

衛星海面高度計 Jason-2 を用いた  
東北沖地震に伴う  
ジオイド変化検出の試み

Search for geoid height changes  
due to the Tohoku Oki earthquake (Mw 9.0)  
by satellite altimeter Jason-2

北海道大学 理学部 地球科学科

宇宙測地学研究室

22070230

北崎大夢

指導教官 古屋 正人

## 概要

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、日本での観測史上最大のモーメントマグニチュード(Mw9.0)を記録し、合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar : SAR)やGPS(Global Positioning System),そしてGRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)衛星などを用いた解析が、日々すすめられている。これらから得られる海底地殻変動や重力異常のデータに加え、地震時ジオイド変化が検出できたとすれば、震源直上の独立したデータが増えることになり、陸域に偏在するデータから得られた断層モデルを検証するための手段にもなる。しかしながら、その確定的な検出の事例はこれまで報告されていない。

ジオイド変動と海面高度変動には密接な関係があり、その海面高度変動を測るために有効な測地技術の1つに衛星海面高度計がある。本研究では、衛星海面高度計 Jason-2 のGDR(Geo Physical Record) SSHA(Sea Surface Height Anomaly)データを用いて、震源直上のデータから地震時ジオイド変化の検出を試みた。この試みに先立って、4月に国土地理院が発表した震源断層モデルを用いて、海底地殻変動や水の荷重による変動の影響は考えずに、第0近似的なモデル計算を行った。その結果、北緯38度付近で最大3.5cm程度の地震時ジオイド変化が期待され、その近傍を Jason-2 の pass238 が通過していることから Jason-2(測定精度:2~3cm)で十分検出できるかもしれないと考えた。地震時ジオイド変化を検出する際に問題となるのは、海流や潮汐などによって起きる海面高度変動であるが、海洋開発研究機構(JAMSTEC)が行っている JCOPE2(Japan Coastal Ocean Predictability Experiment)海洋大循環モデルを用いることで補正を試みた。この両者のデータを比較したところ、似通った傾向が見られ、両者の差の中に地震時ジオイド変動が潜んでいるはずである。そのため、本研究ではこの差についての比較検討を行った。

両者の差について、2009年から2011年の同時期のデータを地震前後で比較したところ、北緯38度付近で20cm程度のシグナルが見られたが、これは理論値とはかなりかけ離れた結果であった。これに対して High Pass Filter によるフィルタリングを行ったが、ここからあまり有効な結果を得ることはできなかった。

本研究では海水の荷重や海底地殻変動による、ジオイド変動への影響を考慮していないため、今後課題が残る結果となった。実際、モデル計算の結果、海底地殻変動が局所的には10mを超える場所もあると考えられ、さらに Jason-2 pass238 から得られたデータによれば、平均海面高度も、北緯38度付近では5m程度とかなり変動していることが判明した。今後はこれらも考慮していくことが課題となるだろう。また、ノイズの性質を他のパス上でも調べるために、Jason-2の従来機である Jason-1 のデータを使用していくことも視野に入れている。

# 目次

1. はじめに	1
1.1 地震時のジオイド変動	1
1.1.1 ジオイドとは	1
1.1.2 地震時のジオイド変動	2
1.1.3 人工衛星によるジオイドの測定	2
1.2 衛星海面高度計の測定原理	3
1.3 Jason-2	5
1.4 先行研究と研究目的	7
2. 東北地方太平洋沖地震	8
3. 国土地理院発表 震源断層モデルによる理論値計算	9
3.1 国土地理院発表 震源断層モデル	10
3.2 計算結果	11
4. Jason-2 を用いた解析	12
4.1 Jason-2 GDR SSHA データ	12
4.2 解析手法(Jason-2 と JCOPE2)	15
4.2.1 JAMSTEC/JCOPE2	15
4.2.2 解析手法(Jason-2 と JCOPE2)	17
4.2.3 使用データとパス	19
4.3 解析結果	22
5. 考察	25
5.1 地震前後でのジオイド変化	25
5.2 High Pass Filter の適用	31
6. まとめと今後の課題	34
7. 謝辞	37
8. 参考文献	38

# 1. はじめに

## 1.1 地震時のジオイド変動

### 1.1.1 ジオイドとは

地球上に存在する様々な地表の形状を定義する際、「高さ」は非常に重要な要素の1つであると言えるだろう。ではこれを表現するためにはどのようにすればよいのだろうか？水は高いところから低いところへと流れる。そして逆の考え方をすれば、水が静止している場所は高さと同じであると言える。つまり、水平面を基準にして、これに垂直な方向、つまり重力と平行な方向の距離を測れば、高さを表すことができる。このように高さを表す基準となる水平面のうち、平均海水面を陸地にまで延長したと仮定した場合に、全地球を覆う仮想的な海面がジオイドである。より厳密に定義するのであれば、「定義された質量と自転角速度を持つ、地球楕円体の表面と同じ重力ポテンシャルの値を持つ等ポテンシャル面」となり、この面は常に重力の方向と直交していることになる。また、地表の70%は海洋であるから、ジオイドは平均海水面に非常に近い形をしていることになる。

しかしながら「ジオイドは平均海水面である」とするには多少の注意が必要である。海面は潮汐や海流などの影響によって、様々なスケールで変動を続けているためである。このように、海流と直接的に関係した海面高は「力学的海面形状(Mean Dynamic Topography : MDT)」とよばれ、実際に観測された海面高度からジオイド高を求める際には、これに留意することも必要となってくる。

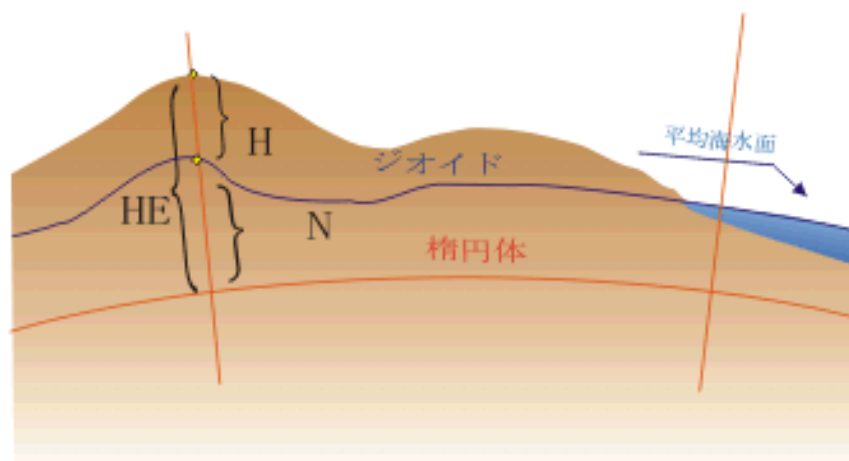


図 1.1 平均海水面とジオイド高

(画像:[http://home.hiroshima-u.ac.jp/er/Class/ESA07\\_2.html](http://home.hiroshima-u.ac.jp/er/Class/ESA07_2.html))

## 1.1.2 地震時のジオイド変動

地震が起きることで、海洋にも様々な変化が起きることになる。例えば海底の地殻変動による地形の変化や津波などによる海水の荷重の移動などが挙げられる。これらの影響の一部は、平均海水面の変化という形で地震後にも残り、それが原因となってジオイドが変化することも考えられる。

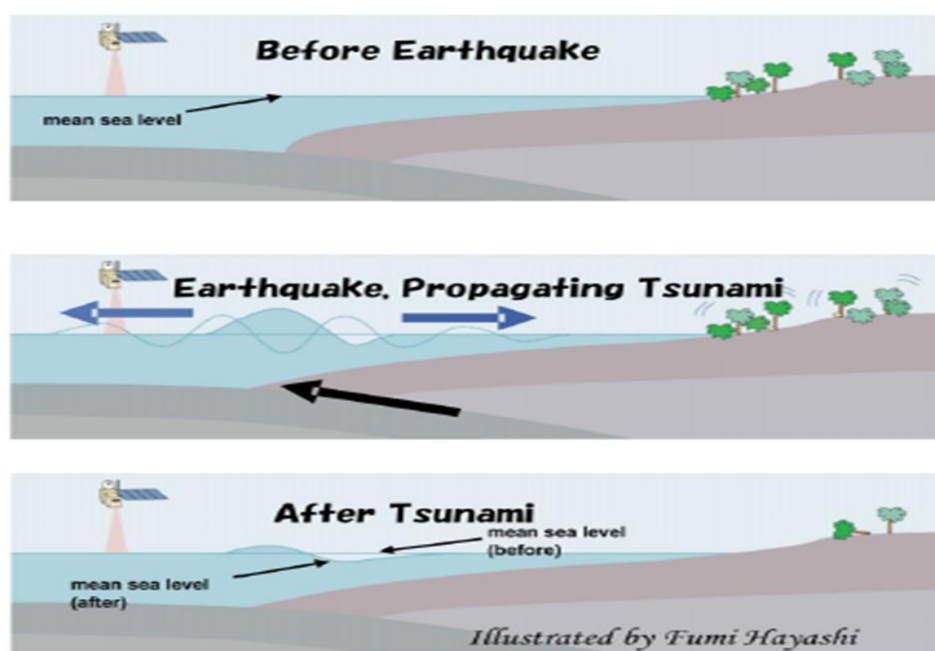


図 1.2 地震に伴う平均海水面変動  
(Hayashi et al. 2007, EPS より引用)

## 1.1.3 人工衛星によるジオイドの測定

人工衛星によるジオイドの測定で一般的なのは、衛星海面高度計を使用した測定と GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)衛星による測定である。このうち GRACE 衛星はもともと、重力ポテンシャルの変化を見るために打ち上げられた衛星で、高度約 450km の極軌道に投入された 200km 離れた二機の衛星からなる双子衛星が、衛星間の距離や、その時間変化を極めて正確に測定することで、重力ポテンシャルの変化を知ることができる。そもそも、ジオイドとは地球上で重力ポテンシャルが等しくなる面のことを指すので、重力ポテンシャルの変化を求めるといことは、ジオイド面の変化を求めるといことほぼ同義であると考えられる。しかしながら、GRACE はその特性上、空間分解能が荒いというのが欠点である。そこで登場するのが衛星海面高度計を用いたジオイド高の推定である。

衛星海面高度計とは、その名の通り海面高度を測定するための技術の1つである。フランスのCNESとアメリカのNASAによって打ち上げられたTopex/Poseidonの運用が1992年に開始されると(Topex/Poseidonの運用は2006年で終了)、2001年にはその後継機であるJason-1の運用が開始され、現在では2008年から運用が開始されたJason-2によって海面高度の変動を2~3cmスケールで把握することができる。これらのデータを用いることが出来れば、海洋における空間的に極めて高分解能な重力場の研究や、それを利用したテクトニクスの研究にも寄与があるとみられ、注目と期待が寄せられている。

## 1.2 衛星海面高度計の測定原理

そもそも衛星海面高度計とは、マイクロ波レーダーを用いて海面高度を測る技術を指しの原理はSAR(Synthetic Aperture Radar)やGPS(Global Positioning System)などの原理と比較して、非常に簡潔である。衛星から発射したマイクロ波レーダーパルスが海面で反射して衛星に戻るまでの往復時間から、衛星と海面との距離を測定する、というのがその原理となる。

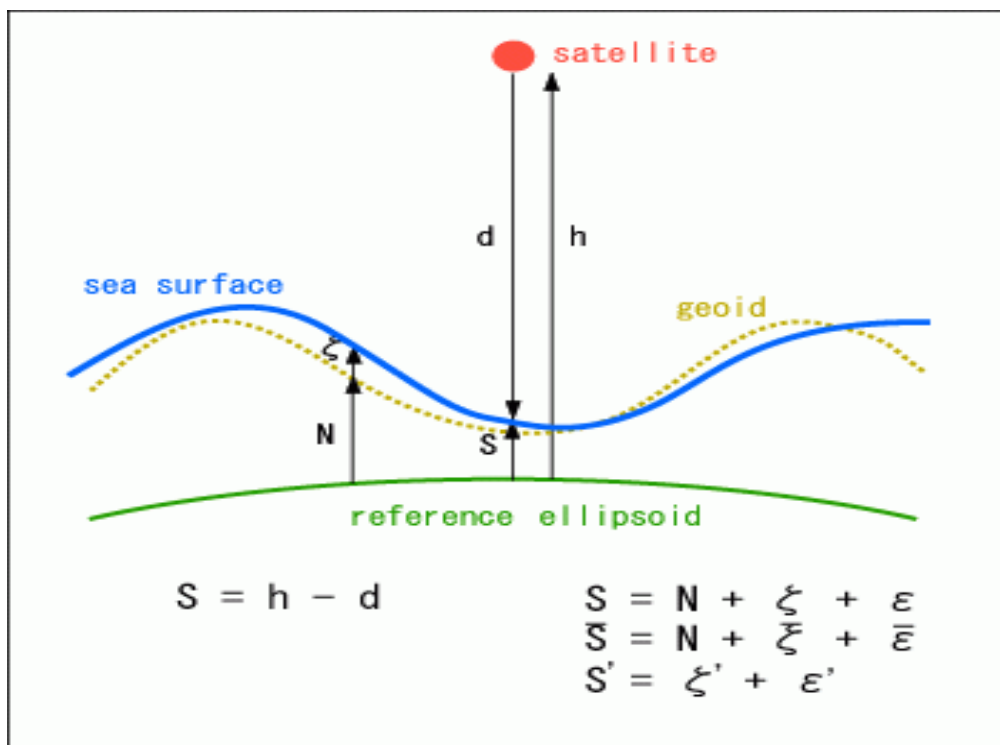


図 1.3 衛星海面高度計の測定原理

(画像:<http://www.esst.kyushu-u.ac.jp/~dmp/study/research/altimeter.html>)

人工衛星に搭載されたマイクロ波レーダー高度計が、人工衛星から直下の海面までの距離  $d$  を測定する一方、人工衛星の軌道高度  $h$  を衛星追跡システムと軌道計算モデルによって正確に求める。これらを組み合わせることで、衛星直下の軌道沿いの海面高度  $S$  の時間的な連続記録が得られる。

$$S = h - d$$

測定された海面高度  $S$  はジオイド  $N$  と力学的な海面高度(Mean Dynamic Topography:MDT)  $\zeta$  と測定誤差  $\varepsilon$  の和として表され、すなわち

$$S = N + \zeta + \varepsilon$$

このような観測が一定期間繰り返されることで、観測値  $\phi$  を、その測定期間全体の平均  $\overline{\phi}$  と、それからの偏差  $\phi'$  (アノマリーまたは時間変動成分)に分けることができる。

