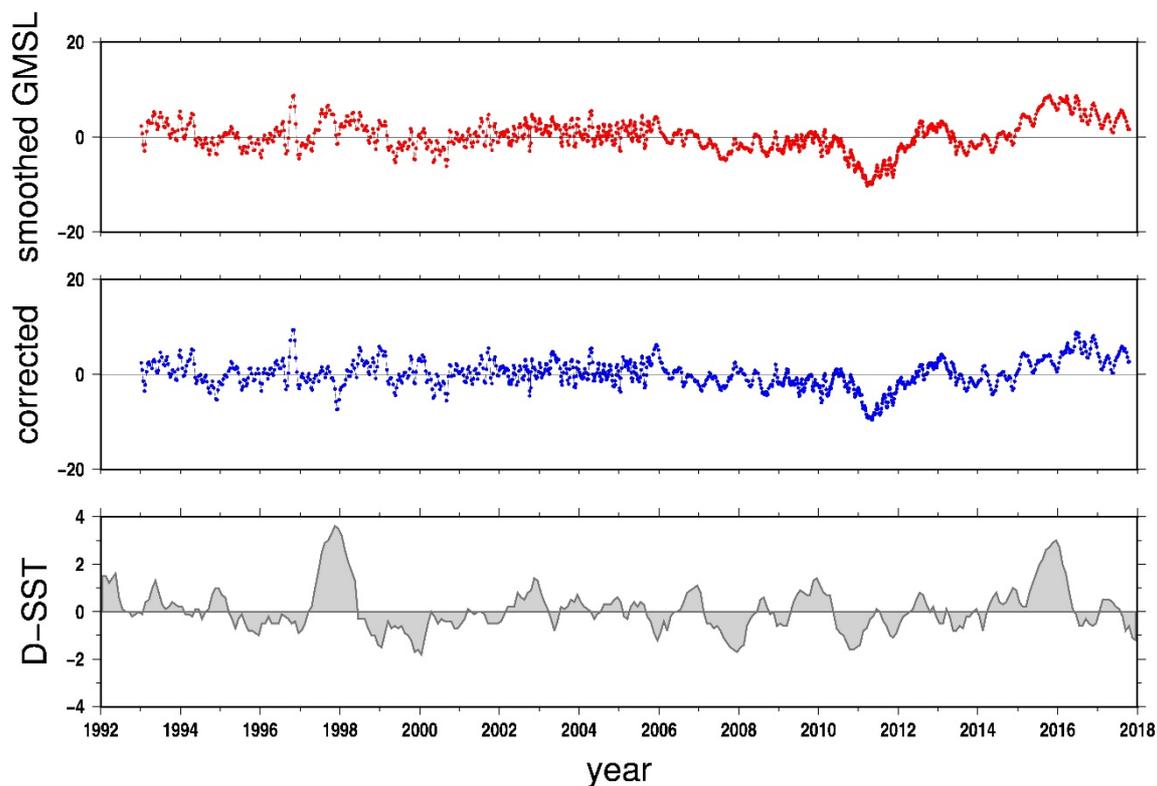


図 5-3 : ENSO 補正前後の GMSL のモデルからの残差 (上段、中段・単位 mm) と D-SST の値 (下段・単位度)

この補正を行う前後のそれぞれの GMSL データにモデルを当てはめた時の時間変化の項の 1 次項と 2 次項の係数の推定値を表 5-1 に示す。今回の補正によって 1 次項 (直線) では誤差は異なるが値はほぼ同じ出会った。一方 2 次項は  $0.005 \text{ mm/yr}^2$  だけ変化した、誤差を考えるとそれほど有意な違いとは考えられない。

表 5-1 : ENSO 補正を行う前後での GMSL データへの「直線+季節変化+時間の 2 次」モデルフィットの結果。

	一次項 (mm/yr)	誤差 (mm/yr)	二次項 (mm/yr <sup>2</sup> )	誤差 (mm/yr <sup>2</sup> )
補正前	2.94	0.02	0.026	0.003
補正後	2.94	0.02	0.021	0.003

