

G N S S 局の上下変動 1996-2016; 西南日本の速度プロフィール

北海道大学理学部地球惑星科学学科 4 年
宇宙測地学研究室

02130964

岩佐 優太郎

指導教官 日置 幸介 教授

概要

GNSS(Global Navigation Satellite System 全地球航法衛星システム)の観測は、地殻変動の研究において大きな役割を果たしている。GNSSを用いて観測された地殻変動から、地震の断層運動や震源メカニズムが解明されている。また、火山活動に関連する地殻変動は火山防災にも寄与している。またプレート境界地域における歪の蓄積をあらゆる普段の地殻変動は、プレート間の力学的な結合(カップリング)に関する情報を与えてくれる。しかしそれらの研究成果の多くは、地殻変動のうち主に水平成分の解析に基づいており、本来3次元的情報であるGNSSの観測量のすべてを有効に利用できていない。これは上下成分が水平成分に対して精度が悪いためである。

一方、プレート境界領域では、地殻変動の水平成分が剛体プレートの動きとプレート間カップリングの2つの成分を含むのに対して、上下成分にはプレート間カップリングの情報のみが含まれている。そのため、プレート間カップリングの議論をする上では上下成分のほうが水平成分より扱いやすい。Aoki and Scholz(2003)は1996-1999の3年間のデータを用いて日本列島の地殻上下変動を解析しているが、より長期のデータを扱うことで、より高精度の解析結果が期待できる。本研究では、我が国の稠密観測網であるGNSS連続観測システムGEONET(GNSS Earth Observation Network)における、1996-2016の20年間という長期の局位置の時系列データを用いて、地殻の上下速度の推定精度の向上を試みた。特に、西南日本の室戸岬から隠岐の島にかけて上下速度のプロファイルを用いて、西南日本のプレート間カップリングの様子について詳細な解析を行った。

2011年の東北沖地震の前に日本海溝におけるプレート間カップリングが数年の時間スケールで段階的に弱くなっていたことが報告されているように、地震サイクルとプレート間カップリングの変化は何らかの関係を持っている。南海トラフはフィリピン海プレートが沈み込むプレート境界であるが、そこを震源域とする超巨大地震が、数年から数十年以内に発生することが予想されている。本研究では、室戸岬-隠岐の島間の地殻上下変動を南海トラフからの距離の関数として解析し、現在のプレート間カップリングを推定した。約20年という長期のデータを扱うことにより、先行研究より高い精度でカップリングの情報を得ることが出来た。

本研究ではさらに、上下位置を時間の二次式でモデル化することにより、カップリングの時間変化の有無を議論した。南海トラフに近いGNSS局は沈降、少し離れたGNSS局は隆起しているが、カップリングの時間変化があればそれらの局に現れる加速度の符号も様々になるはずである。一方、加速度が単に基準点の動きによる見せかけの結果であれば、二次の項はすべての局に一樣な値として現れる。本研究では、GNSS局の上下の動きに関し、推定された一次のトレンドと二次の加速度成分の関係を明らかにし、二次の成分が実際の変化なのか見かけの変化なのかを検証した。その結果、多少の誤差があるものの、基準点の動きによる見かけの変化である可能性が高いという結論を得た。

目次

1	はじめに.....	3
1.1	宇宙測地技術と地殻変動.....	3
1.2	GEONET.....	3
1.2.1	GEONET とは.....	4
1.3	上下成分と地殻変動.....	6
1.4	プレート間カップリングと地震.....	7
1.5	南海トラフ.....	9
1.6	先行研究と研究目的.....	9
2	観測地域と解析手法.....	12
2.1	観測地域.....	12
2.2	用いたデータと解析手法.....	13
3	結果.....	14
3.1	時系列解析.....	14
3.2	上下速度とカップリング.....	19
4	考察.....	22
4.1	上下速度による解析.....	22
4.2	非線形成分の有無.....	22
5	まとめと今後の課題.....	29
6	謝辞.....	30
7	参考・引用文献.....	31

1 はじめに

1.1 宇宙測地技術と地殻変動

近年宇宙測地技術は急速に進歩してきた。従来の測位は三角測量や三辺測量に代表される地上測量が一般的であったが、現代では、VLBI(Very Long Baseline Interferometry: 超長基線電波干渉計), SLR(Satellite Laser Ranging: 人工衛星レーザー測距), GNSS(Global Navigation Satellite System: 全世界航法衛星システム)などの宇宙測地技術が精密測位の主流となっている。これらはいずれも、基本的には地球上に置かれた観測点の間の相対位置や距離(基線長)を正確に測定する技術であり、様々な測定点の地球上での3次元的位置が決定されている。VLBIが人工衛星を用いない天体からの電波を利用した測定, SLRが衛星とレーザー光を用いた地上からの測定, GNSSが衛星から送信されるマイクロ波を受信するコンパクトな受信機による測位など、それぞれに固有の特徴を持ち、それらを生かして利用されている。現在、その測定精度はいずれもmmのオーダーに達している。最近では、面的な地殻変動の把握にSAR(Synthetic Aperture Radar: 合成開口レーダー)の利用も盛んに行われている。

なかでもGNSSの一つであるGPS(Global Positioning System: 全地球測位システム)は最も私たちに身近な宇宙測地技術と言える。もともとは米軍による位置計測システムであったが、現在では、測量や精密測位はもちろん、カーナビゲーションや携帯電話など日々の生活における位置情報を与えるインフラストラクチャーとして我々の生活に欠かせないものとなっている。

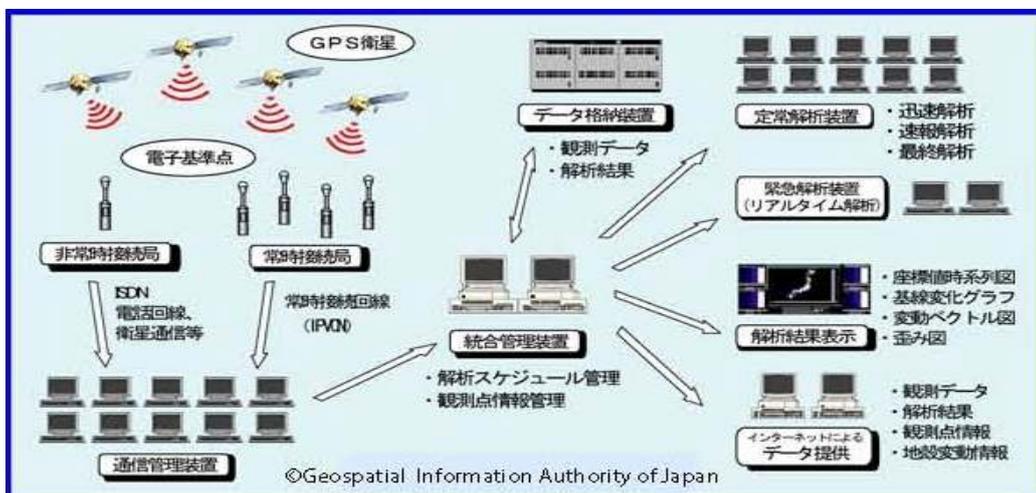
GPSは、地球を周回するGPS衛星群とそれらを地上でコントロールする管制局群とで構成されている。GPS衛星群は、24個の衛星が赤道面に対して 55° の傾きを持つ6つの軌道面に、それぞれ4衛星ずつ配置された構成になっている。各軌道面は、衛星が南から北へ赤道面を横切る点の赤経が 60° ずれるようにしてあり、それぞれ記号がつけられている。衛星は、軌道半径約26,560kmの概略円軌道を約12時間の周期で回っている。これらの衛星配置により、地球上どこでもGPS衛星が常に4衛星以上同時に観測できるようになっている。このほかに予備の衛星も打ち上げられており、現在約30衛星が稼働している。管制局群は、世界中に配置されたGPS衛星の追跡観測網で構成されている。赤道に近い全世界5か所の監視局の観測データを基に、米国コロラドにある主管制局でGPS衛星の軌道を計算・予測し、その結果は地上管制局のアンテナからGPS衛星に送られる。本研究で用いるGEONET(GNSS Earth Observation Network)は国土地理院により我が国に展開されたGNSS稠密観測網であり日本列島に配置された千点を超える地上局の3次元の変位量を得ることができ、24時間365日連続観測が行われている。

1.2 GEONET

1.2.1 GEONET とは

GEONET とは、全国約 1300 か所に設置された電子基準点と GEONET 中央局(茨城県つくば市)からなる、GNSS 連続観測システムである。1994 年に COSMOS-G2(Continuous Strain Monitoring System with GPS by GSI)という名称で南関東、東海地域で合計 110 か所の運用が開始され、続いて全国 100 か所に電子基準点が整備され、こちらのシステムは GRAPES(GPS Regional Array for PrEcise Survey-ing)と呼ばれていた。1996 年度に COSMOS-G2 と GRAPES が統合されて GEONET としての運用が開始された。2001 年に新解析(F1)が導入されてから、2002 年には改正測量法が施行され世界測地系へ移行、電子基準点データが公共測量で使用可能になり、電子基準点日々の座標値(F1)が提供開始された。その後 2004 年に新解析(F2)による新 GEONET の運用が開始されると、2009 年から新解析(F3)による定常解析の運用が開始された。