したがって

$$\phi = \overline{\phi} + \phi'$$

つまり

$$\overline{S} = N + \overline{\zeta} + \overline{\varepsilon}$$

$$S = \zeta' + \varepsilon'$$

といったように、あらわせる。

### 1.3 Jason-2

2008年6月、フランスのCNES(Le Centre national d'études spatiales)と、アメリカのNASA(National Aeronautics and Space Administration)によって Jason-2 が打ち上げられた。同じくCNESとNASAによって打ち上げられた、Topex/Poseidon, Jason-1 の後継機であり、2～3cm 程度の測定精度で海面高度を測定することが可能である。

衛星には 13.575GHz(Ku-band)と 5.3GHz(C-band)の 2 種類周波数を持つ、2 周波レーダー高度計 Poseidon3 や、マイクロ波放射計 AMR(Advanced Microwave Radiometer)などが搭載されており、単に海面高度を計測するだけでなく、海面温度なども同時に計測することが可能となっている。軌道高度は約 1300km で 254 種類のパス上をほぼ 10 日周期で周回している。パスは全球場をメッシュ状に覆っており、パス同士が作る格子の距離は、一辺が約 300km 程度となっている。Jason-2 を使用したミッションは OSTM(Ocean Surface Topography Mission)として、NASA や CNES によって行われており、そこから得られる Jason-2 のデータは、地球規模での気候変動を把握するための重要な要素としての役割も担っている。2013 年には Jason-3 の打ち上げも予定されており、さらなる精度の向上に期待が寄せられている。



打ち上げ	2008年6月20日	
軌道高度	約 1300m	
軌道傾斜角	約 66 度	
衛星重量	525kg	
回帰日数	9.9 日	
測定精度	2～3cm	
観測波長	Poseidon3	AMR
	13.575GHz(Ku-band)	18.7GHz
	5.3GHz(C-band)	23.8GHz 34GHz

図 1.4 Jason-2 の外観

表 1.1 Jason-2 の基本性能

(画像, 衛星データ:<http://www.avisooceanobs.com/en/newsstand/gallery/multimedia-file-search/index.html>)





図 1.5 Aviso Pass Locator を使用して作成した Jason-1,Jason-2 のパス

(参考: <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/tools/pass-locator/index.html>,  
Google earth)

## 1.4 先行研究と研究目的

Hayashi et al. (2007, EPS) では, 2004 年 Sumatra-Andaman 地震に伴うジオイド変化の検出を試みた。Hirata et al. (2006, EPS) の幅 150km, 長さ 1300km の 14m の一様滑りの断層モデルに基づいて, Peak-to-Peak 5cm 程度のジオイド変化が期待されたが, 海水面変動によるばらつきが大きく, それを補正しきることができなかったことや, ジオイド変化が最大になるであろう地点近傍を通過する衛星のパスが存在しなかったことが原因となり, 地震に伴ったジオイド変化の確定的な検出には至らなかった。

2011 年東北沖地震では局所的には 50 m を越えるような断層滑りが国土地理院の調査によって推定されていることから, 場所によっては Sumatra-Andaman 地震よりも大きなジオイド変化が起きている可能性がある。また, 日本近海については JAMSTEC/JCOPE2 高分解能海洋循環モデルによる海面変動データがあることから, Hayashi et al. (2007) でジオイド変化検出を困難にさせた海面変動の効果を補正出来る可能性もある。

本研究では衛星海面高度計 Jaosn-2 GDR SSHA データを用い, JCOPE2 モデルによる補正を加えていくことで, 震源直上の独立したデータを用いた世界初の地震に伴うジオイド変化の検出を試みた。これにより, 地震時ジオイド変化が検出できたとすれば, 震源直上の独立したデータが増えることにより, 陸域に偏在するデータから得られた断層モデルを検証するための手段にもなると考えられる。

## 2. 東北地方太平洋沖地震

2011年3月11日 14:46, 日本観測史上最大のモーメントマグニチュード(Mw9.0)を誇る, 東北地方太平洋沖地震が発生した. 震源は太平洋三陸沖北緯 38.60°, 東経 142.51°, 最大震度は震度7を記録した(2011 気象庁発表). 気象庁や東京大学地震研究所によればこの地震は, ほぼ東に近い西北西-東南東方向に圧縮軸を持つ低角逆断層型の地震であると推定されている. 世界的に見ても, 1900年以降史上4番目に大きな規模の地震であり, 広範囲で強い揺れに見舞われたこと, 揺れの継続時間が長かったこと, 長周期地震動が広範囲で長時間発生したことが, その特徴として挙げられる. また, この地震によって大規模な津波が発生し, 岩手県, 宮城県, 福島県の沿岸部では家屋が軒並み倒壊するなどの二次災害にも見舞われた.

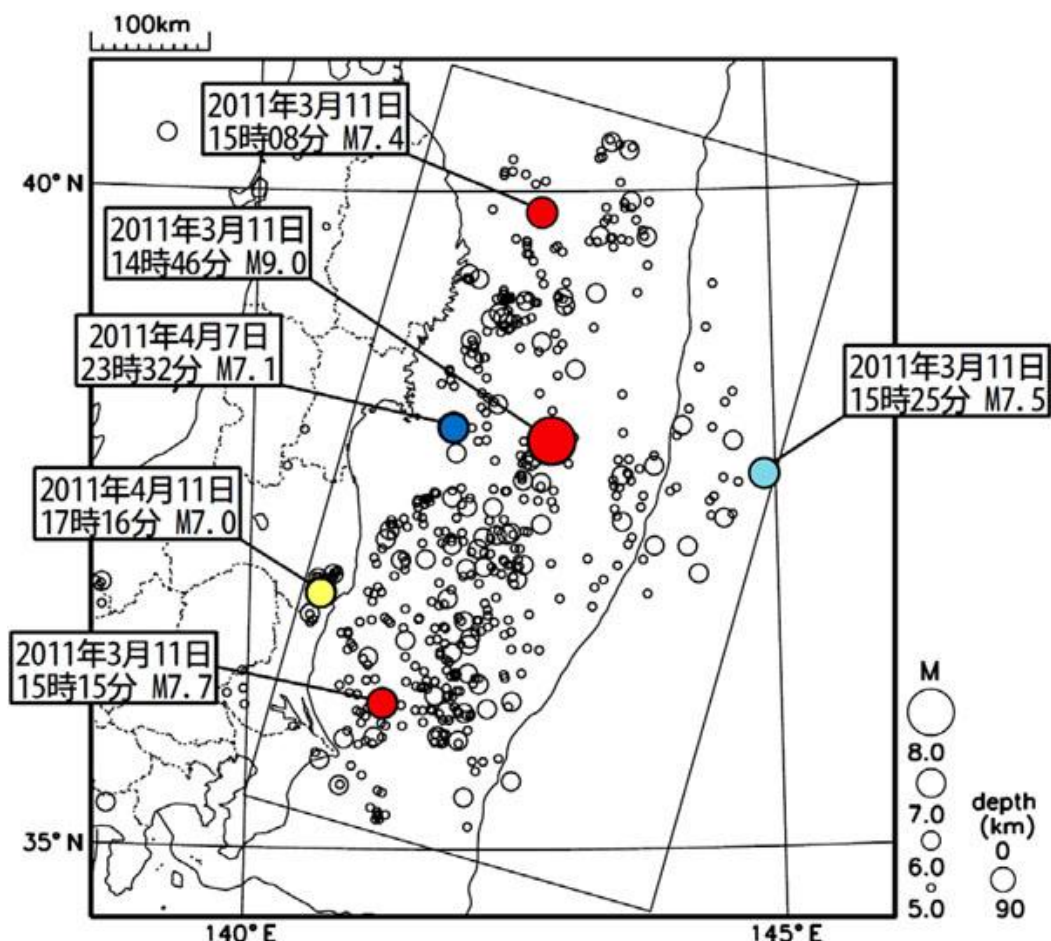


図 2.1 東北地方太平洋沖地震の震央分布  
(日本地震学会 HP より引用)

### 3. 国土地理院発表 震源断層モデルによる理論値計算

解析を行うに先立って、今回の地震でどの程度のジオイド変化が期待されるのか、また、その変化が衛星海面高度計 Jason-2 で観測可能であるかを確認するために、断層モデルに基づいた理論値計算を行った。モデルには 2011 年 4 月 22 日に国土地理院によって発表された震源断層モデルを用い、計算理論としては Okubo (1992, JGR) で提唱されている半無限一様弾性体における地震に伴うジオイド変化の理論を用いた。この手法を用いたモデル計算の例を以下に図 3.1 として示した。

このモデル計算は、水の荷重や、海底地殻変動のジオイド変化への寄与は全く考えておらず、言わば第 0 近似的なものとなっている。

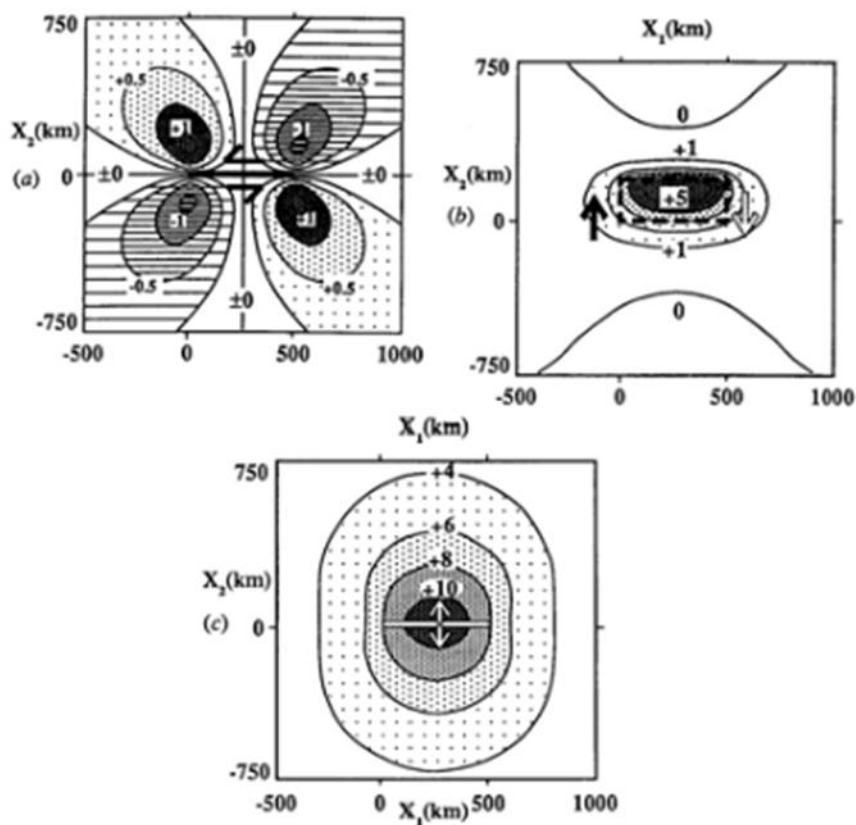
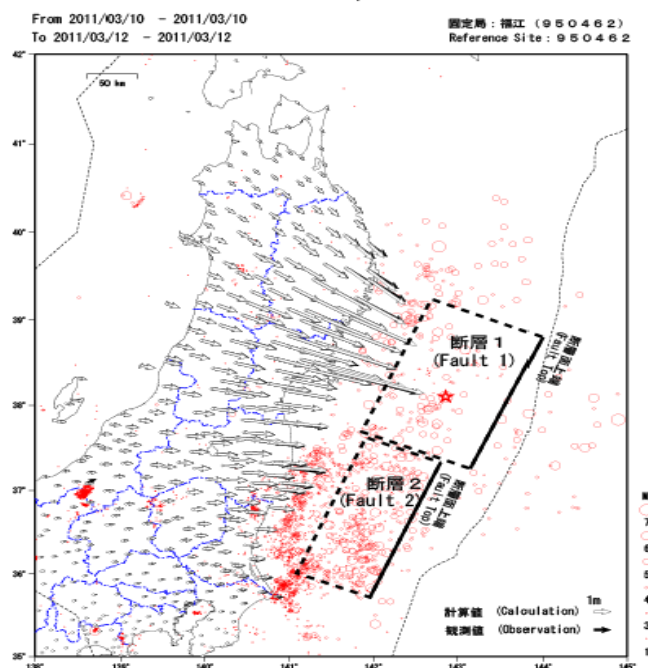


図 3.1 Okubo (1992, JGR) を用いた,  $L=500\text{km}$ ,  $W=300\text{km}$ , Top depth=0.5km, slip=10m の場合におけるジオイド変化(cm). 左上から時計回りに, Strike slip, Dip slip(Dip=45deg.), Tensile opening の場合のジオイド変化をそれぞれ示している。(Okubo 1992, JGR より引用)

### 3.1 国土地理院発表震源断層モデル

2011年4月22日、国土地理院によって東北地方太平洋沖地震の震源断層モデルが発表された。このモデルは本地震において陸上GPS連続観測点から得られたデータを元に推定されたモデルとなっており、同年3月13日に発表された暫定的なモデルを更新したものとなっている。断層面の形状は、日本海溝に沿った2枚の長方形で近似されており、総延長約380km、幅が約90~130kmで、西に傾き下がる断層面として推定されている。また、この断層モデルから推定されるモーメントマグニチュードはMw8.9とされている。本研究では北側の断層にのみ着目し、モデル計算を行った。断層モデルとパラメーターを以下に図3.2として示す。

東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日）の震源断層モデル  
 The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake on March 11, 2011: Fault Model  
 1. 水平変動  
 1. Horizontal Displacement



	緯度 Lat	経度 Lon	上端深さ Depth (Fault Top) km	長さ Length km	幅 Width km	走向 Strike	傾斜角 Dip	すべり角 Rake	すべり量 Slip m	Mw
断層1	38.80°	144.00°	5.1	186	129	203	16	101	24.7	8.8
断層2	37.33°	142.80°	17.0	194	88	203	15	83	6.1	8.3