## 6 データセットの違い

### 6.1 グラフ及び解析結果の比較

ここまで2章、4章および5章で GMSL の解析をする際にアメリカ大気海洋局 (NOAA) が公開しているデータセットを用いた。この章では NOAA とは別に GMSL のデータを公開している CU (コロラド大学) のデータを NOAA のデータ同様に解析を行い、データセットの違いによる解析結果の差異について考察する。以下の記述で用いるデータは CU のページ (<http://sealevel.colorado.edu>) より取得したものである。なお、2018年1月現在、CUで公開されている海面高のデータは2016年6月までのものである。

まず、図 6-1 で衛星海面高度計の稼働開始以来の GMSL の変化を示す。図 2-1 と同様に青、赤点線、緑の3つの線で過去25年、15年、5年のデータでの直線近似を表した。これらの直線の傾きはそれぞれ  $3.40 \pm 0.03$  mm/yr、 $3.39 \pm 0.06$  mm/yr、 $5.76 \pm 0.33$  mm/yr であった。誤差はデータとモデルの差を反映させた標準偏差である。傾きの値は期間によって有意に異なる。例えば2012年以降のデータを用いて得られた傾きに関しては、データ最終年の2016年に El Niño に伴う海面の一時的な上昇があったために、傾きが大きくなったと考えられる。

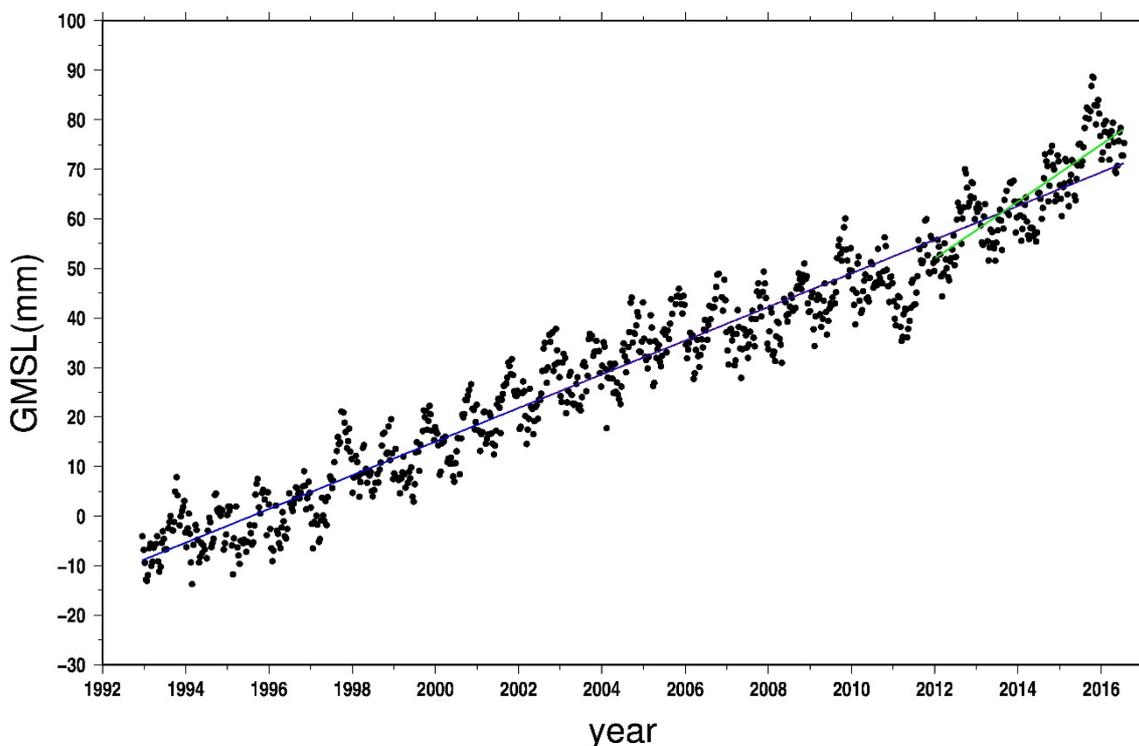


図 6-1 : CU で公開されているデータを用いて描いた GMSL の時系列。過去 25 年、15 年、5 年のデータを直線近似したものを青、赤点線、緑の 3 つの線で表示した。