GEONET の大きな役割は 3 つであり、1 つ目は高精度な測定の基準の提供であり、電子基準点は測定の既知点として利用できることで、既知点での観測が不要となり効率的な測量が行える。2 つ目は位置情報サービスの支援であり、電子基準点のリアルタイムデータは高精度測位のために必要な補正情報の生成等に利用される。リアルタイムの高精度測位技術は情報化施工等に利用される。3 つ目に地殻変動の監視であり、GEONET では各電子基準点の日々の座標値(緯度、経度、高さ等)を計算し、提供している。この座標値の変化を監視することで、プレート運動、地震、火山活動等に伴う地殻変動を把握することが出来る。



GEONET の局は電子基準点とも呼ばれている。三角点や水準点等と同様に、測量法で定められている永久標識の一種であり、GPS アンテナ取り付け部の中心位置の座標値が、測量法に基づく測量成果として公開されている。電子基準点を既知点として GPS 測量を行う場合、電子基準点のデータを用いることにより、新点で GPS 観測を行うだけでよい。従来よりも迅速かつ効率的に測量を行うことが可能となる。一般的な電子基準点の外観は高さ約 5 m のステンレス製の柱で、その頂部に GPS 衛星からの電波を受信するアン

テナが設置され、柱内部に GPS 受信機，通信用機器等が格納されている(図 1.2)。また，一部の電子基準点では，災害による停電時にもその機能を維持するための大容量のバックアップ電源や，地震等による電子基準点自体の傾斜を迅速に把握するための傾斜計を設置している。

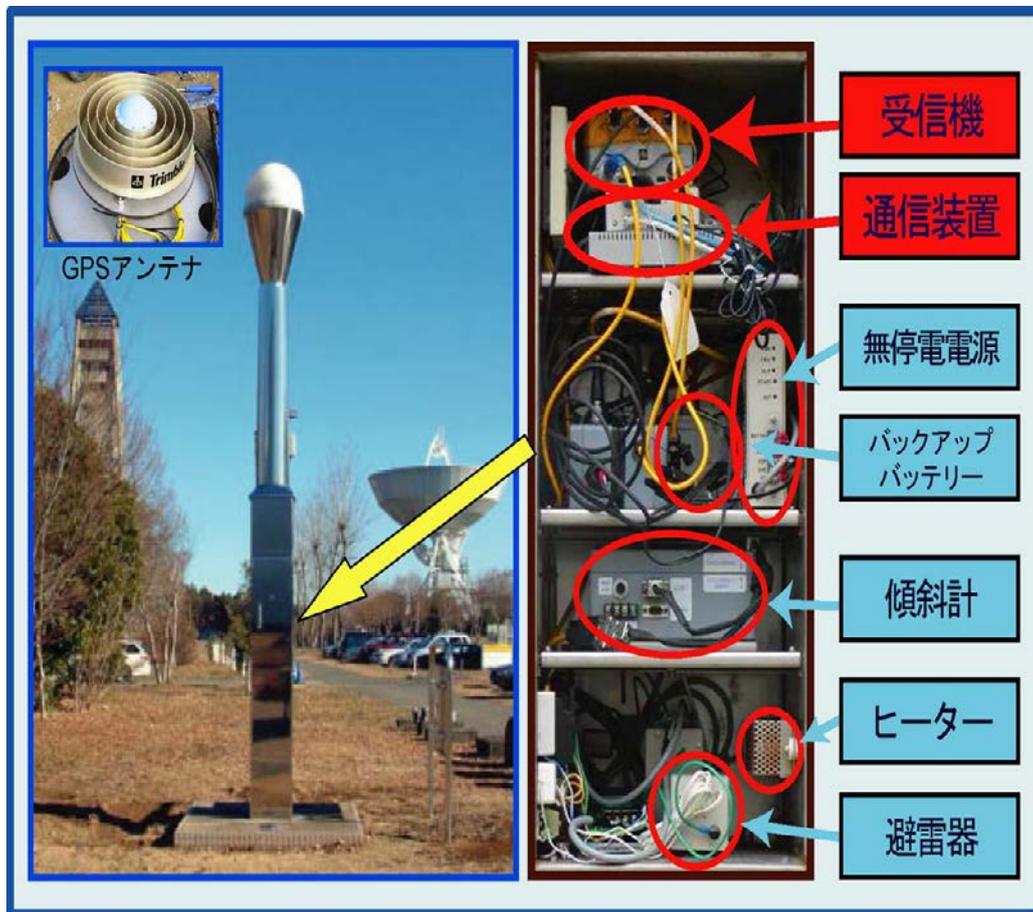


図 1.2 電子基準点内部の機器構成 (国土地理院HPより引用)。高さ約 5m のステンレス製のピラーの上部にレドームとアンテナが格納されている。受信機はピラーの中に格納されており，局所的なピラーの傾動などをモニターするための傾斜計等も装備されている。

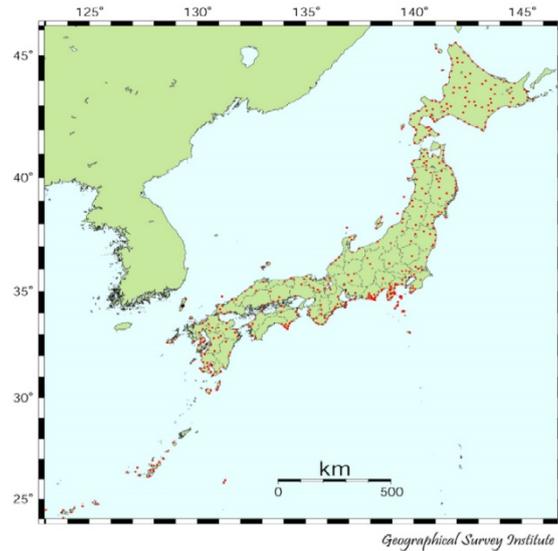


図 1.3 電子基準点配置図 (国土地理院HPより引用)

電子基準点が受信したデータは、1秒ごとのデータがリアルタイムで茨城県つくば市の国土地理院測地観測センターが管理する中央局に送られるとともに、30秒毎のデータが受信器内部に記録され、通信障害等でリアルタイムデータが送信できなかった場合も、最低限のデータは失われないようになっている。これらのデータを用いて、すべての電子基準点の位置定常的に求められており、その情報は地殻変動解析に利用されるとともに、基準点利用者へのデータ配信等にも用いられている。

1.3 上下成分と地殻変動

本研究で扱う上下成分は、GNSS連続観測システムによる位置決定精度において水平成分に比べて低く、気象等の影響による年周変化もきわめて大きい。しかし長期間のデータを解析することによって、その間の変動速度を比較的精度良く求めることが可能である。水平成分が堅いプレートの動きとプレート間カップリングの2つの情報を含んでいるのに対して、上下成分はプレート間カップリングのみの情報を得ることが出来るので、高い精度で上下成分の解析が出来るとすればとても有用である。