図 3.2 国土地理院発表 東北地方太平洋沖地震における震源断層モデル

(国土地理院 HP より引用)

## 3.2 計算結果

先ほど示した震源断層モデルについて Okubo(1992, JGR)の理論に基づいた計算を行った結果は以下ようになった。繰り返しになるが、この結果には海底地殻変動や水の荷重の寄与は考慮されておらず、いわば第0近似的な結果となっている。計算には MathWorks 社の Matlab を用い、M\_Map を使用して図示した。

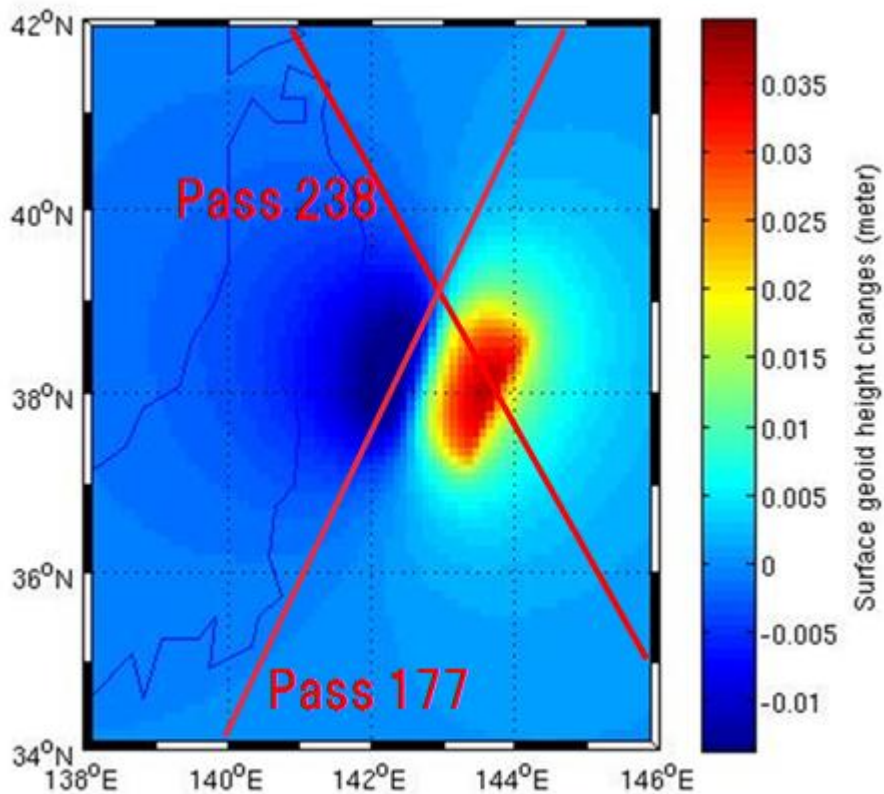


図 3.3 震源断層モデルから算出された地震時ジオイド変化  
赤の線は Jason-2 の Pass238 と Pass177 をそれぞれ示す。

モデル計算の結果、北緯 38 度付近で最大 3.5cm 超のジオイド変化が期待される。また、Jason-2 の Pass238 が、ジオイド変化が最大となる地点の近傍を通過していることから、Jason-2(測定精度:2~3cm 程度)で観測できる可能性があると考えた。

## 4. Jason-2 を用いた解析

### 4.1 Jason-2 GDR SSHA データ

ここでは、今回用いたデータに関する定義を述べていく。そもそも、Jason-2 のデータには以下に示すように、OGDR (Operational GDR), IGDR (Interim GDR), GDR という 3 つの Family が存在する。3 つの Family には以下に示した表 4.1 のような違いがあり、OGDR→IGDR→GDR というように精度が向上していく。このうち、今回は GDR Family のデータを用いた。



Jason-2 GDR (Geophysical Data Record) データとは、実際の観測から約 60 日程度を経て得られる最終解であり、NOAA の HP (<http://www.nsof.class.noaa.gov>) から誰でも利用することが可能となっている。


Auxiliary Data	Impacted Parameter	OGDR	IGDR	GDR
Orbit	Satellite altitude, Doppler correction, ...	DORIS Navigator	Preliminary (DORIS+Laser MOE)	Precise (DORIS+Laser+GPS POE)
Platform	Mispointing angle	Not available	Restituted (MOE)	Restituted (POE)
Meteo Fields	Dry/wet tropospheric corrections, U/V wind vector, Surface pressure, Inverted barometer correction, ...	Predicted	Restituted	
Pole Location	Pole tide height	Predicted		Restituted
Mog2D	HF ocean dealiasing correction	Not available	Preliminary	Precise
GIM	Ionosphere correction	Not available	Available	
Radiometer antenna temperatures coeff.	Wet tropospheric correction, Sigma0 rain attenuation, ...	Preliminary		Precise (accounting for radiometer calibration)


表 4.1 3 つの Family の違い

(Dumont et al., 2009: OSTM Jason-2 Product Handbook より引用)

## Jason-2/OSTM Level-2 Products

	OGDR Family	IGDR Family	GDR Family	Size & Complexity
<b>Reduced 1Hz</b>	OGDR-SSHA	IGDR-SSHA	GDR-SSHA	
<b>1Hz + 20Hz</b>	OGDR OGDR-BUFR*	IGDR	GDR	
<b>1Hz + 20Hz + Waveforms</b>		S-IGDR	S-GDR	
<b>Latency:</b>	3-5 Hours	1-2 Days	~ 60 Days	

Latency 

Accuracy 

\* All files in NetCDF format except OGDR-BUFR, which contains no 20-Hz data

表 4.2 Jason-2 の Family

(Dumont et al., 2009 : OSTM Jason-2 Product Handbook より引用)

また、その中でも SSHA (Sea Surface Height Anomaly) データは実際に観測された衛星の高度データに、電離層遅延、海洋潮汐、極潮汐などの各種の補正を行い、最後に平均海面を補正することで出した偏差となっている。Jason-2 GDR SSHA データの詳細な定義は、次のページに表 4.2 として示した。



- ‘SSHA (Sea Surface Height Anomaly)’ =
- “ Satellite Altitude 衛星高度 (alt) ”
- Ku band corrected altimeter 測距長 (range\_ku)
  - altimeter 電離層補正 on Ku band (iono\_cor\_alt\_ku)
  - 乾燥対流圏補正モデル (model\_dry\_tropo\_corr)
  - Radiometer による湿潤対流圏補正
  - sea state bias 補正 in Ku band
  - 固体地球潮汐補正 (solid\_earth\_tide)
  - 地心海洋潮汐補正 1 (ocean\_tide\_sol1)
  - 地心極潮汐補正 (pole\_tide)
  - inverted barometer 逆気圧応答補正 (inv\_bar\_corr)
  - 平均海水面 (mean sea surface)”;

表 4.3 Jason-2 GDR SSHA データの定義

(参考: Dumont et al., 2009: OSTM Jason-2 Product Handbook)

## 4.2 解析手法(Jason-2 と JCOPE2)

地震時のジオイドを検出しようとした際に最も厄介なのは、海流や潮汐などの影響で常時存在している海面高変動をどのように除去していくかである。このようにして常時存在する海面高の変動スケールは数メートルから数十メートルにもなり、それと同様に SSHA も数十 cm スケールで常時変動している(下図 4.1 参照)。地震時のジオイド変動(海面高変動)として予想されるそれと比べて一桁以上も大きいのである。本研究ではこのような海面高変動を補正するために、後述する JAMSTEC/JCOPE2 の海洋大循環モデルを使用した補正を行った。

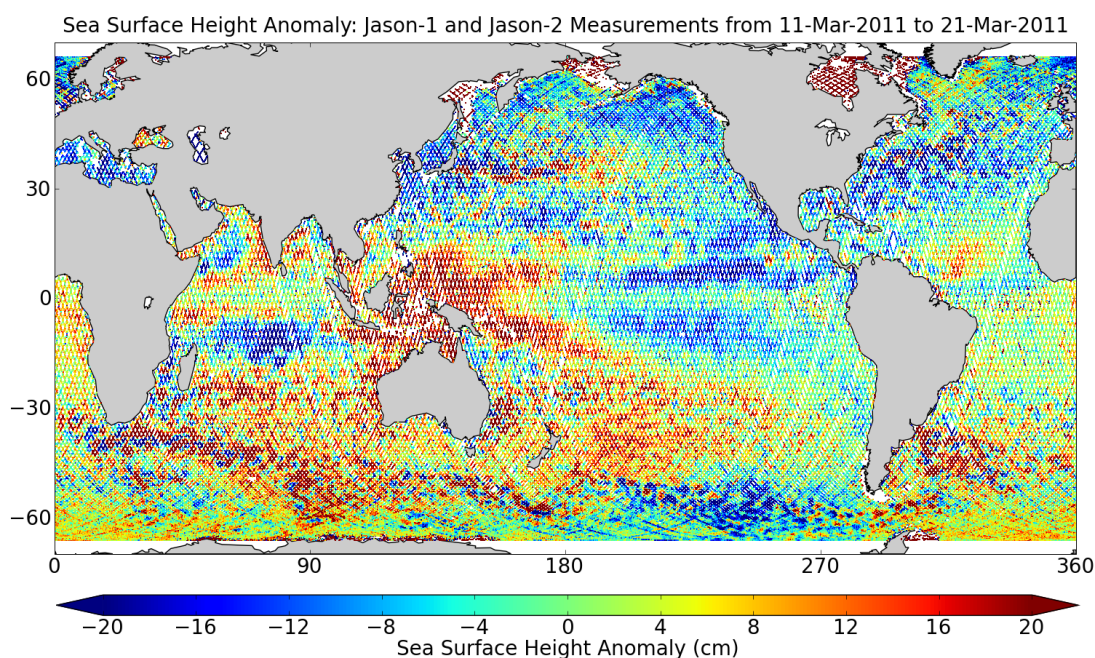


図 4.1 Jason-1 および Jason-2 のデータから求めた SSHA  
(画像：NASA の HP より引用)

### 4.2.1 JAMSTEC/JCOPE2

JCOPE (Japan Coastal Ocean Predictability Experiment: 日本沿海予測可能性実験) の当初の目標は、日本南岸の黒潮流路変動の予測可能性を検証することにあった。その基盤として、水深に依存しない鉛直層数を確保できる海洋大循環モデルとして Princeton Ocean Model (POM) を採用し、さらに効率的に計算を行うため、北太平洋全体を表現する比較的粗い格子を持った海洋大循環モデルを構築した。その中により高解像度のモデルを入れ子上にはめ込み、外側のモデルから側面境界条件を与え、船舶による

実地観測などから計算した現実的な海上風や海表面熱フラックスによって駆動化していくモデル化手法を採用した(JCOPE モデル)。その後 JCOPE モデルは、海面高度や水温塩分観測値のデータ同化機能を備えた JCOPE 数値海況予測システム(JCOPE1)として 2001 年 12 月から海洋研究開発機構(JAMSTEC)の海洋変動予測実験において運用されるようになった。さらに 2008 年には、JCOPE1 に水温塩分結合 EOF モードを用いる三次元変分法(Fujii and Kamichi, 2003)を導入し、また、モデルの移流拡散スキームを変更するなど新たな数値海況予測システム JCOPE2 が、JAMSTEC によって開発された。JCOPE2 では、中規模現象よりさらに小さな時空間スケールを検証するために 1/36 度(約 3km)格子によって高解像度化されたモデルが構築され、船舶などの運行支援等に用いられている。このモデルより得られた日本近海海面高度(Sea Surface Height:SSH)の変動の例を以下に図 4.1 として示す。

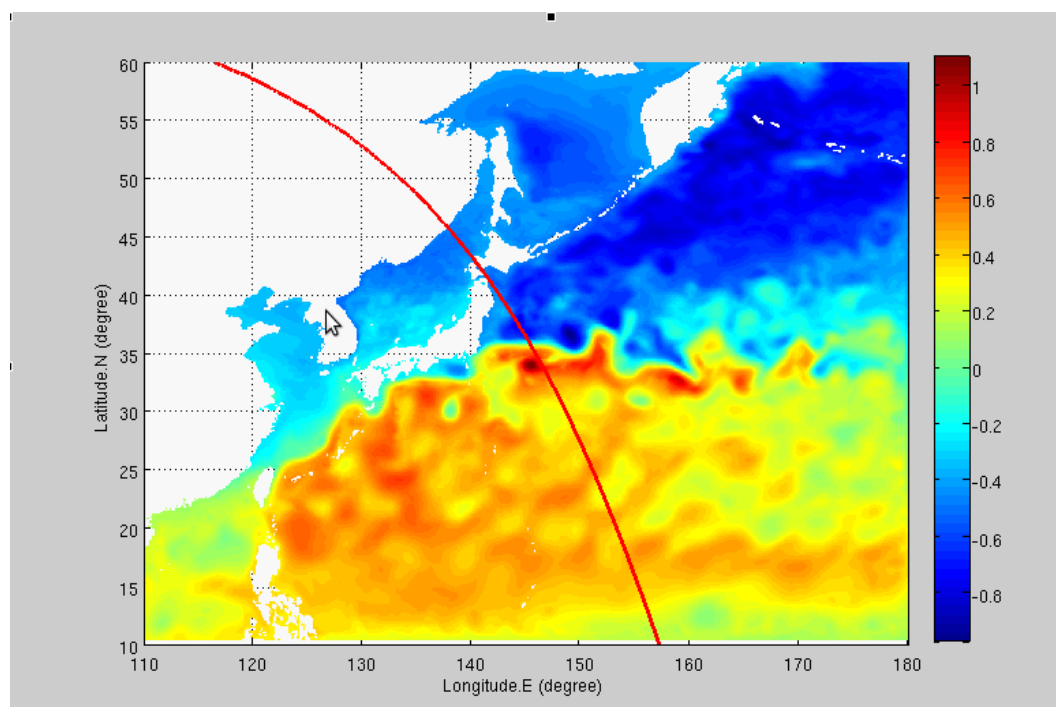


図 4.2 3月20日の日本近海における海面変動  
カラーバーのスケールはm(メートル)で、海面高度の変動を示している。また、赤い線は Jason-2 の Pass238 を表す。