CU でも NOAA と同様に独自の分類に基づいた海域ごとの海面高変化を公開している。(図 6-2) 各海域での海水準変化率等の推定結果を表 6-1 に示す。全球平均と個々の海域で変化率が有意に異なることが多い。CU のデータでも、NOAA と同様に、熱帯、亜熱帯域の海域で傾きが大きく、北極に近いほど傾きが小さくなるという海域ごとの特徴が表れている。

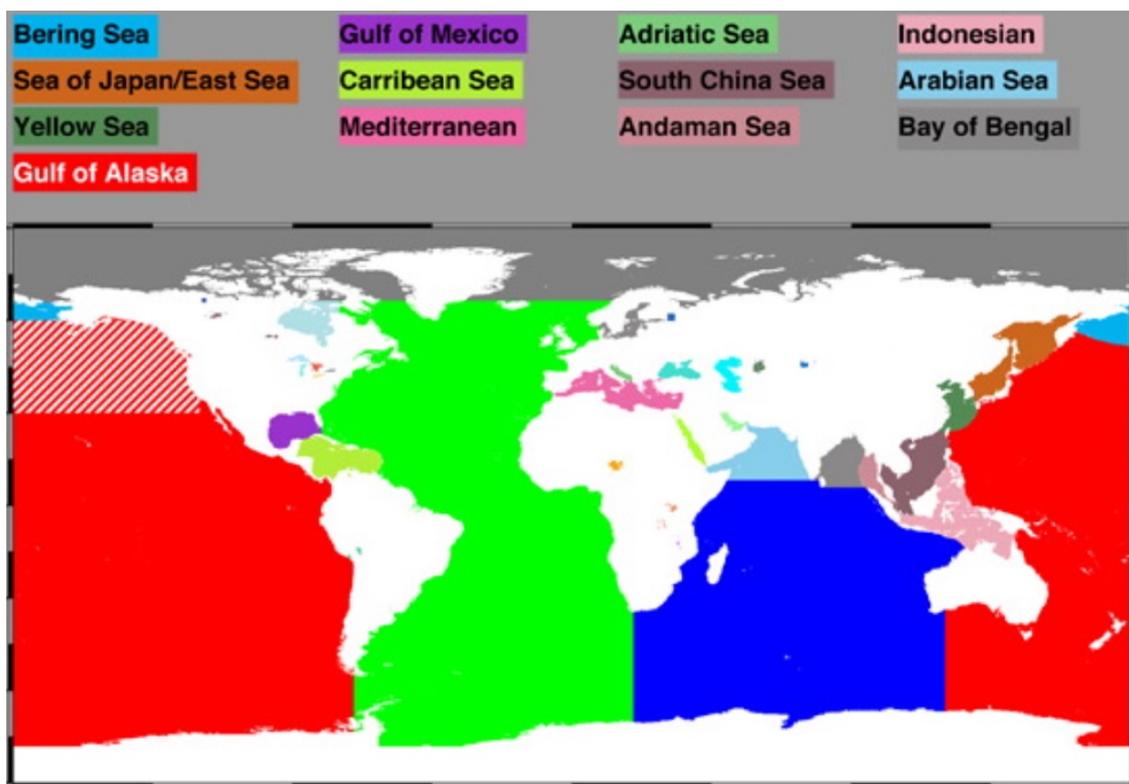


図 6-2 : CU による海域の分類。NOAA での分類と多少異なっている。北半球や南半球、三大洋なども含め合計 20 個の海域のデータが公開されている。

表 6-1 : 各海域でのデータを「直線+季節変化 (年周・半年周)」のモデルで推定した結果。

海域	変化率 (mm/yr)	誤差 (mm/yr)	季節変化の振幅 (mm)
Indonesian	5.19	0.28	86.9
アンダマン海	4.88	0.25	165
南シナ海	4.74	0.14	83.2
アドリア海	4.29	0.24	102
ベンガル湾	4.00	0.14	63.3
バルト海	3.91	0.51	120
インド洋	3.86	0.06	19.0
Maldives	3.79	0.18	70.4
アラビア海	3.71	0.12	108

メキシコ湾	3.47	0.14	117
日本海	3.27	0.19	148
南半球	3.26	0.03	26.8
北半球	2.91	0.03	59.9
太平洋	2.91	0.04	11.8
大西洋	2.88	0.04	26.1
カリブ海	2.88	0.12	73.7
アラスカ湾	2.87	0.07	87.4
地中海	2.64	0.18	155
黄海	2.49	0.19	180
ベーリング海	2.00	0.16	68.5
全球平均	3.40	0.02	9.65

次に、ENSO の指標である NINO.3 の D-SST との相関を調べる。5 章と同様に「直線+季節変化」のモデルからのデータの差をとり、それを移動平均した上で、ENSO 指標である D-SST の値を比較した (図 6-3)。両者には正の相関が見えるが、赤い直線は二つの量の比例関係を仮定して当てはめた最適直線モデルであり、その傾きは 2.2 (mm/deg) である。