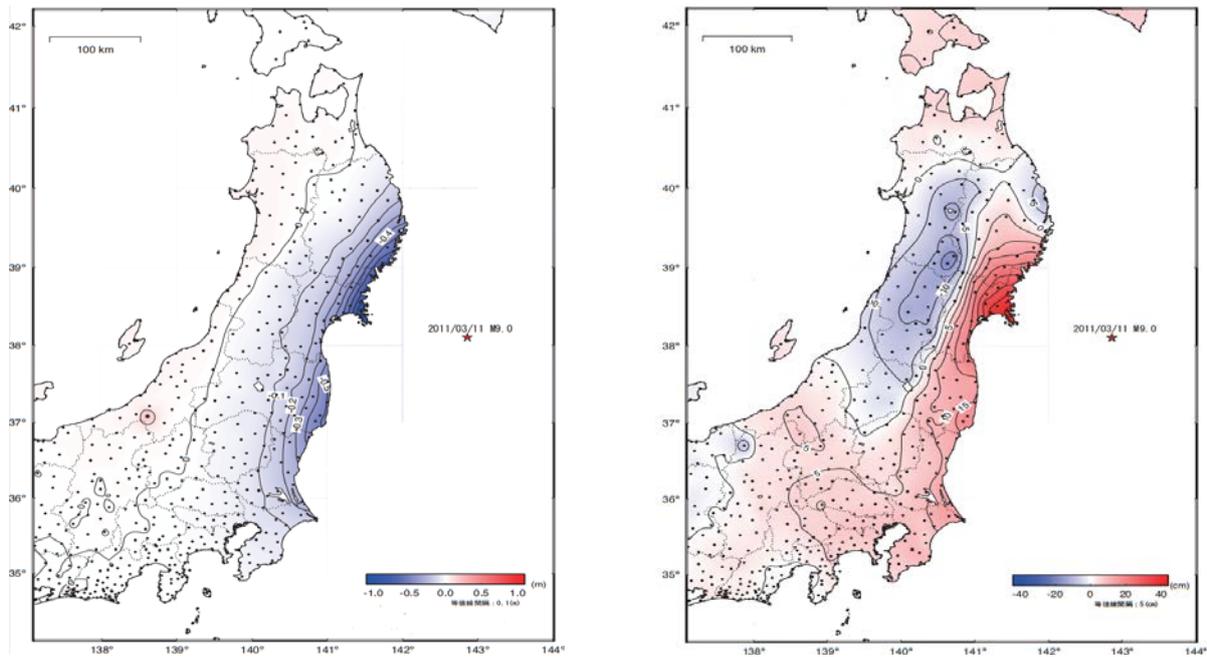


図 1.4 GEONET で観測された地震時（左）および地震後の地殻上下変動（国土地理院HPより引用）。平成 23 年東北地方太平洋沖地震の上下変動量。本震前後では最大 1 m を超える沈降が観測されている（左）。本震翌日から 5 年間の累積では、内陸部の沈降に加えて沿岸部の隆起も観測されている（右）。

上下成分と地殻変動，特に地震との関係について東北沖地震を例に簡単に説明する(図 1.4)。東北地方太平洋沖地震はモーメントマグニチュード $M_w9.0$ という日本の観測史上最大の地震であり，日本海溝から沈み込む太平洋プレートと東北地方が乗っている北米プレートとの間で起きたプレート境界地震（海溝型地震とも呼ばれる）である。海溝型地震が発生すると，海溝近くでは顕著な隆起が、やや離れたところでは沈降が観測される。東北地方太平洋沖地震発生時には、海溝と陸地が離れているため、隆起域は海底にあり、津波の主な原因となった。陸地では、東北地方太平洋沿岸を中心に沈降が観測され，電子基準点「牡鹿」で最大の約 1.2 m の沈降が観測された（図 1.4 左）。地震後のゆっくりした地殻上下変動も顕著である（図 1.4 右）。地震時と同じく沈降している地域と隆起している地域があるが，地震時の変動と比較するとその変動量の絶対値は小さい。それでも地域によっては，地震前から 5 年間の累積では約 80 cm と大きく沈降している。

1.4 プレート間カップリングと地震

地球の表面はプレートと呼ばれる十数枚の硬い岩盤で覆われている。個々のプレートは剛体に近くプレート内部の変形は非常に小さい。しかし各プレートが異なる方向に運動しているため，異なるプレートが接する境界ではプレート間の相互作用によって様々な現象が生じる。プレート境界は，2つのプレートが次第に離れて広がる場所(プレート発散境界)，プレート同士がすれ違う場所(プレート横ずれ境界)，プレート同士が互いに近づく場所(プ

プレート収束境界)に分けられる。さらに、プレート収束境界には、一方のプレートがもう一方のプレートの下に沈み込む場所(プレート沈み込み帯)と 2 つのプレートが衝突している場所(プレート衝突帯)がある。日本周辺の日本海溝や南海トラフ、中南米の太平洋沿岸地域などはプレート沈み込み帯の典型である。

プレート境界で大地震が発生するメカニズムについて考える。大地震が起きるプレート境界は通常固着しており、プレート間のずれが生じない。プレート境界において双方のプレートが互いにすべっていない状態のことを、プレートがカップリングしている(固着している)という。2 つのプレートはそれぞれ固有の速度で運動しているため固着したプレート境界周辺でプレートが変形し、弾性エネルギー(ひずみ)が蓄積する。この変形によって生じるプレート境界の剪断応力がプレート境界の固着強度よりも低いとプレート境界は固着したままである。しかし、プレート運動の進行によってプレート境界の剪断応力は次第に増加する。そして応力が固着強度に達するとプレート境界面は破壊し、断層のずれが生じて、プレート内に蓄積された弾性エネルギーが解放される。これが大地震の発生である。この後はしばしば余効すべりが継続するが、そのうちプレート境界面では固着が回復し、プレート運動に伴って次の大地震へ向けたエネルギーの蓄積が再開される。プレート境界では、このようにプレート境界の固着による応力の蓄積と地震発生による応力解放が繰り返されている。また、こうした大地震の繰り返しを地震サイクルと呼び、西南日本太平洋側の南海トラフでは大地震が 120 年程度の間隔で繰り返しており、プレート境界における地震サイクルの典型的な例である。

本研究で議論する南海トラフ、前節で紹介した東北地方太平洋沖地震はプレート沈み込み帯である。プレート沈み込み帯における非地震時の地殻変動を表すモデルでは、海洋プレートがプレート境界面の固着を伴わずにずるずると定常的に沈み込むのを基本状態と考える。プレート境界の固着を表すために、プレート境界面の固着域に仮想的な正断層すべり(すべり欠損)を仮定することで地殻変動が表現できる。さらに、基本状態である定常的な沈み込みが有意な地殻変動を伴わないと仮定すれば、すべり欠損だけで地表の地殻変動を説明できる。これがいわゆるすべり欠損モデルである(図 1.5)。すべり欠損モデルは扱いが簡単なことから、非地震時の地殻変動からプレート境界の固着域や固着の度合いを推定する目的で広く利用されている。

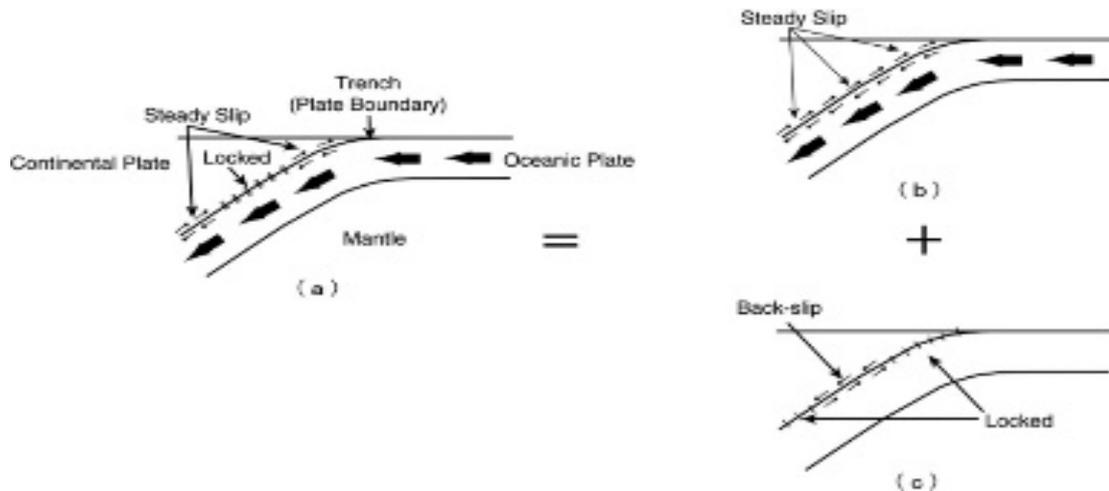


図 1.5 すべり欠損モデルの概念図（日本測地学会HPより引用）

プレート境界が完全に固着している場合，推定されるすべり欠損ベクトルは理想的にはプレートの相対運動ベクトルと同じ大きさで逆を向く．すなわち，沈み込み帯のプレート境界では正断層型のすべりが推定されることになる．このためすべり欠損はしばしば「バックスリップ」と呼ばれる．一方，すべり欠損がゼロになる場合やプレート相対運動と同じ向きすべりが推定されることもある．前者の場合はプレート境界で固着が起こらず，長期平均的なプレート運動の速度でなめらかに動いていることになり，後者の場合はプレート運動速度よりも速い速度でプレート境界がずれていることを意味する．

1.5 南海トラフ

南海トラフは，西南日本の太平洋沖の海底にある水深 4000m級の深い溝(トラフ)のことである．北西方向に進んできた密度の高い海洋プレートであるフィリピン海プレートが，密度の低い大陸プレートであるアムールプレートと衝突してその下に沈み込む，プレート収束境界である．この南海トラフを震源域として発生する巨大地震は南海トラフ巨大地震と呼ばれ，約 100-200 年ごとに発生している．一つの大きな地震として発生する場合と，東西の二つのセグメントに分かれて別々に発生する場合は知られている．二つに分かれる場合は，過去の事例では通常東側で先に地震が発生し，やや遅れて西側で発生する．最も新しい南海トラフ巨大地震は，1944 年に紀伊半島南東沖を震源とする東南海地震，1946 年に同じく紀伊半島南方沖を震源とする南海地震の二つである．すでにその後約 70 年が経過し，次の南海トラフ地震の発生が近づいていることが懸念されている．