## 4.2.2 解析手法(Jason-2 と JCOPE2)

JCOPE2 のデータは図 4.2 のような三次元の画像データとして表現される。本研究ではこのような JCOPE2 の画像から使用する Jason-2 のパス上のデータを抽出して、これを比較対象とすることで補正に利用した。また、JCOPE2 のデータ SSH データであるのに対して、Jason-2 のデータはその偏差である SSHA のデータとなっている。そのため、これをそのまま比較したのでは正確な比較にはならない。(図 4.3 参照)

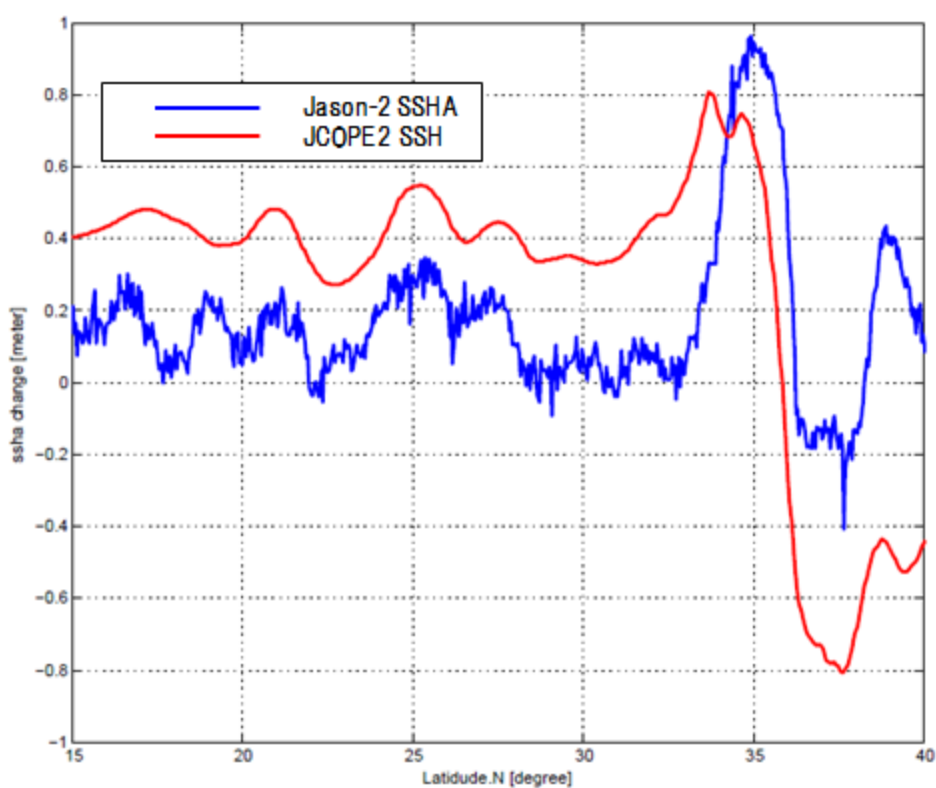


図 4.3 3月20日の Jason-2 SSHA データと JCOPE SSH データの比較  
Jason-2 のパスは 238 を使用した。青い線が Jason-2、赤い線が JCOPE2 のデータをそれぞれ示す。

このように、両者の間に似たような傾向が見てはとれるものの、一致している部分は少なく、若干の差があるようにも見える。そこで、Jason-2 SSHA のデータに力学的海面高度 (Mean Dynamic Topography:MDT) のデータを加える。この MDT は CLS Rio 05 モデルと呼ばれる種々の衛星観測から得られた、0.5 度刻みのグリッドをもつモデルから得られた値で、パスごとにそれに沿った値が格納されている。これによって両者の傾向は以下のようにより近いものとなる。

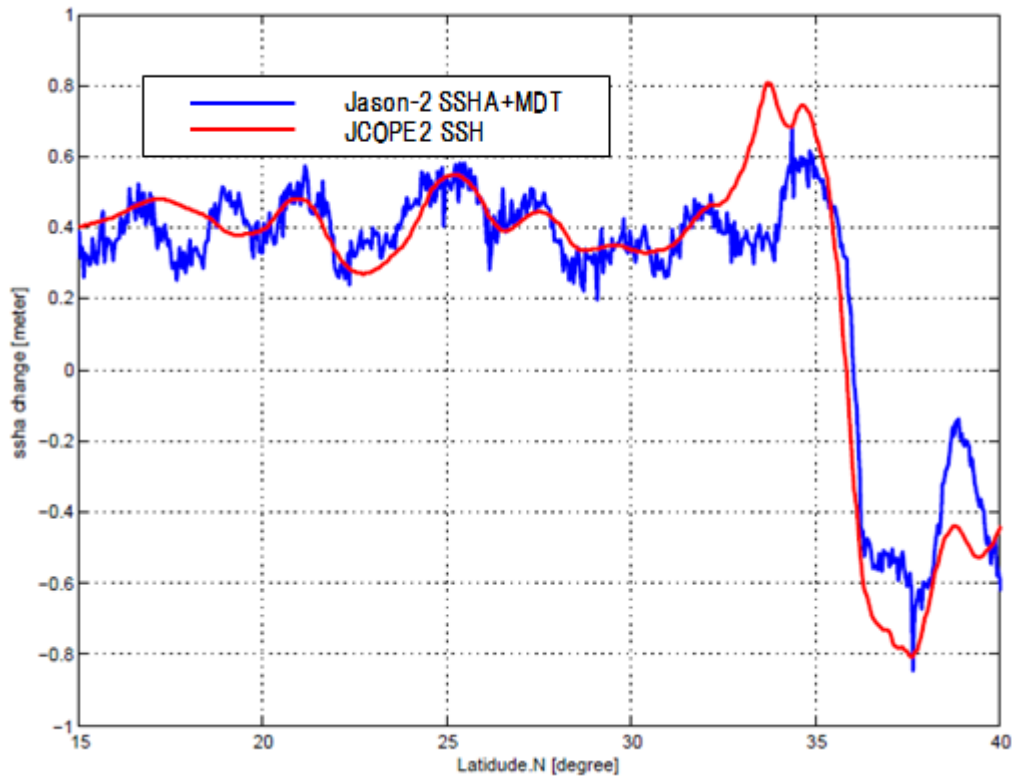


図 4.4 3月20日の Jason-2 SSHA+MDT データと JCOPE2 SSH データの比較  
 Jason-2 のパスは 238 を使用した。赤い線は図 4.3 と同様のもの。青い線は Jason-2 SSHA+MDT を示す。

このように、先ほどよりも明らかに一致している点が多く、また、変動の傾向も重なる部分が多く見て取れるようになった。そこで本研究では、この Jason-2 SSHA+MDT と JCOPE2 SSH データを比較することでジオイド変化の検出を試みた。ジオイド変化は、観測値である Jason-2 のデータと、モデル計算値である JCOPE2 のデータの差の中に存在すると考えられるため  $\text{delta} = (\text{Jason-2 SSHA+MDT} - \text{JCOPE2 SSH})$  を計算し、また、常時存在する海面変動は、一日ごとにかかなりのばらつきを持つと考えられるため、計算した結果を stack していくことが必須である。

### 4.2.3 使用データとパス

以下に解析に使用した Jason-2 SSHA データと、そのパスを示す。図 3.3 によれば、ジオイド変化が最大となる地点の上空を通過しているのは Pass238 であるが、今回はそれと合わせて、この地点の近傍を通過する Pass177 のデータについても解析した。地震前後での比較を行うために、2009 年～2011 年の同時期のデータについて解析を行った。データは各年ともに 22 組ずつ使用した。

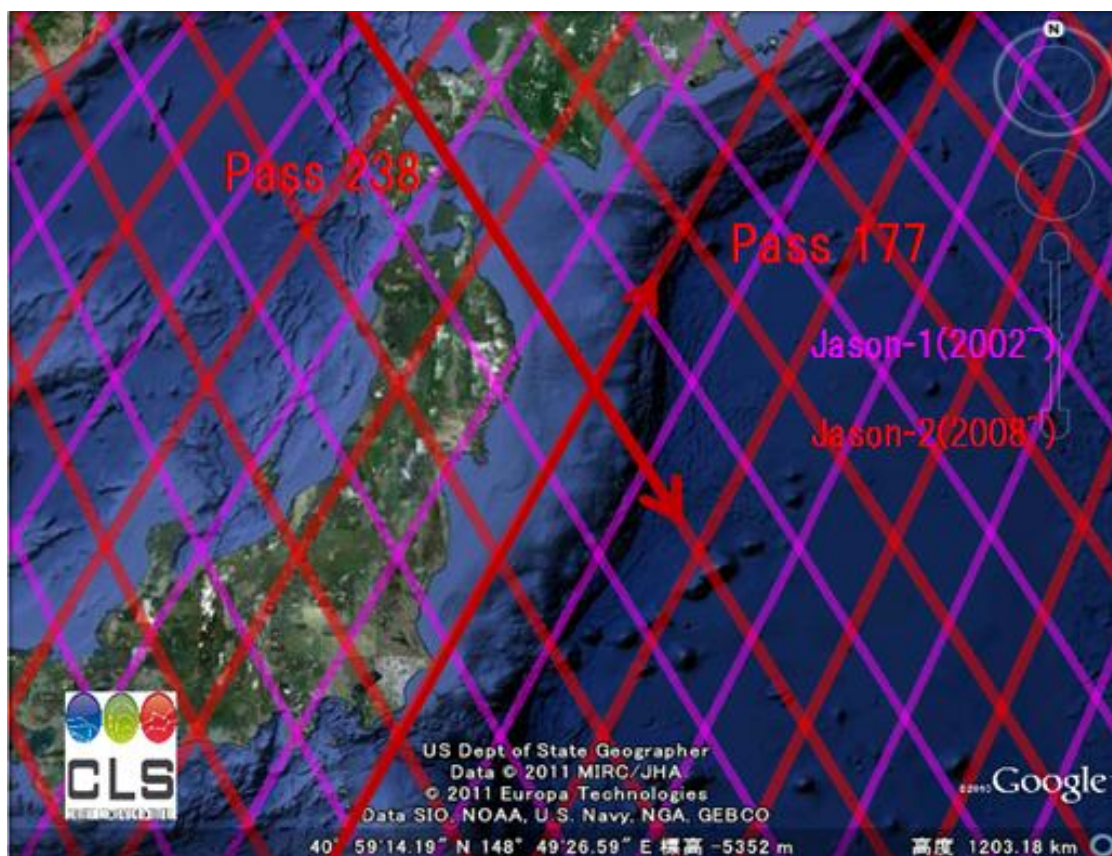


図 4.5 使用した Jason-2 のパス

矢印の向きは衛星の進行方向をそれぞれ示している。

(参考：<http://www.avisioceanobs.com/en/data/tools/pass-locator/index.html>,  
Google earth)

Before the EQK	cycle	Before the EQK	cycle	After the EQK	cycle
Mar 16,2009	25	Mar 18,2010	62	Mar 20,2011	99
Mar 26,2009	26	Mar 28,2010	63	Mar 29,2011	100
Apr 5,2009	27	Apr 6,2010	64	Apr 8,2011	101
Apr 15,2009	28	Apr 16,2010	65	Apr 18,2011	102
Apr 24,2009	29	Apr 26,2010	66	Apr 28,2011	103
May 4,2009	30	May 6,2010	67	May 8,2011	104
May 14,2009	31	May 16,2010	68	May 18,2011	105
May 24,2009	32	May 26,2010	69	May 28,2011	106
Jun 3,2009	33	Jun 5,2010	70	Jun 7,2011	107
Jun 13,2009	34	Jun 15,2010	71	Jun 17,2011	108
Jun 23,2009	35	Jun 25,2010	72	Jun 27,2011	109
Jul 3,2009	36	Jul 5,2010	73	Jul 7,2011	110
Jul 13,2009	37	Jul 15,2010	74	Jul 17,2011	111
Jul 23,2009	38	Jul 25,2010	75	Jul 26,2011	112
Aug 2,2009	39	Aug 3,2010	76	Aug 5,2011	113
Aug 12,2009	40	Aug 13,2010	77	Aug 15,2011	114
Aug 21,2009	41	Aug 23,2010	78	Aug 25,2011	115
Aug 31,2009	42	Sep 2,2010	79	Sep 4,2011	116
Sep 10,2009	43	Sep 12,2010	80	Sep 14,2011	117
Sep 20,2009	44	Sep 22,2010	81	Sep 24,2011	118
Sep 30,2009	45	Oct 2,2010	82	Oct 4,2011	119
Oct 10,2009	46	Oct 12,2010	83	Oct 14,2011	120

表 4.4 使用した Jason-2 のデータとそのサイクル (Pass238)