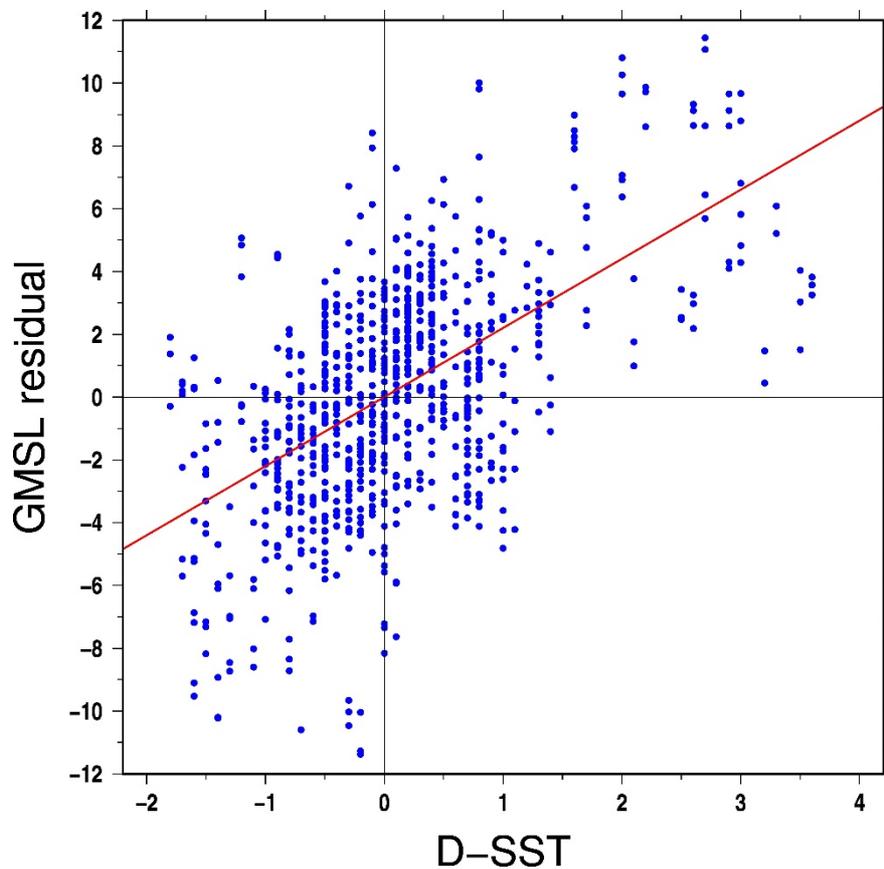


図 6-3 : ENSO 指標である NINO.3 海域の D-SST (degree) と GMSL のモデルからの残差 (mm) の比較。GMSL はコロラド大学のデータを用いた。赤直線は最も適した直線モデルであり、その傾きは 2.2 (mm/deg) である。

この直線モデルに従って、NINO.3 の D-SST にこの係数をかけたものを ENSO 補正として GMSL データから差し引いた。その結果を図 6-4 に示す。