1.6 先行研究と研究目的

Aoki and Scholz (2003)は，日本列島の地殻上下変動を 1996-1999 年の GPS データを用いて研究した．信号対雑音比が低いため，水平成分と比較して上下成分が研究対象とされ

ることは一般的に少ない。しかし彼らは、水平成分が剛体プレートの動きとプレート間カップリングの2つの情報を含んでいるのに対して、上下成分はプレート間カップリングの情報のみを含むという点に着目して、本研究と同様に上下成分の時系列解析からプレート間カップリングについて議論した。本研究の目的の一つは、彼らより長期間のデータを用いることによって、より高精度で上下速度を推定し、それを用いてカップリングの解析を行うことである。先行研究が3年間のデータのみを用いているに対して、本研究では1996-2016年の20年間のデータを用いる。それによって、上下速度の推定精度は一桁以上改善することが期待される。

先行研究では、時系列解析によって求められた上下速度を南海トラフからの距離の関数としてプロットし、プレート境界を深さ方向に複数のセグメントに分け、それらのセグメントにおけるプレート間カップリングを推定した。その結果浅い部分の強いカップリングが、深い部分では弱いカップリングに遷移してゆくことを見出している。本研究においても同様の解析を行い、さらに、`dc3d.f`(Okada,1992)による、断層すべりから地表変位を求めるグリーン関数を求めるライブラリーを利用することで、上下地殻変動からプレート間カップリングを推定した。

2011年の東北地方太平洋沖地震の前にカップリングが弱くなっていたことが報告されており、数十年以内に南海トラフ巨大地震が発生すると予想される西南日本の地域においても、カップリングの時間変化が生じている可能性がある。20年という長期間のデータを用いることによって、上下速度の変化の有無を検証し、地震サイクルの中における西南日本の地殻変動の枠組みでその意義を議論する。

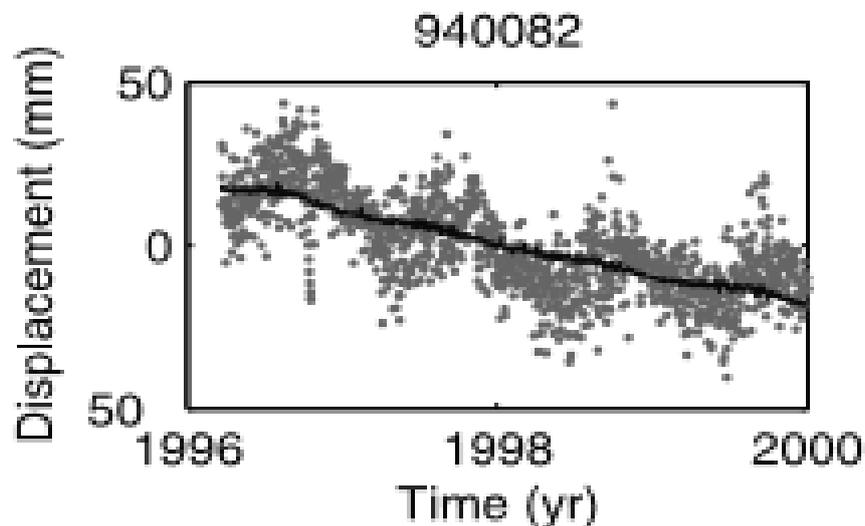


図 1.6 940082(室戸)の上下成分の時系列 (Aoki and Scholz, 2003). 灰色の点は一日毎のGPSの測位解を示し、季節変化を考慮しつつ黒い直線をフィットさせている。この図では、室戸局が沈降していることを示す。

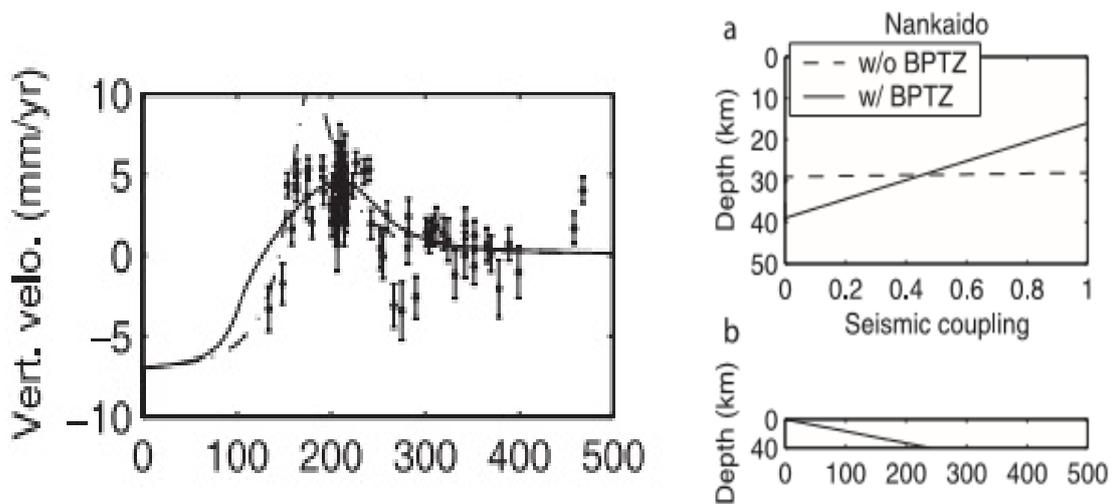


図 1.7 西南日本の GNSS 局の上下速度を南海トラフからの距離(km)の関数としてプロットしたもの(左), およびプレート間カップリングが 30 km で急になくなるとしたモデル (波線) と深さ 40 km までで遷移的になくなると仮定したモデル (実線) (右上)とプレート境界の断面図 (右下). 左の図の実線と波線の曲線はそれぞれのモデルに基づく理論的な上下速度 (Aoki and Scholz, 2003). 遷移帯を仮定した実線の方が観測を良く説明する.

2 観測地域と解析手法

2.1 観測地域

本研究で取り上げた観測地域は、西南日本の室戸岬(北緯 33.1434 度, 東経 134.1035 度)から隠岐の島(北緯 36.1016 度, 東経 133.840 度)を結ぶ線とその周辺地域である. この地域はアムールプレート上に位置しているが, アムールプレートの下にフィリピン海プレートが沈み込む南海トラフから約 100 km の場所に室戸岬は位置しており, 室戸から隠岐までトラフからの距離を広範囲に取ることができる. 観測地域とそこに展開されている GNSS 局を図 2.1 に示す.



図 1.1 本研究で取り上げた観測地域(室戸から隠岐を結ぶ測線)と GEONET 電子基準点. 室戸局が 940082 であり, 隠岐島局は 950382 である.

2.2 用いたデータと解析手法

本研究では、GNSS 連続観測システムである GEONET の、1996–2016 年の 20 年間における上下変動データを用いた。測位解としては、国土地理院から提供される F3 解 (Nakagawa et al., 2008) を使い、アンテナ交換に伴う位置のとび (ステップ) についても国土地理院から公表されている補正値をそのまま適用する。GEONET の上下変動の生データに直線変化と季節変化を仮定してフィットさせることにより、電子基準点ごとに時系列解析を行った。本研究の解析における電子基準点の基準局は茨城県つくば市の中央局であり、上下変動を求めるため以下の式を使う。

$$Up = at + b + c^* \cos(2\pi t) + d^* \sin(2\pi t) + e^* \cos(4\pi t) + f^* \sin(4\pi t)$$

上記の観測方程式を用いて a-f の 6 つのパラメータを最小二乗法で推定することで上下変動が求まる。a がトレンドであり、c と d の項が年周変化、e と f の項が半年周変化、c-f の 4 つの項を合わせて季節変化となる。前節の観測地域の電子基準点でこの時系列解析を行い、上下変動の時間変化を調べるとともに、長期間のデータを用いて解析したことによる精度の向上を先行研究と比較することで検出する。

得られた結果よりプレート間カップリングについて議論するために電子基準点における上下速度を用いて、南海トラフからの距離ごとにプロットしモデルにフィットさせていく。ここで、地表上下運動とプレート間カップリングの関係を数値的に扱うために DC3D という防災科学技術研究所の岡田義光博士が開発した、断層すべりから地表変位を求めるサブルーチンライブラリー (Okada, 1992) を用いる。表 2.1 には用いたプレート境界の六個のセグメントの諸元を示す。

表 2.1 南海トラフにおけるプレート境界を表す 6 個のセグメントの諸元

セグメント No.	1	2	3	4	5	6
断層の幅 (km)	33.4	32.0	37.3	33.8	31.3	32.0
傾き (deg)	8.6	9.0	7.7	8.5	9.2	9.0
最上部の深さ (km)	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
トラフからの距離(km)	18.5	51.7	83.2	120.1	153.4	184.3
カップリング	?	?	?	?	?	?