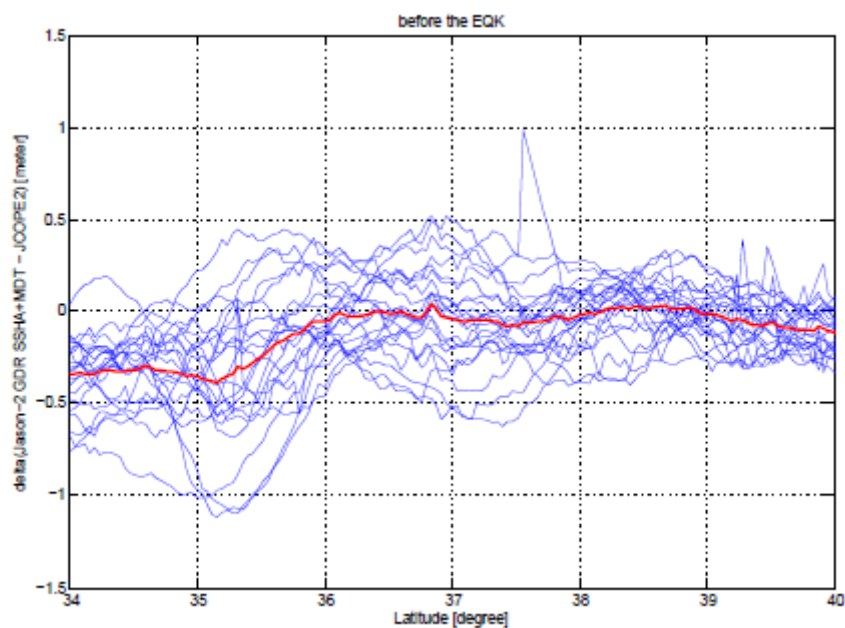
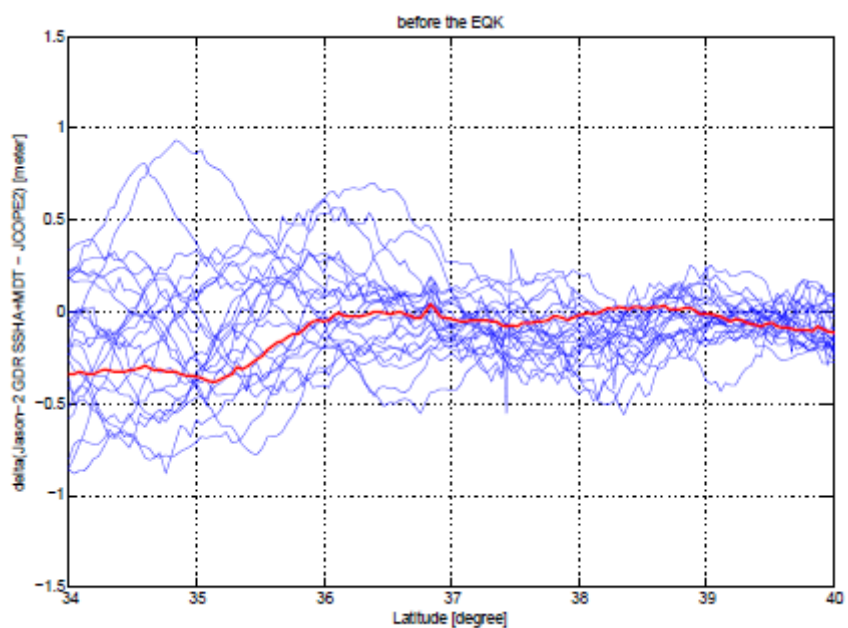
Before the EQK	cycle	Before the EQK	cycle	After the EQK	cycle
Mar 13,2009	25	Mar 15,2010	62	Mar 17,2011	99
Mar 23,2009	26	Mar 25,2010	63	Mar 27,2011	100
Apr 2,2009	27	Apr 4,2010	64	Apr 6,2011	101
Apr 12,2009	28	Apr 14,2010	65	Apr 16,2011	102
Apr 22,2009	29	Apr 24,2010	66	Apr 26,2011	103
May 2,2009	30	May 4,2010	67	May 6,2011	104
May 12,2009	31	May 14,2010	68	May 16,2011	105
May 22,2009	32	May 24,2010	69	May 26,2011	106
Jun 1,2009	33	Jun 3,2010	70	Jun 4,2011	107
Jun 11,2009	34	Jun 13,2010	71	Jun 14,2011	108
Jun 21,2009	35	Jun 22,2010	72	Jun 24,2011	109
Jun 30,2009	36	Jul 2,2010	73	Jul 4,2011	110
Jul 10,2009	37	Jul 12,2010	74	Jul 14,2011	111
Jul 20,2009	38	Jul 22,2010	75	Jul 24,2011	112
Jul 30,2009	39	Aug 1,2010	76	Aug 3,2011	113
Aug 9,2009	40	Aug 11,2010	77	Aug 13,2011	114
Aug 19,2009	41	Aug 21,2010	78	Aug 23,2011	115
Aug 29,2009	42	Aug 31,2010	79	Sep 2,2011	116
Sep 8,2009	43	Sep 10,2010	80	Sep 12,2011	117
Sep 18,2009	44	Sep 20,2010	81	Sep 22,2011	118
Sep 28,2009	45	Sep 30,2010	82	Oct 1,2011	119
Oct 8,2009	46	Oct 10,2010	83	Oct 11,2011	120

表 4.5 使用した Jason-2 のデータとそのサイクル (Pass177)



### 4.3 解析結果

それぞれについて  $\text{delta}(\text{Jason-2 SSHA} + \text{MDT} - \text{JCOPE2 SSH})$  を計算し年数別に表示した結果が以下となっている。また、各期間についてその平均も計算し、合わせて図に表示した。



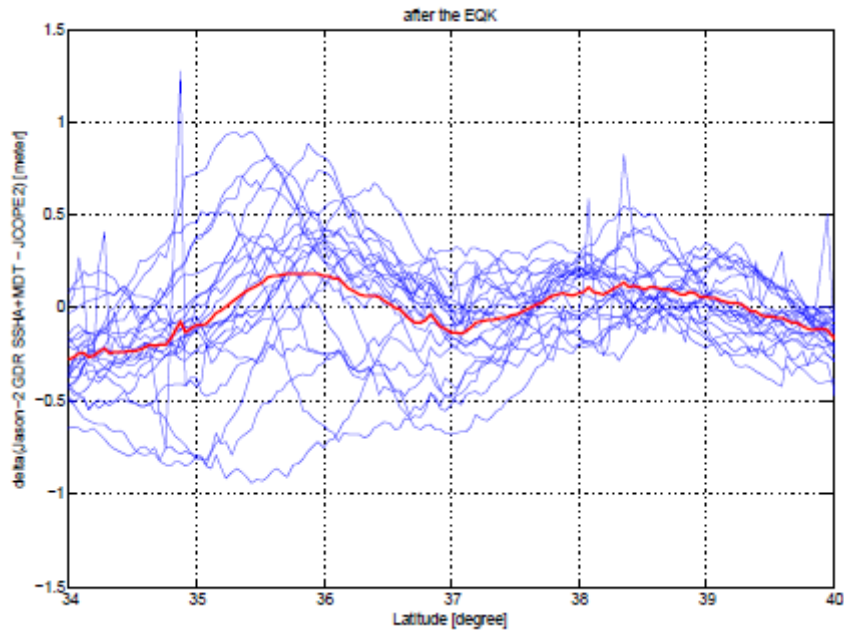
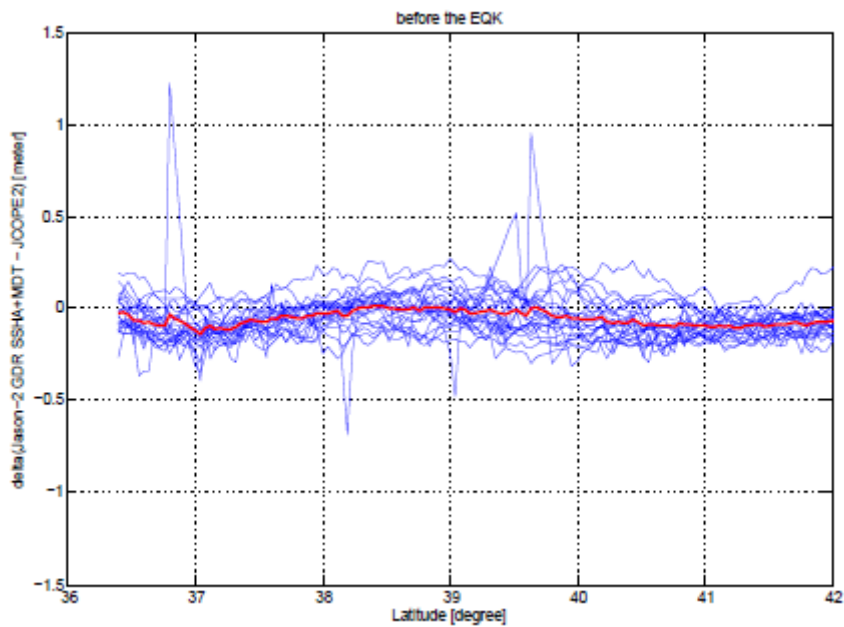


図 4.6 Pass238 における解析結果  
前ページ上から 2009, 2010, 2011. 赤い線は各期間の平均を示す.



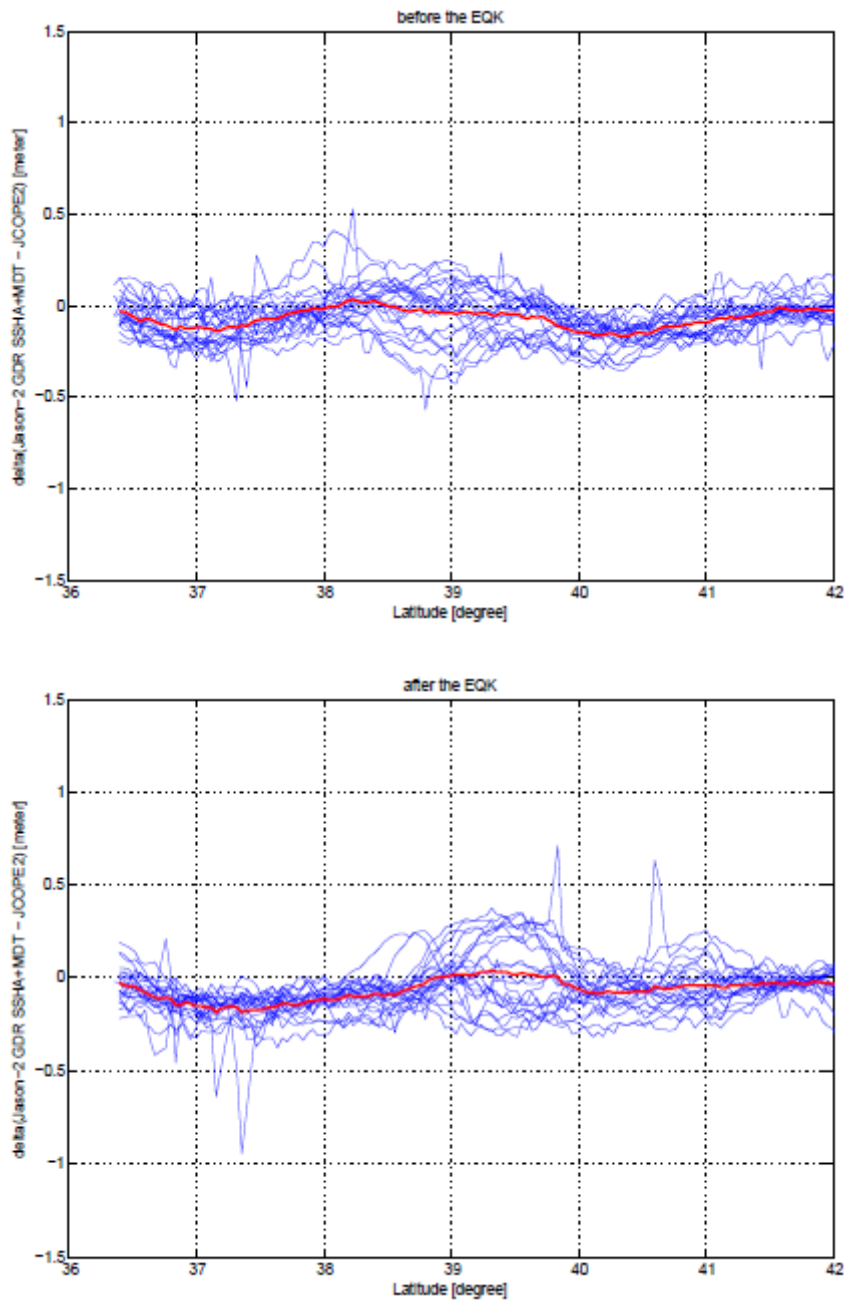


図 4.7 Pass177 における解析結果

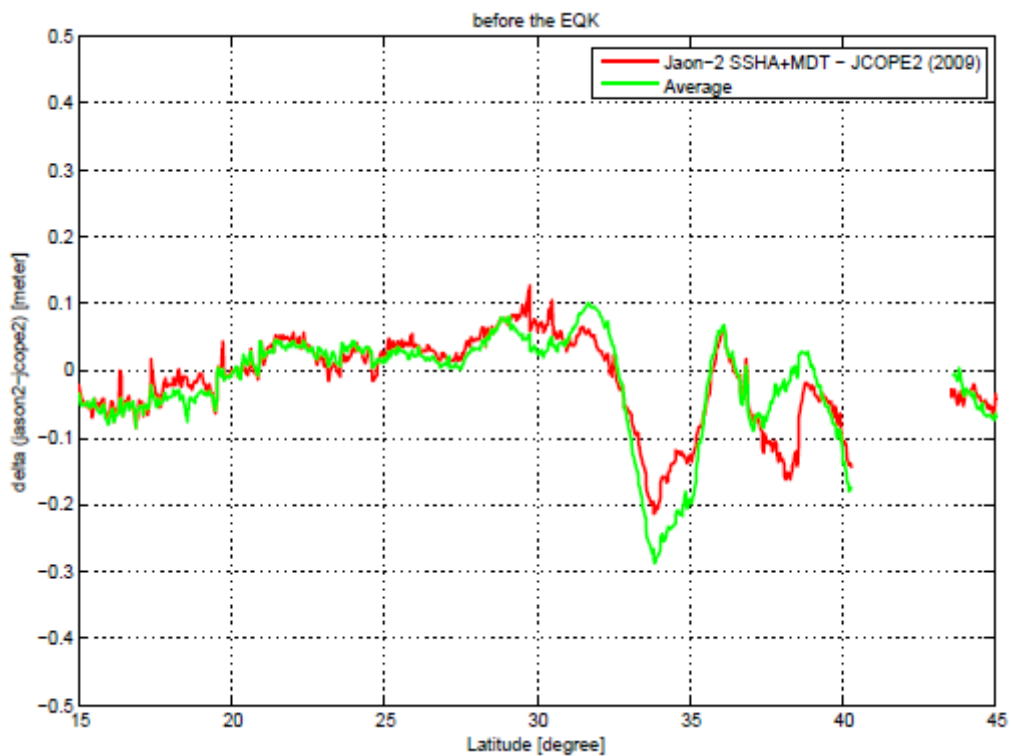
前ページ上から 2009, 2010, 2011. 赤い線は各期間の平均を示す.