NOAA でのデータに比べ El Niño の影響がよく取り除かれているように見える。2011 年の La Niña 時の負の異常については、ENSO 以外の気候変動の影響が大きいと考えられており、コロラド大学の GMSL データを用いた場合でもうまく取り除くことができなかった。

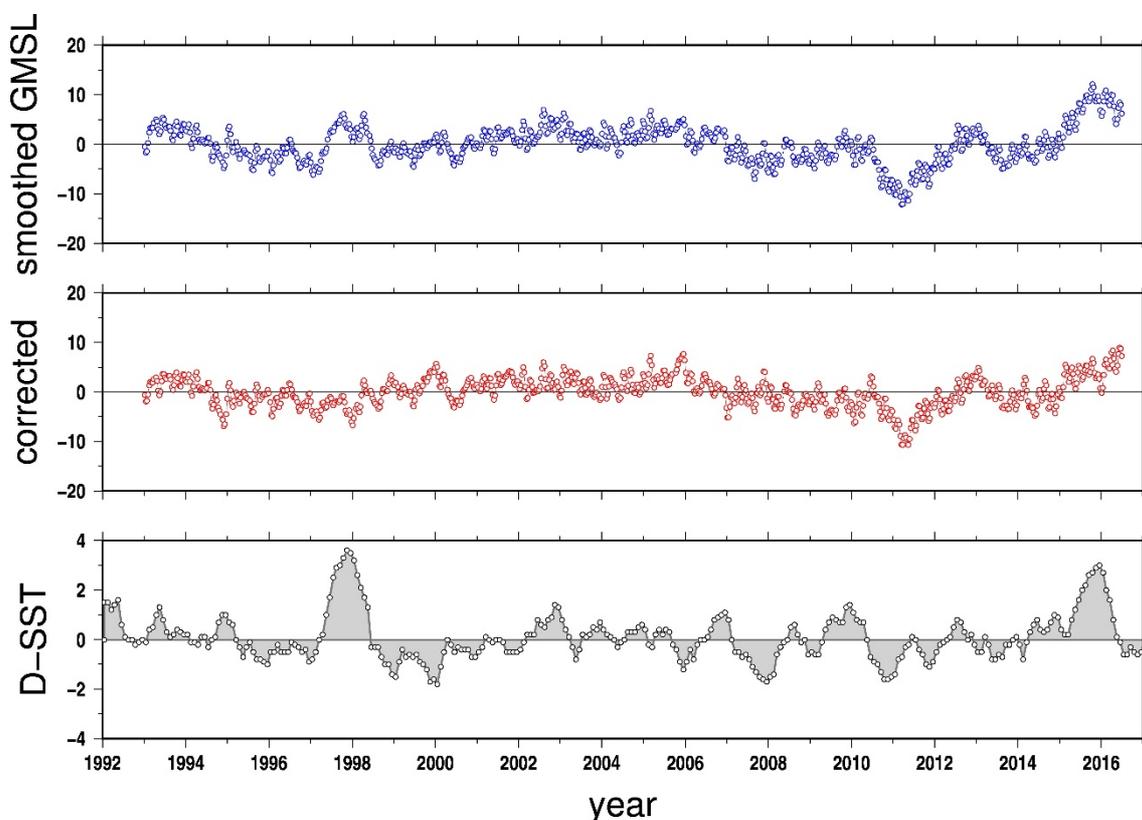


図 6-4 : GMSL に対する ENSO 補正の結果。(上段 : 補正前の GMSL の残差 (mm) ・中段 : 補正後の GMSL 残差 (mm) ・下段 : NINO.3 海域の D-SST (degree))