表 2.1 はプレート境界の幾何学的な値を指定したものであり、本研究では二重線で囲まれた coupling に適当な数値を書き込み、計算された上下速度が観測と合うかを調べる。カップリングを微調整し、観測と計算が合うようにカップリングの強さを求める。完全にカップリングされている状態を最大の 1、カップリングされていない状態を最小の 0 として、浅い部分の強いカップリングが深さと共にどのようにゼロに遷移してゆくかを調べる。

3 結果

3.1 時系列解析

長期間の GEONET の上下変動データを扱うことによる精度の向上を確認するために、先行研究での 3 年間のデータを用いた室戸岬における上下変動の時系列解析と本研究での 20 年間のデータを用いたものを比較して示す。解析結果は GMT により出力した。

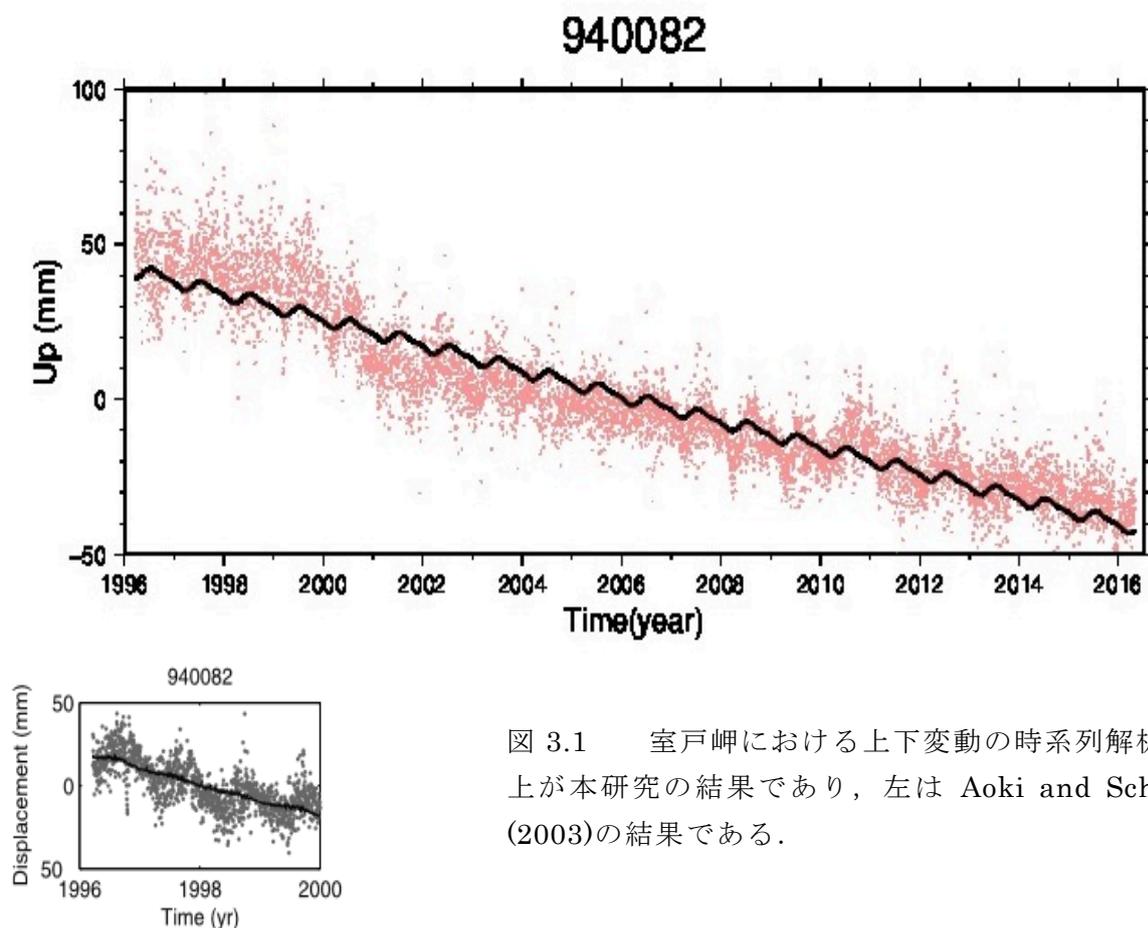


図 3.1 室戸岬における上下変動の時系列解析。
上が本研究の結果であり，左は Aoki and Scholz
(2003)の結果である。

本研究における時系列解析では，GEONET の上下変動生データを赤いドットでプロットし，そこへ 2.2 で述べたモデルに従って，季節変化と直線変化を仮定してフィットさせた (図 3.1)。2 つの図を比べてわかるように個々のデータのばらつきが少なく，長期のデータを使うことで変化率の推定精度が向上している。また，図 3.1 の本研究の結果からわかるように室戸局は 1996-2016 年の 20 年間で約 10 cm 沈降しているとともに，上下変動のトレンドは一定ではなく 2001 年と 2011 年付近で多少トレンドが変わっているように見える。このようなことがわかるのも，長期のデータを使うことによる利点である。フィットさせる直線を区切った結果を図 3.2 に示す。

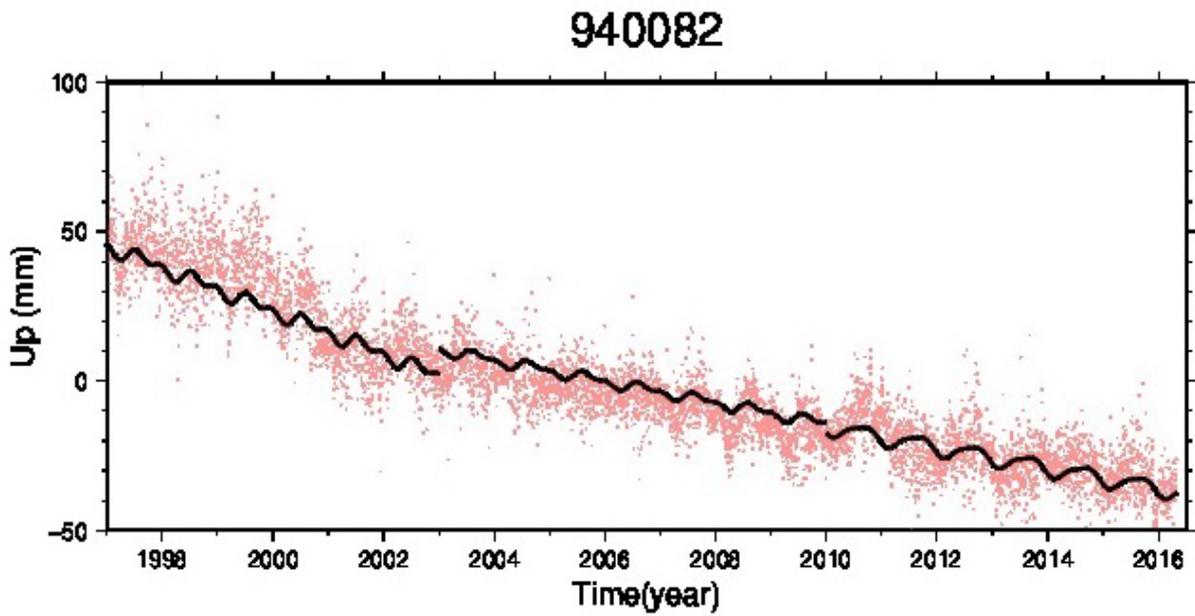


図 2.2 図 3.1 と同じ室戸の上下運動を，直線を 2003 年と 2010 年付近で区切って別々の直線をフィットさせた例

途中でトレンドが変化しているような局では，直線成分をいくつかの部分に区切ることでモデルへのフィットが良くなることがわかる．ただし，それがどのような地球物理学的意義を持っているのかは別途議論が必要である．