パス 177 に比べて、パス 238 は各期間ともかなりばらつきが多く見られた、その中でも、パス 238 では北緯 35 度付近でかなり大きなばらつきが見られるが、これは主に、黒潮続流の効果によるもののはずである。(図 4.2 参照) また、一日ごとのばらつきもかなり大きく、このことから単純に日ごとの変化を比較するのではなく、stacking した上でその平均を比較検討していくことが必須である。

## 5. 考察

### 5.1 地震前後でのジオイド変化

前章でも触れたとおり，日々の海面高度のばらつきはかなり大きく，比較にはこれを stack することが必須である．そのため本研究では，各年ともに stack したデータの平均をとり，それらを比較していくこととした．ここではその平均を，地震前後で比較することで，そこにジオイド変化らしきものが現れているかを見ていくこととする．パス 238 とパス 177 について比較前の各年の平均を，3 年間の平均とともに示し，以下に図 5.1，図 5.2 として示した．



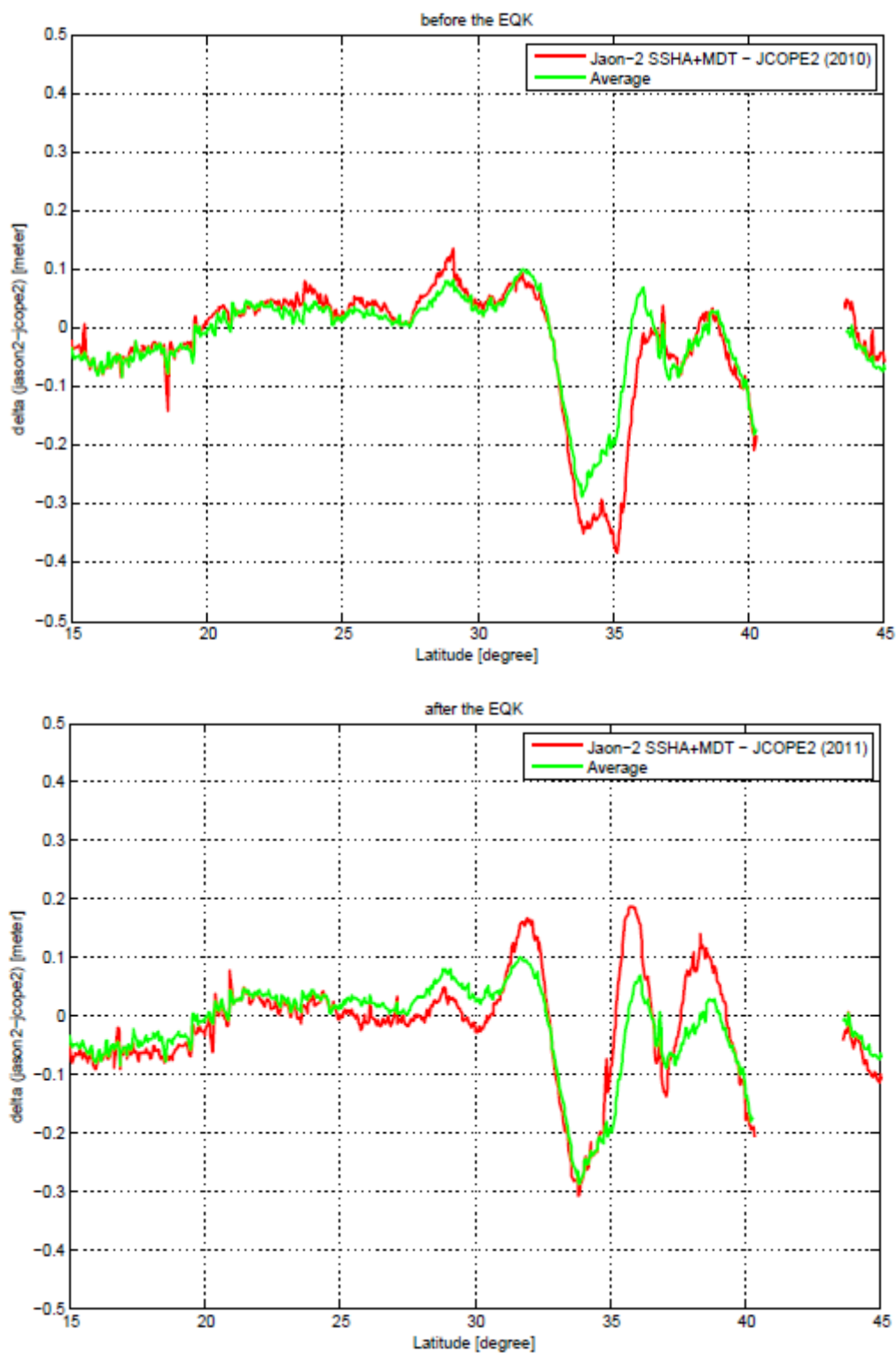
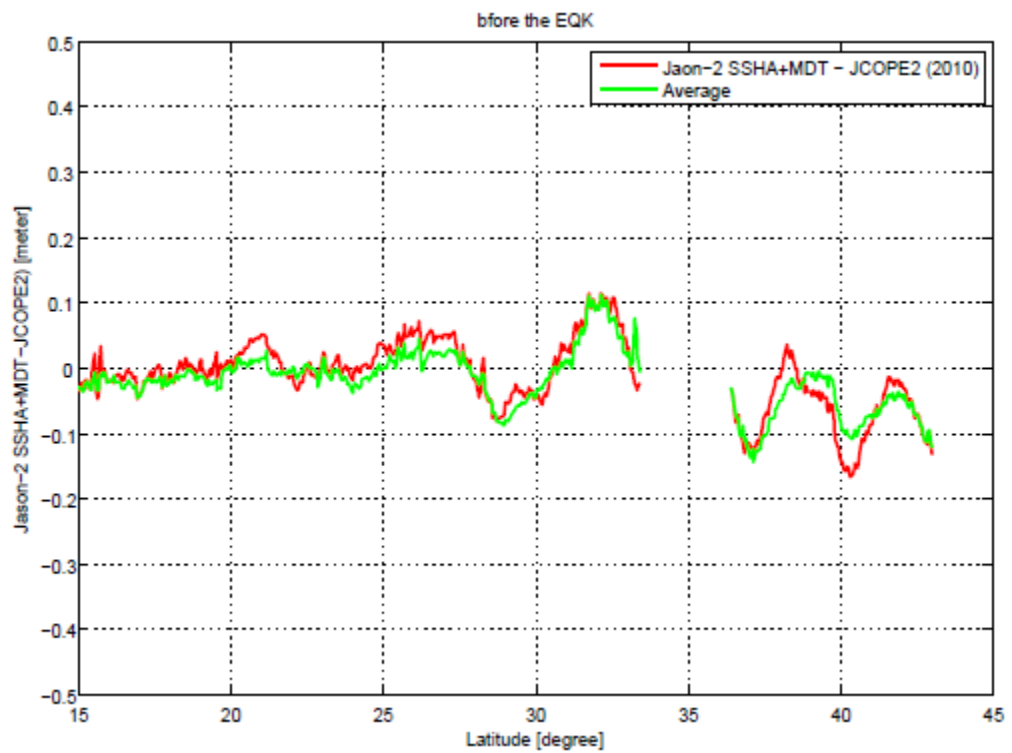
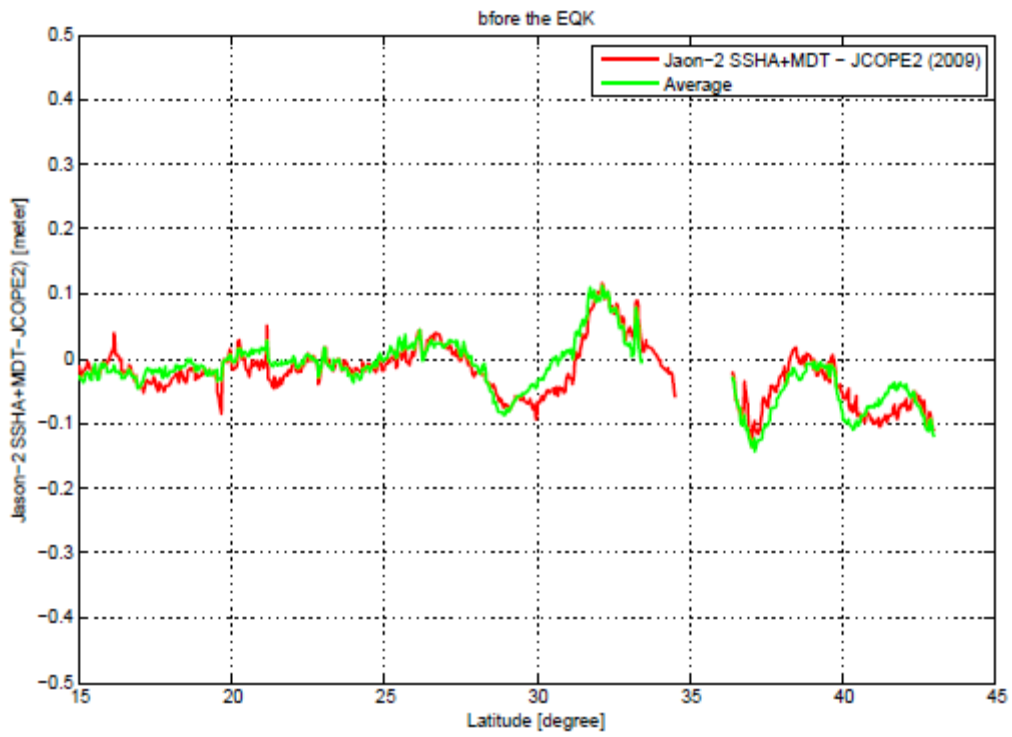


図 5.1 パス 238 における各年の平均と通年の平均  
 前ページから順に、2009，2010，2011. 赤い線が各年の平均を示し，緑の線は通年の平均を示す.



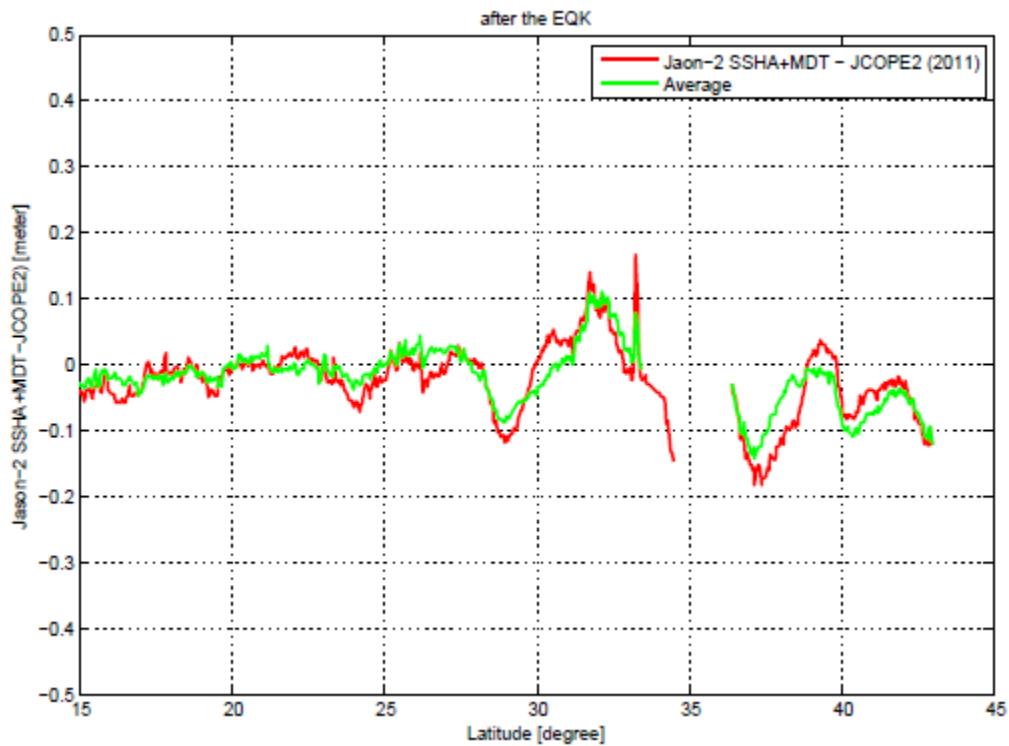


図 5.2 パス 177 における各年の平均と通年の平均  
前ページから順に 2009, 2010, 2011. 赤い線が各年の平均, 緑の線が通年の平均  
をそれぞれ示す.

これらについて, 地震前後での比較を行った. 具体的には,

$$\text{Delta2009} = \text{Average (2011)} - \text{Average (2009)}$$

$$\text{Delta2010} = \text{Average (2011)} - \text{Average (2010)}$$

$$\text{Delta2011} = \text{Average (2009+2010)} - \text{Average (2011)}$$

$$\text{DeltaBefore} = \text{Average (2010)} - \text{Average (2009)}$$

を計算しこれを図に表示した. また, ピンク色の線はモデル計算で得られた図(図 3.3)  
からそれぞれパス 177 とパス 238 に沿った値を二次補間することによって得た値の推移  
を示している.