また、表 6-2 に ENSO 補正を加える前後での GMSL のモデル近似の結果を載せる。コロラド大学の GMSL データを用いた場合では、ENSO 補正前後で加速度項の値が大きく変わっている。

表 6-2 : GMSL の ENSO 補正前後の「直線+季節変化+時間の 2 次項」モデルでの推定結果

	1 次項 (mm/yr)	誤差 (mm/yr)	2 次項 (mm/yr <sup>2</sup> )	誤差 (mm/yr <sup>2</sup> )
補正前	3.397	0.023	0.017	0.004
補正後	3.379	0.021	0.003	0.003

## 6.2 考察

「1 はじめに」で述べたように、衛星海面高度計によって得られたデータは、各データセンターで衛星軌道の決定や海洋潮汐の補正をはじめとする様々な処理を加えて海面高度のデータとして公開される。このとき、データセンターごとに異なる軌道情報や潮汐モデルを用いて処理しているため、公開されるデータにも差異が生じる。その影響が現れやすいのは、衛星の高度の決定であろう。JASON 衛星等の軌道決定には、さらに高度の高いところにある GNSS 衛星や地上からのレーザ測距を用いるが、データセンターによって GNSS の軌道情報が異なっている可能性も考えられる。衛星の軌道高度が異なると、それは直接推定された海面高度に反映されてしまう。ほかにも、海洋潮汐のモデルによる補正が差異を生む可能性が考えられる。海面の長周期の変動を観測するためには半日や 1 日ごとに起こる海洋潮汐による海面高変化を取り除く必要がある。この時用いる潮汐モデルが各データセンターによって異なっていると、最終的なデータに差異が生まれる。また、NOAA のデータ特有の要因として、氷河性地殻均衡 (GIA: Glacial Isostatic Adjustment) の補正が考えられる。GIA とは、陸域の氷床の量の変化に伴い見かけ上海水面が低下する現象 (図 6-5) のことである。NOAA のデータのみ GIA による見かけ上の海水面低下の影響が除去されていない。

(D.P. Chambers et al. (2016))

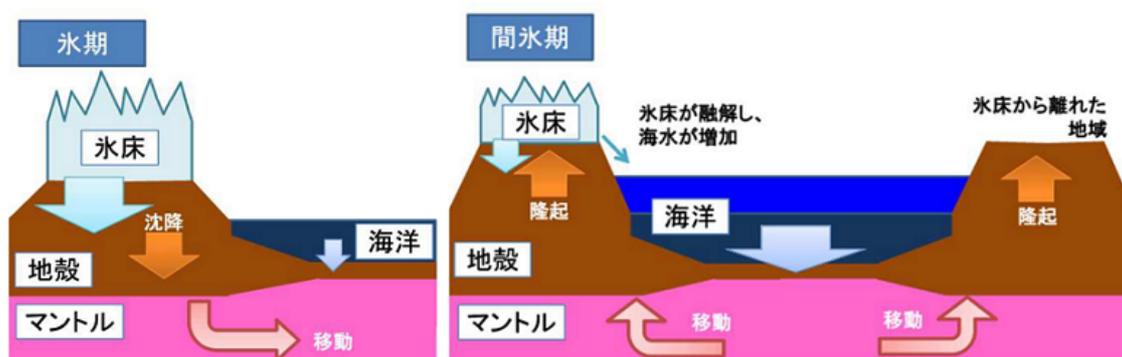


図 6-5 : 気象庁 HP より、GIA の模式図。

このような様々なデータ処理の方法によって GMSL のデータの差異が生まれていることが推察される。

## 7. まとめと今後の展望

計算の結果、全海面上昇量中の熱膨張による成分は約 45%となった。これは Yi et al. (2017) などの先行研究で報告されている割合に近い。さらに正確な計算を行うためには今回一定であるとした塩分濃度についても各海域や各観測データに分けて計算を行う必要があると考えられる。