室戸岬から島根県隠岐の島までの電子基準局での上下変動を順に解析した結果として，まず，四国地方の結果を以下の図で示す．

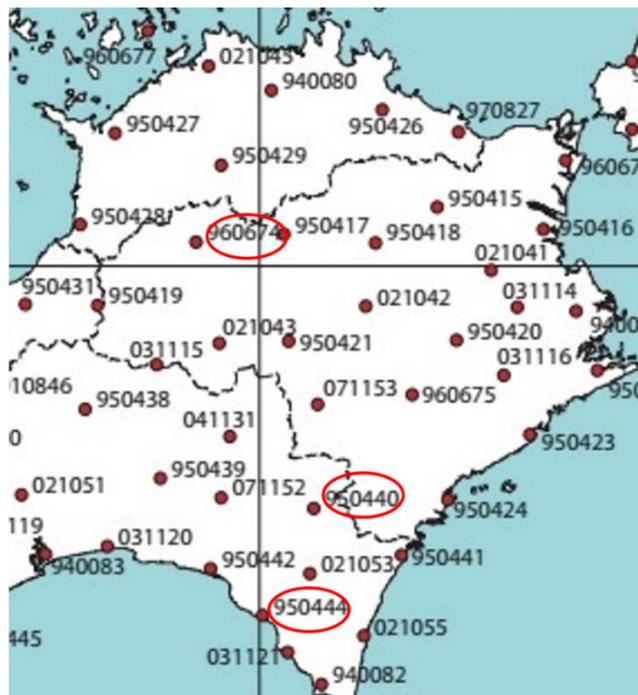


図 3.3 本研究で上下運動を解析した GNSS 局（四国）

950444

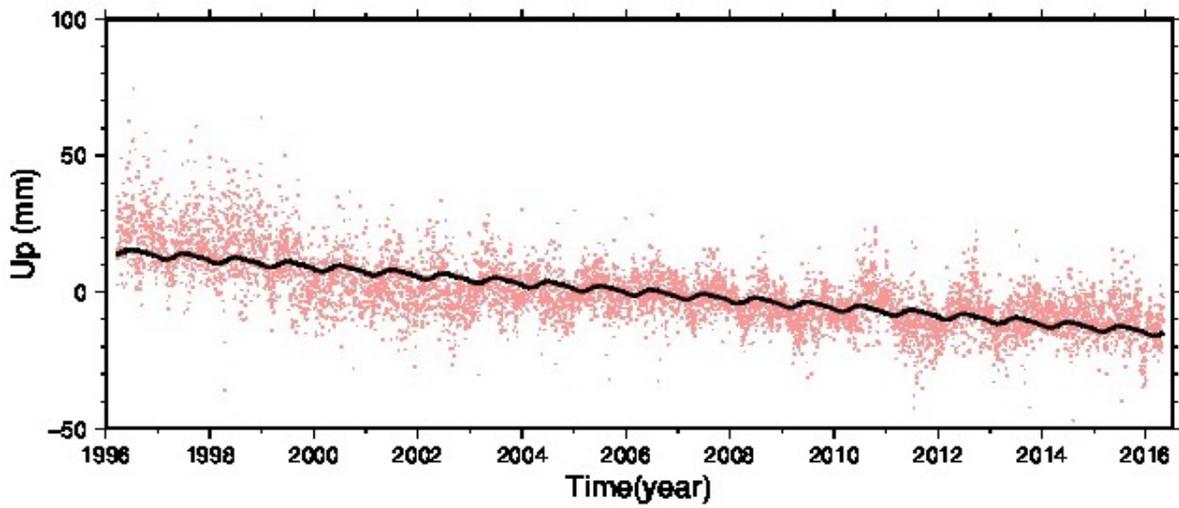


図 3.4 高知県田野町の GNSS 局の上下変動. 室戸よりやや小さな沈降が見える.

950440

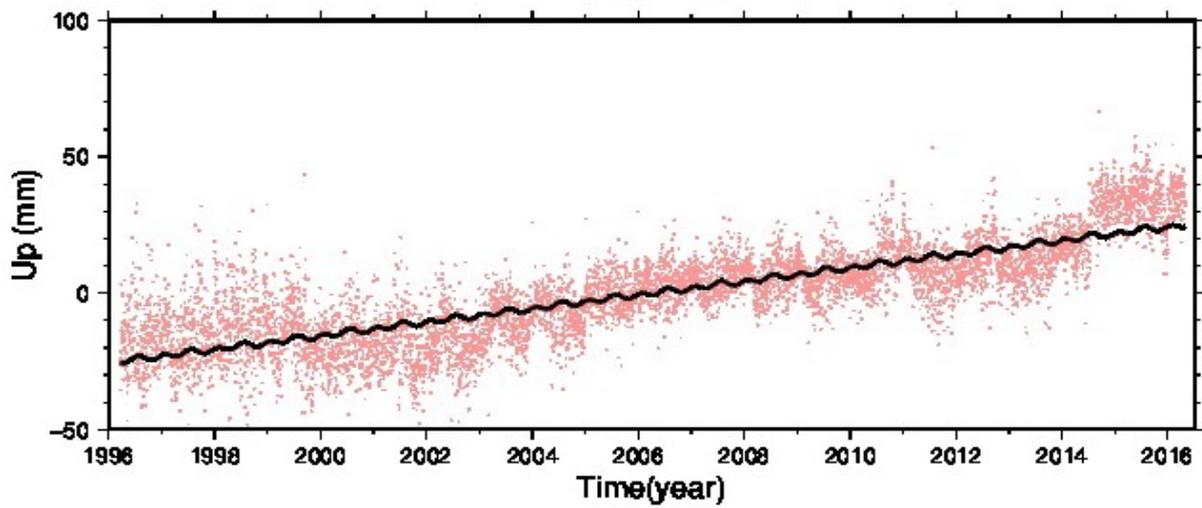


図 3.5 高知県馬路の GNSS 局における上下変動. 室戸とは逆に隆起傾向にある.

960674

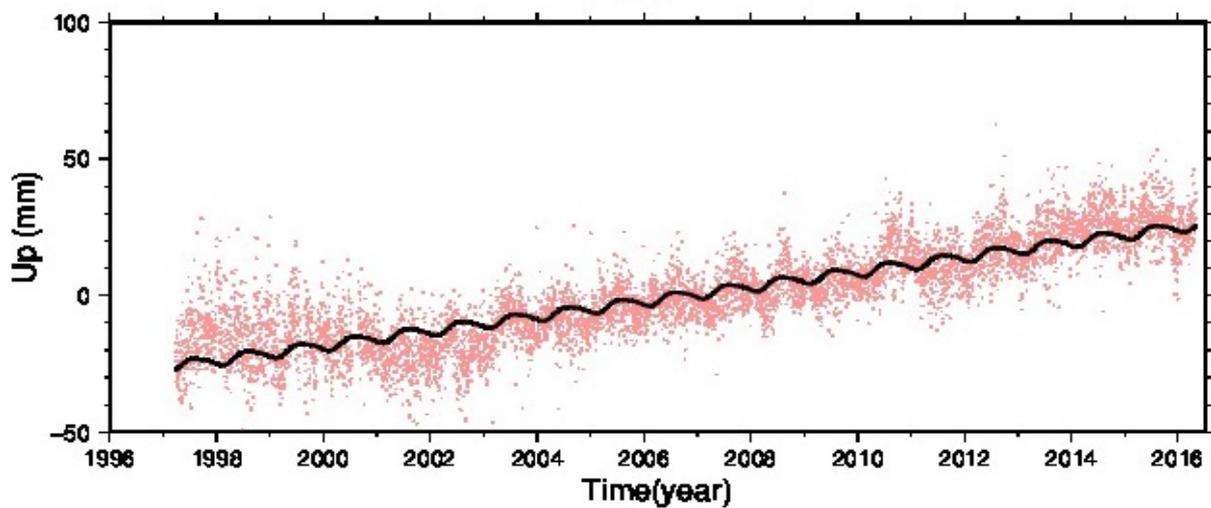


図 3.6 徳島県三好の GNSS 局における上下変動. この局も隆起が見られる.

室戸岬とそのすぐ北の高知県田野町における上下変動の結果を比較することで室戸岬の沈降速度が最も大きいことと、北上する（トラフから離れる）に従って沈降から隆起に変わっていくことがわかる。隆起のピークは徳島県の北西部であり約 4 mm/yr であった。さらに北上して、中国地方から隠岐の島の上下変動の結果を以下の図で示す。