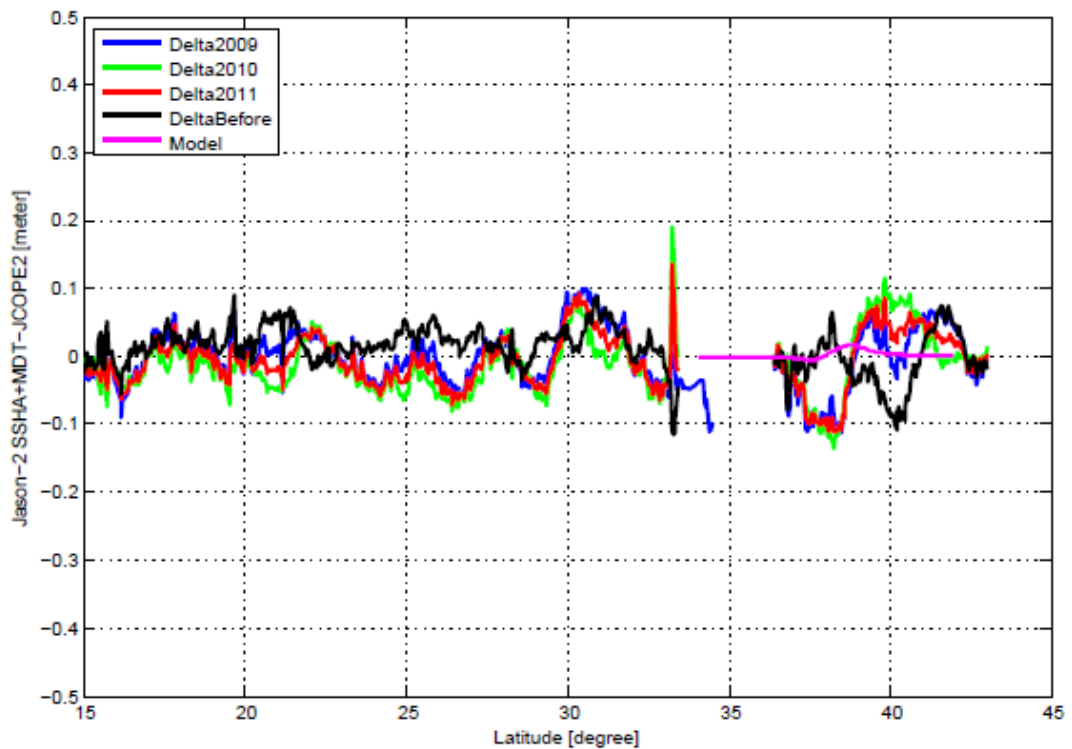
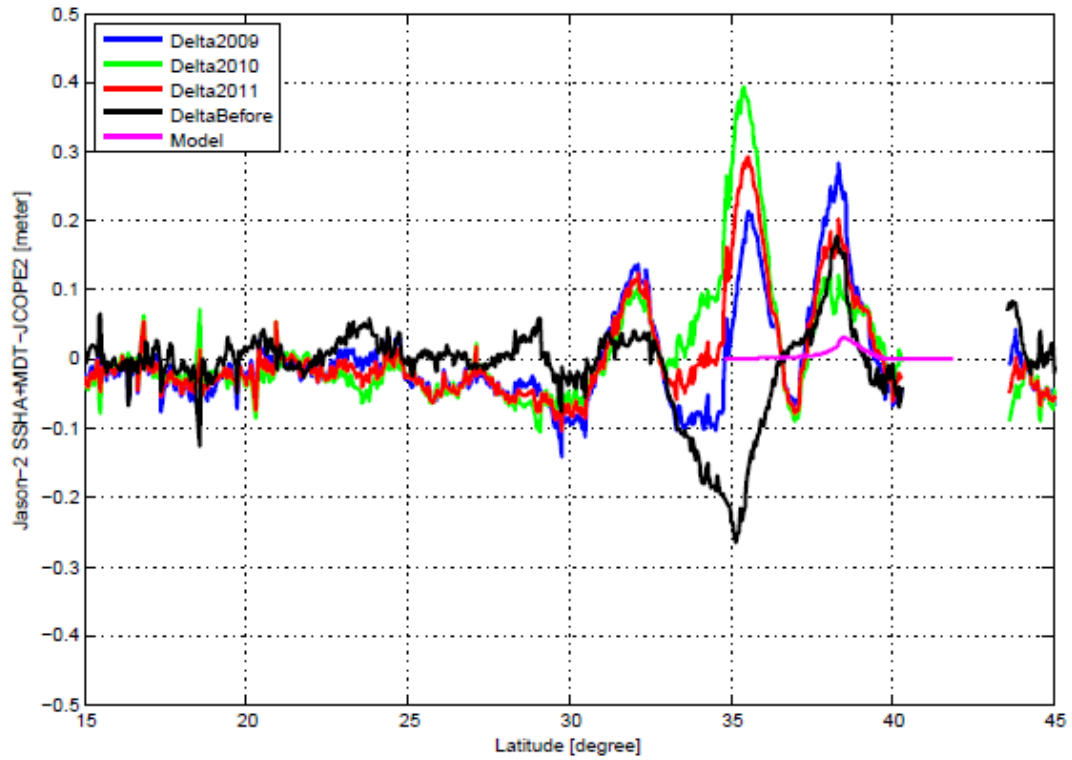


図 5.3 パス 238 とパス 177 における地震前後での比較

上からそれぞれパス 238, パス 177 での比較. 青い線が Delta2009, 緑の線が Delta2010, 赤の線が Delta2011, 黒い線が DeltaBefore をそれぞれ示す.



パス 238 の比較において、北緯 38 度付近で、正の推移が見られその値は約 20cm 程度であった。この地点はモデル計算の結果ジオイド変化が最大になる地点であるが、期待されるジオイド変化は 3.5cm 程度であるため(図 3.3 参照)、モデル計算の結果とはかなりかけ離れているといえる。また、DeltaBefore についても同様の地点で 18cm 程度の正の推移が見られ 2011 年のデータによってこの正の推移が現れているのかははっきりとしていない。さらに、北緯 35 度付近には絶対値 30cm 程度の大きなばらつきが見られるが、これは黒潮続流によるもののはずである。また、Jason-2 で設定されている黒潮続流の位置と、JCOPE2 で設定されているもの間に、わずかながらのずれがあり、そのずれもこのばらつきに関係があるはずである。

パス 177 については、北緯 38 度付近で負の方向に推移している。モデル計算から得られた値の推移と比較すると、変化の傾向は位置に若干のずれがあるものの、同じような傾向をしめしており、DeltaBefore のみが別の傾向となっていることから、これは 2011 年のデータが影響を与えているといえるだろう。しかしながら、モデル計算では、この付近で最大 1.5cm 程度の負のジオイド変化が期待される(図 3.3 参照)が、この結果では約 10cm の変化となっており、パス 238 同様かなり期待値とはかけ離れている。このように、両者ともかなり理論値とはかけ離れた結果となってしまっている。様々な原因が考えられるが、その一つとしてジオイド変化の持つ波長よりも長波長の変動が除去しきれていないことが考えられた。そのため、次の章では High Pass Filter (低周波除去フィルター)を用いたフィルタリングを行った。

## 5.2 High Pass Filter の適用

High Pass Filter (低周波除去フィルタ)はその名が示す通り, ある一定のカットオフ周波数  $f$  以下の周波数をもつ信号を除去するためのフィルタである. 周波数帯での, その概念図を以下に図 5.4 として示す.

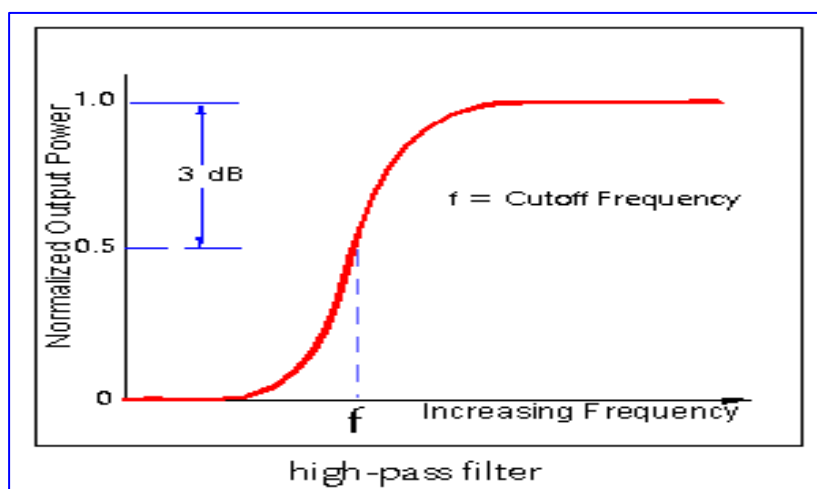


図 5.4 周波数帯での High Pass Filter の概念

(画像 : [http://www.tiaonline.org/market\\_intelligence/glossary/index.cfm?term](http://www.tiaonline.org/market_intelligence/glossary/index.cfm?term))

このフィルターを適用すれば, 黒潮続流や海洋潮汐といった, 地震時ジオイド変化よりも長周期の海面高度変動を除去できると考えられる. また, 今回は周波数帯の High Pass Filter を空間の変動に用いた. 緯度 1 度あたりの周波数を 1HZ として, それぞれ波長が 0.2 度および 0.1 度以上の変動を除去するフィルターをパス 238 から得られた変動に適用した. (図 5.3 参照)

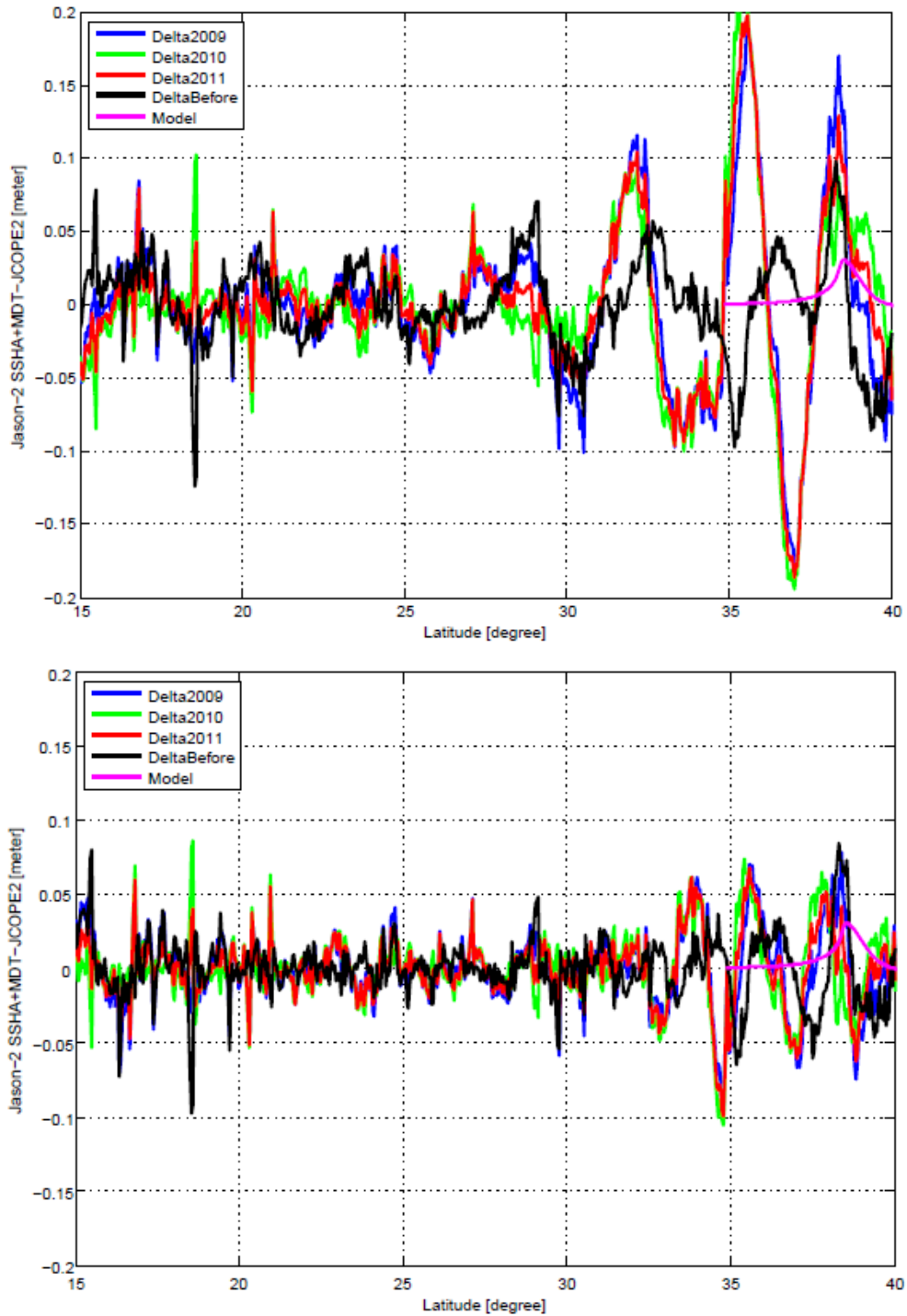


図 5.5 フィルターの適用結果

上から波長が 0.2 度、0.1 度以上の変動を除去したもの。  
 ピンク色の線はモデル計算から得られた値の推移を示す。

Delta2011 で北緯 38 度地点に見られた 20cm 程度の変動は，上の図で 13cm 程度，下の図では 5cm 程度までそれぞれ減少している．しかしながら，カットする変動の周波数を上げれば上げるほど，今回検出が予想される地点以外でも同様の変動が見られるようになり，これをもって確定的な検出というには程遠い結果であるといえよう．このような，高周波数の変動を除去するために Low Pass Filter (高周波除去フィルター) の運用も合わせて考えていく必要もあるといえるだろう．

## 6. まとめと今後の課題

今回の研究では国土地理院発表震源断層モデルを用いた第 0 近似的なモデル計算を基に、衛星海面高度計 Jason-2 による東北沖地震に伴うジオイド変化の検出を試みた。同衛星のパス 238 とパス 177 から得られた SSHA+MDT について JCOPE2 SSH データによる補正を行った。これについて、2009 年～2011 年の同時期の平均を比較することにより、パス 238 では、ジオイド変化が最大となる北緯 38 度地点に 20cm 程度のシグナルが見られた。しかし、これは理論値 (3.5cm 程度) の 5 倍以上であることに加え、ジオイド変化 0cm が予想される北緯 35 度付近でも大きな値が見られていることから、長波長の Jason-2 SSHA には JCOPE2 では除去しきれていない海洋変動影響が残っている可能性が高い。長波長の変動を除去するために行ったフィルタリングでは、北緯 38 度付に存在するシグナルと区別がつかないようなシグナルが他の緯度にも見られ、その確定的な検出には至らなかった。

今後はまずモデル計算の結果の見直しから行いたい。具体的には、海底地殻変動や水の荷重によるジオイド変化の影響も考慮し、理論値を確かなものとしていこうと考えている。実際、同震源断層モデルを用いて、地震に伴う海底地殻変動を計算してみた結果、局所的には 10m を超える地殻変動が予想され (下図 6.1 参照)、これは大いにジオイドを変化させる要因となるに違いない。また、Jason-2 SSHA データについても見直しの必要性が考えられる。SSHA の定義にもあった平均海水面 (Mean Sea Surface : MSS) 自体が、ある時期を境に、北緯 38 度付近では 5m 程度と、かなり変動していることに気付いたためである (下図 6.2 参照)。