また、海面上昇の大きな一因である陸水の流入量について、重力変化を計測する衛星システムである GRACE を用いて陸域の重力変化から計算し、熱膨張、海面高度、重力の 3 つの種類データがお互いに調和的であるかを比較検証していきたい。このとき、全球平均としての計算はもちろん、本研究で行ったような各海洋での個別の計算も行いたいと考えている。

ENSO 指標によって GMSL データを補正するという試みについては、過去 25 年の El Niño 時についてはそれに伴う変動を取り除くことができた。一方、2010–2011 年の La Niña については、それに伴う海面のグローバルな下降を取単なる ENSO 指数による補正では除くことができなかった。IOD をはじめとする他の気候変動の要因を考慮する必要があるだろう。

## 8. 謝辞

最後に、この論文を書くにあってご協力をいただいた方に感謝の意を伝えさせていただきます。まず担当教官の日置幸介先生には、この非常に奥深く興味深いテーマを与えていただき、データの解析方法などについても多くの助言をいただきました。先生がいなければこの卒業論文が完成することはありませんでした。本当にありがとうございました。また海洋気候研究室の見延庄士郎先生には海水の熱膨張量の計算について多大なご協力をいただき、博士2年の寺田さんには海洋の熱膨張量の地図の考察についてのアドバイスをいただきました。最後に、固体系ゼミの皆さんには発表の際に多くのご指摘をいただきました。特に同じ宇宙測地学研究室の博士3年の中島さん、博士2年の姫松さんと修士2年の飯尾さんにはPCのセットアップからプログラミングなど研究の多くの場面でお世話になりました。この場を借りて御礼申し上げます。

## 9. 参考文献

- D.P. Chambers et al. (2016), Evaluation of the Global Mean Sea Level Budget between 1993 and 2014, *Surveys in Geophysics*, January 2017, Volume 38, Issue 1, pp 309-327
- Fasullo et al. (2013), Australia's unique influence on global sea level in 2010-2011, *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 4368-4373, doi:10.1002/grl.50834.
- Morishita, Y. and K. Heki (2008), Characteristic precipitation patterns of El Niño / La Niña in time-variable gravity fields by GRACE, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **272**, 677-682.
- Ropelewski, C.F, M.S. Halpert (1987), Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation, *Month. Weather Rev.*, **115**, 1606-1626.
- Wu, L., et al.(2012), Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents, *Nature Climate Change*,**2**(3),161-166, doi:10.1038/nclimate1353.
- Yi, S., K. Heki, and A. Qian (2017), Acceleration in the Global Mean Sea Level Rise: 2005-2015, *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 11,905-11,913,doi:10.1002/2017GL076129.
- 市川香 (2014), 21 世紀初頭の衛星海面高度計, *海の研究(Oceanography in Japan)*, **23**(1), 13-27.

データや図の引用元 HP

アメリカ海洋大気庁

[https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries\\_regional.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries_regional.php)

コロラド大学 <http://sealevel.colorado.edu>

JAMSTEC [http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo\\_web/argo/?page\\_id=83&lang=ja](http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo_web/argo/?page_id=83&lang=ja)

気象庁 <http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/elnino/index.html>

ARGO float 日本公式ページ [http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/index\\_j.html](http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/index_j.html)

海水の熱膨張量計算 <http://ocean.jfe-advantech.co.jp/sensor/img/density.pdf>