図 3.7 本研究で上下運動を解析した GNSS 局（中国地方）

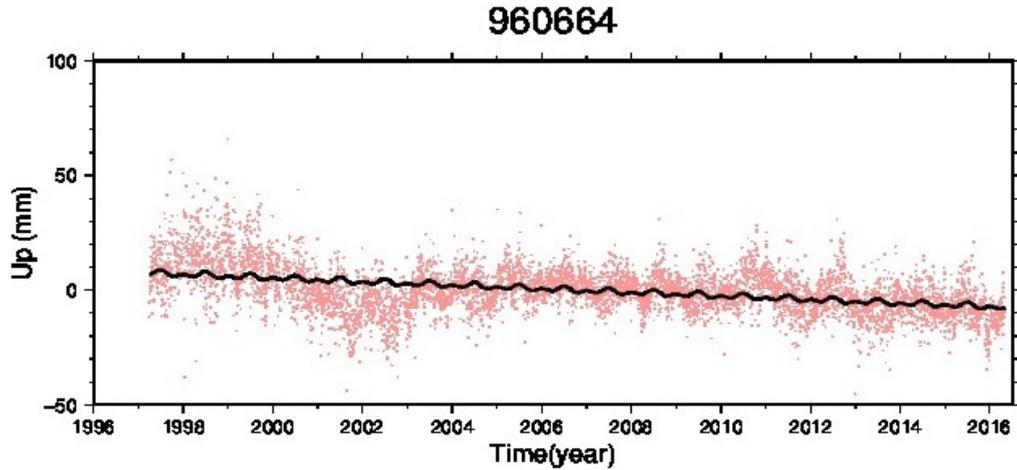


図 3.8 広島県豊松の GNSS 局における上下変動

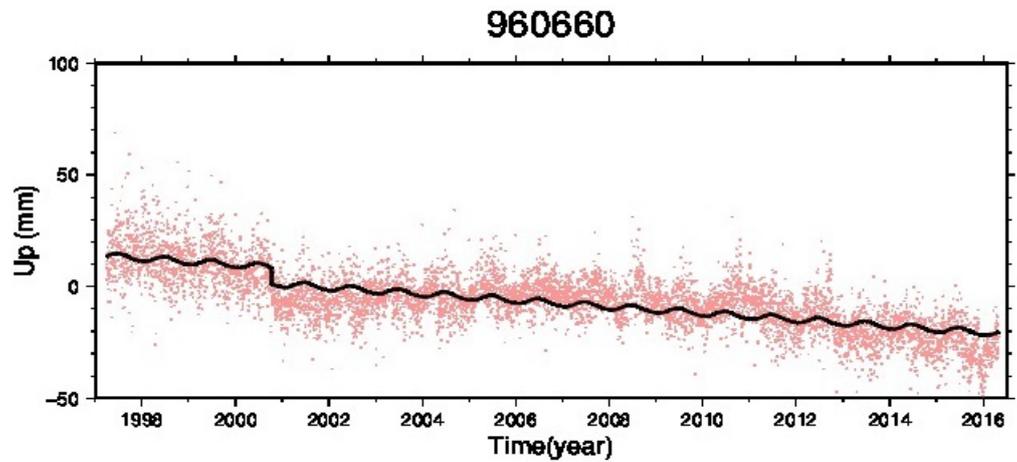


図 3.9 岡山県新庄の GNSS 局における上下変動. 2000 年の鳥取地震に伴うステップが見られる.

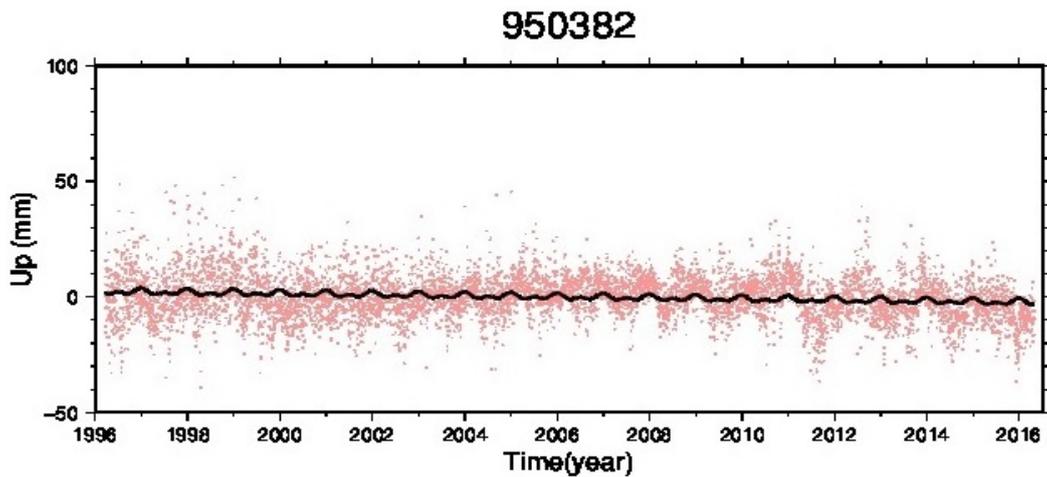


図 3.10 島根県隠岐の島の GNSS 局における上下変動

四国から北上していき中国地方，隠岐の島へ向けていくと上下変動はなだらかになっていきゼロに近づいていくことがわかる．また，地震など影響を受けている局の解析にはジャンプを追加する必要がある，例として 2000 年 10 月に発生した鳥取県西部地震の影響を

受けている局での解析には，図 3.9 のように地震発生時にジャンプが生ずることをモデルに追加して解析する．

3.2 上下速度とカップリング

本研究で行った 20 年間のデータを使った室戸—隠岐を結ぶ線上にある GNSS 局の上下運動時系列解析の結果を前節で示したが，そこで推定された上下速度を使い本節ではプレートカップリングについて議論する．本研究で推定した上下速度を南海トラフからの距離ごとにプロットすると以下の図のような結果となる．

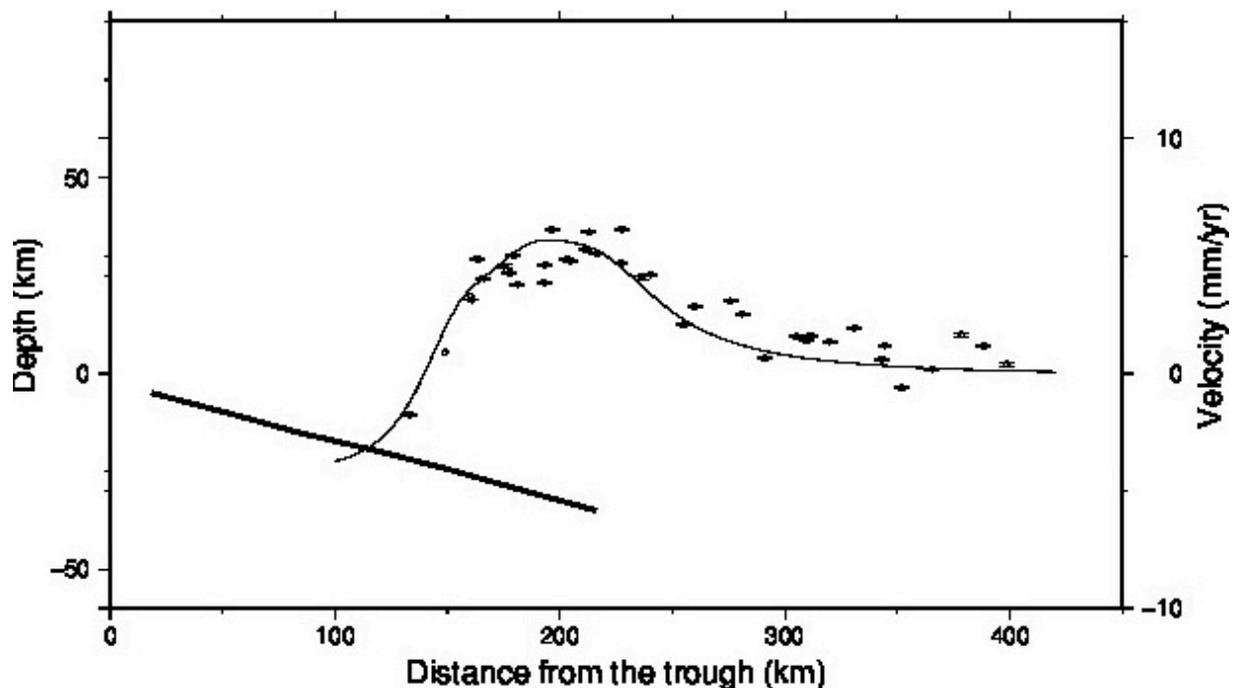


図 3.11 本研究で解析した上下速度の南海トラフからの距離(km)とプレート境界面．直線変化成分の推定誤差をエラーバーで表示した．実線の曲線で示すモデルについては本文参照のこと．

先行研究(Aoki and Scholz 2003)での 3 年間のデータを使った解析では，GNSS 局の上下速度の推定誤差が約 2 mm/yr であるのに対して，本研究での 20 年間の期間では推定誤差が 0.1mm/yr 程度にまで小さくなっている．ここで推定された上下速度と，滑り欠損と地殻変動を関連付けるモデルとして DC3D (Okada,1992)を用いて，カップリングの強さを推定すべきパラメータとして扱う．表 2.1 で示した表の「カップリング」の部分に数値を入れていきモデルへのフィットを見る．以下に，いくつかの結果を仮定したカップリングの値と共に示す．