さらに、ノイズの性質を他のパスでも調べるために、Jason-2 の従来機である Jason-1 のデータも合わせて運用していくことも考えている。Jason-1 のパスは Jason-2 と同様に全球をメッシュ状に覆っており、2008 年 2 月以前は現在の Jason-2 と同様のパスが使用されていたが、それ以後は以下に示すようなパスが用いられている。2008 年以前の過去のデータについて解析していくことは、今回パス 238 の解析で問題となった地震以前の正の推移を除去するために有用であるといえる。また 2008 年以降のデータについて解析し、北緯 38 度地点で同じような変化が見られるのであれば、今回検出された推移が地震によるものであることの、一つの裏付けともなりうるはずである。

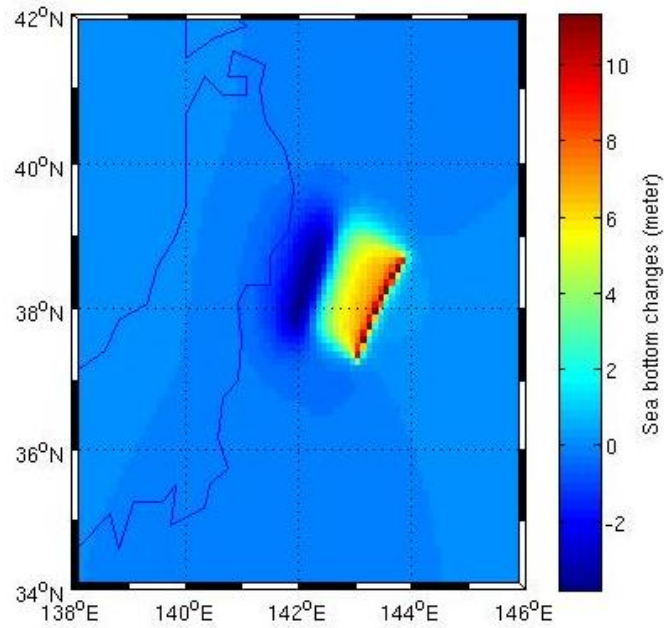


図 6.1 モデル計算による地震時海底地殻変動

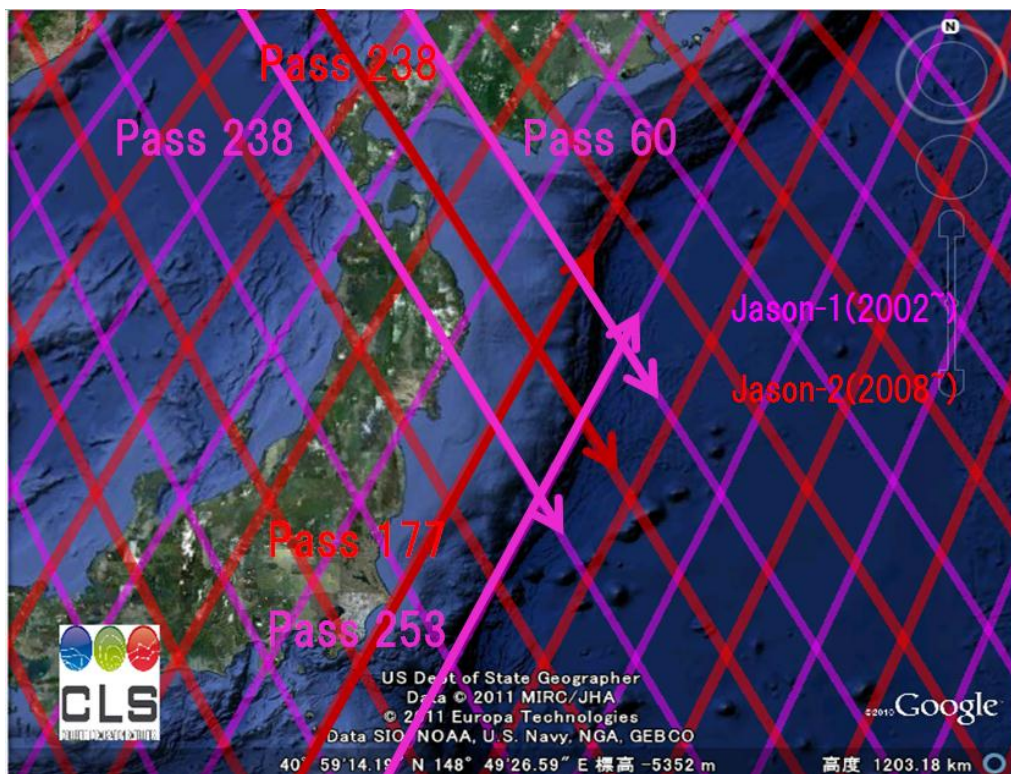


図 6.2 Aviso Pass Locator を使用して作成した Jason-1, Jason-2 のパス  
 (参考: <http://www.aviso.oceanobs.com/en/data/tools/pass-locator/index.html>,  
 Google earth)

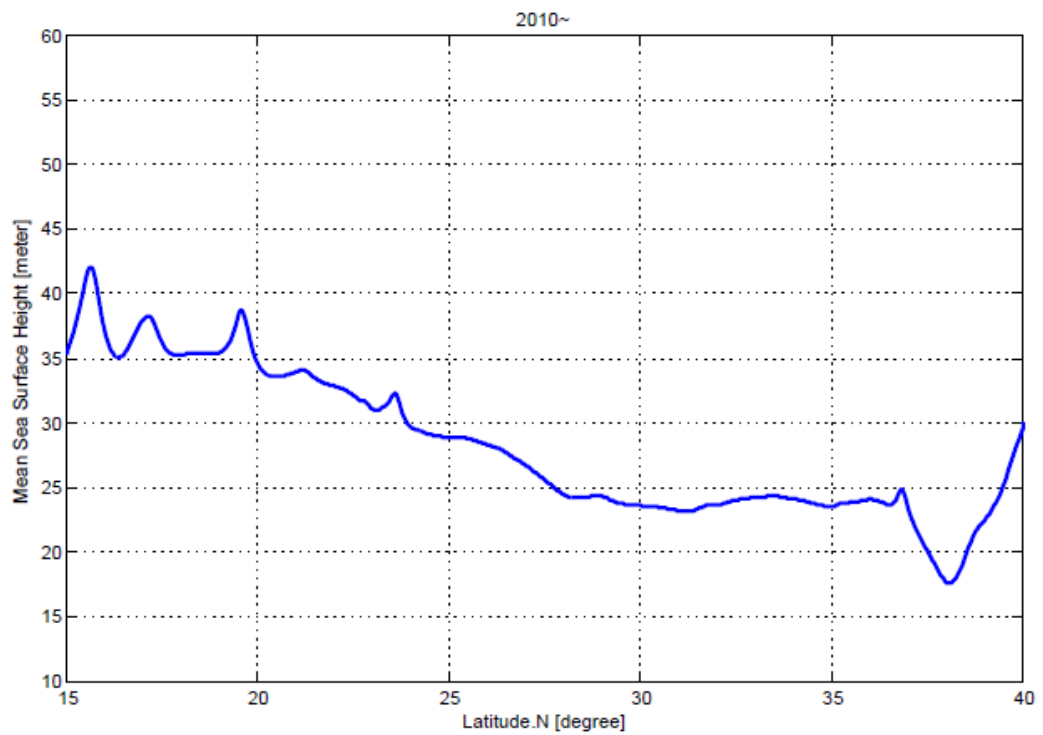
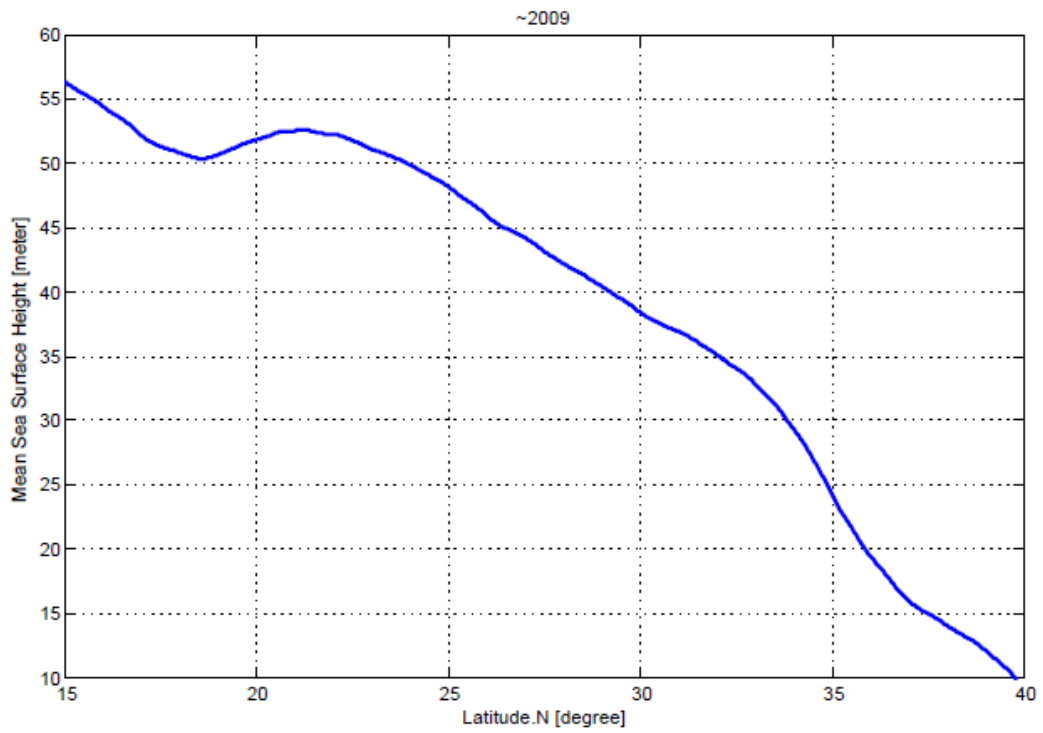


図 6.3 Jason-2 パス 238 から得られた MSS  
 上が 2009 年までのもの，下が 2010 年以降のもの

## 7. 謝辞

本研究を進めるにあたって、本当にたくさんの方々にご協力を頂きました。この場をお借りして感謝の意を述べさせていただきます。担当教官である古屋正人教授には、言葉では表せないほどお世話になりました。研究していく上で必須であったパソコンの初歩的な知識や、研究にあたっての心構えなどを、論文の輪読等を通して、ときに厳しく、そして本当に丁寧に教えて頂きました。本当にありがとうございました。今後も今までと同様に、何かとご迷惑をおかけすることがあると思いますが、よろしくお願い致します。また、同研究室の日置幸介教授をはじめとする固体系ゼミの先生方には、ゼミでの発表練習を通じて様々なアドバイスを頂きました。様々な角度からのご指摘は研究を進める上で非常に有用で、発表をするたびに、新たな課題を発見することができました。ありがとうございました。今後も至らない点が多いと思いますが、よろしく願いいたします。

同研究室の先輩方には、研究室での生活の仕方や研究の進め方について教えて頂きました。真面目な話から他愛のない話まですごくたくさんのお話をさせていただいた気がします。その中で得たことは今後の自分にとって重要なことで溢れていたと思います。そして、私と同学年の葛西さん、田中君、山本君とは、研究をすすめる中で様々な初めてを一緒に経験してきました。特に最初の発表時は、あの何とも言えない緊張感を味わったのが良い思い出です。それぞれ進路は違うと思いますが、これからも励まし合いつつ、お互い充実した道を進めたらと思います。ありがとうございました。

この一年間は今までの人生の中で、いろいろな意味で成長できた一年だったように思います。皆様のご協力のおかげで、一回り大きくなれた気がします。本当にありがとうございました。そして、これからもよろしく願いいたします。

なお、今研究で補正に用いた JCOPE2 SSH データは、独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境変動領域 宮澤泰正 博士、章若潮 博士のご協力のもと、使用させていただきました。



## 8. 参考文献

- D. B. T. Broerse, L. L. A. Vermeersen, R. E. M. Riva, W. van der Wal (2011) : Ocean contribution to co-seismic deformation and geoid anomalies: Application to the 2004 December 26 Sumatra-Andaman earthquake, *EPSL* 305 341-349
- D. Melini, G. Spada and A. Piersanti (2009) : A sea level equation for seismic perturbation, *Geophys. J. Int.* 180 88-100
- Koji Matsuo & Kosuke Heki (2011) : Coseismic gravity changes of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake from satellite gravimetry
- SYUHEI OKUBO (1992) : Gravity and Potential Changes due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space, *JGR* 97 7137-7144
- Yutaka Hayashi, Kenji Hirata, Tsurane Kuragano, Toshiyuki Sakurai, Hiromi Takayama, Yohei Hasegawa, and Nobuo Hamada: Feasibility study on the potential satellite altimetry for detecting seismic geoid changes due to the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *EPS* 59 1149-1153
- 宮澤泰正, 郭新宇, 清松啓司, 角田智彦, 瀬藤聡 (2009) : JCOPE 海洋変動予測システム-ダウンスケーリングによるスケール間相互作用の解明に向けて-, 「月刊海洋」特集「駿河湾・相模湾の生態系に対する黒潮変動の影響」41 3 162-170
- Kagimoto, T., Y. Miyazawa, X. Guo, and H. Kawajiri, 2008: High resolution Kuroshio forecast system -Description and its applications-, in *High Resolution Numerical Modeling of the Atmosphere and Ocean*, W. Ohfuchi and K. Hamilton (eds), Springer, New York, 209-234.
- Dumont et al. (2009) : OSTM/Jason-2 Products Handbook
- Google earth: <http://earth.google.com>
- 国土地理院 HP: <http://www.gsi.go.jp>
- 気象庁 HP: <http://www.jma.go.jp>
- 日本測地学会測地学テキスト WEB 版: <http://wwwsoc.nii.ac.jp/geod-soc/web-text/>
- 日本地震学会 HP: <http://www.zisin.jp/>