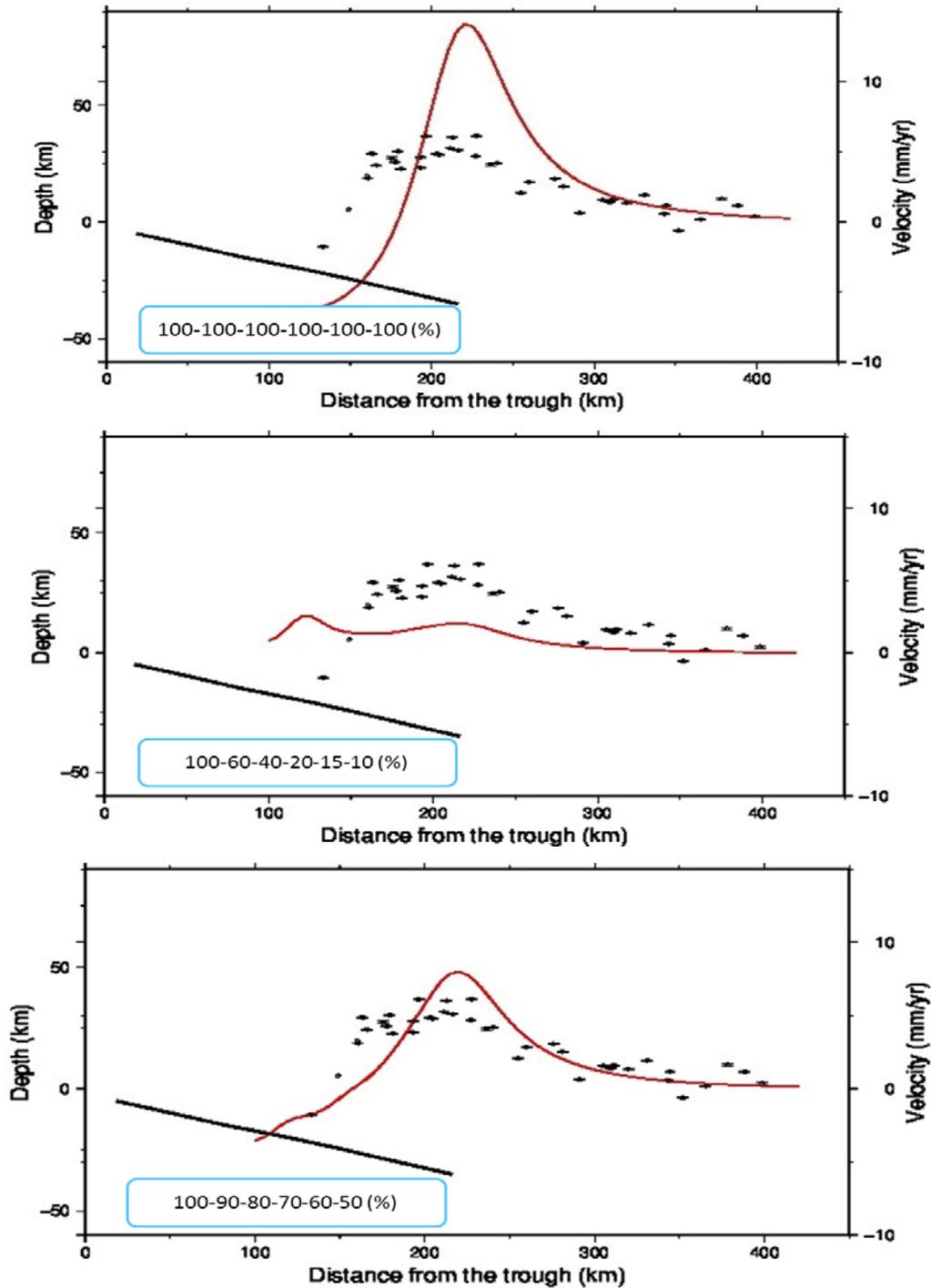


図 3.12 南海トラフのプレート境界を六つのセグメントに分け、それぞれに水色の枠内のカップリング（百分率）を仮定し、DC3D (Okada, 1992)を用いて地表上下速度を計算した。最浅部のカップリングは 100%とし、深さと共に弱まる遷移的な挙動を仮定した。これらの例ではモデルを示す赤い曲線と実際のデータのフィットが良くない。

DC3D に与える表 2.1 で与えた 6 個の断層セグメントの個々にカップリングの強さを指定すると、図 3.12 のように赤いモデル曲線を描くことができる。このプレート境界面全体にカップリングがなければ、上下変動はゼロになる。また、すべてのセグメントが完全にカップリングしているとすれば図 3.12 の最も上の図のような地殻上下変動が検出されるはずである。しかし、いずれの例も本研究で得られた上下速度の結果には一致しておらず、このプレートでの実際のカップリングは浅い部分の強いカップリングが深さと共に弱いカップリングに遷移してゆくことがわかる。図 3.12 の中の図では、遷移が比較的浅い部分で起こっている例を示すが、これもフィットが良くない。また図 3.12 の下の図では、遷移が比較的深い部分で起こっていると仮定しているが、これも隆起の最大値が生じる位置が実際の観測とは異なる。

下の図 3.13 ではカップリングが浅い部分から深い部分にかけて少しずつ弱く遷移してゆくと仮定したときのモデルを示している。図 3.12 で示した三種類の仮定より、観測された上下速度を忠実に再現していることがわかる。

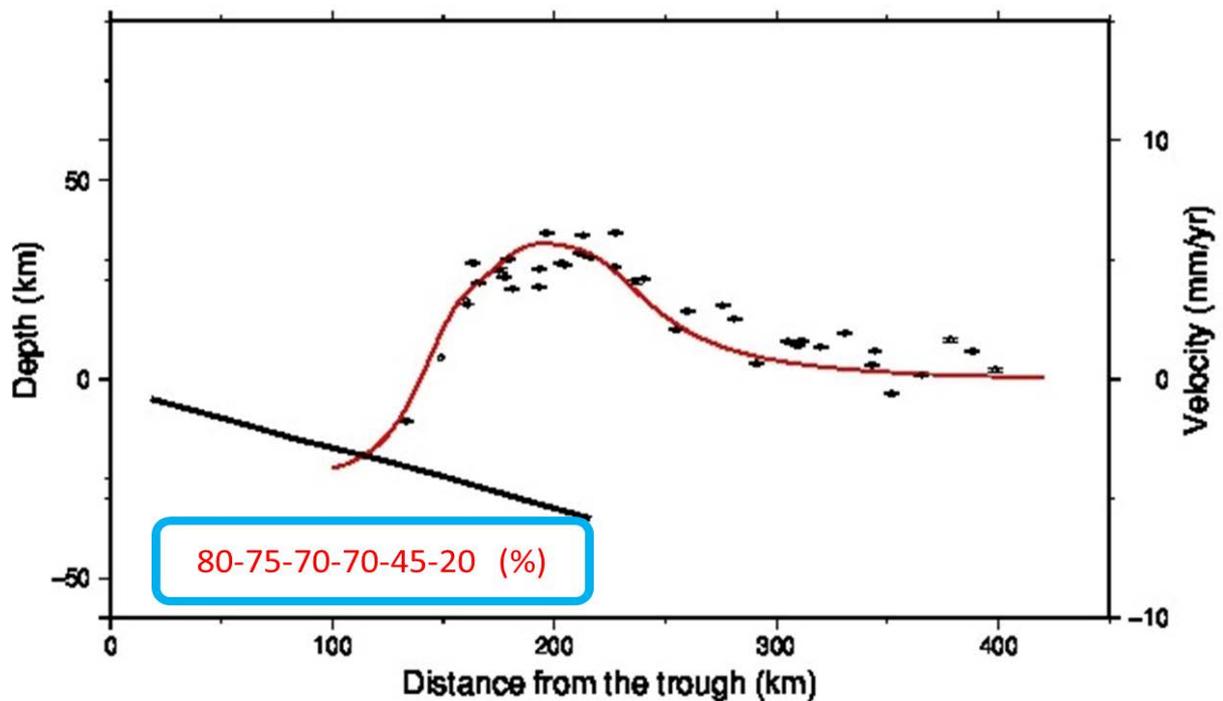


図 3.13 本研究で得られた、観測された上下速度をもっともよく再現するカップリングのモデル。比較的広い深さの範囲で徐々にカップリングの強さが遷移している。

4 考察

4.1 上下速度による解析

本研究では西南日本の上下変動を，室戸から隠岐に至る線上にある GEONET 局の上下成分データを用い，それらに季節変化と直線変化を仮定した時系列解析を行い，推定された上下速度よりプレート境界におけるカップリングの深さ分布を推定した．先行研究(Aoki and Scholz, 2003)と同様の手法であるが，解析に使ったデータが先行研究の 3 年間に対して本研究では 20 年間という点が重要な違いである．時系列解析では，F3 解を用いたことで個々のデータのばらつきが少なくなり，その結果モデルへのフィットも良くなっている．その結果，3 年間のデータを使った Aoki and Scholz (2003)における上下速度の推定精度が 2mm/yr 程度であるのに対して，本研究では 0.1mm/yr にまで小さくすることができた．より高精度な上下速度を用いてカップリングの強さを推定したので，カップリングの強さの推定精度もよくなっているはずである．長期間の GEONET の上下データを使うことで高い精度でカップリングの強さと深さに伴うその遷移の様子を推定できるのである．

4.2 非線形成分の有無

2011 年東北地方太平洋沖地震などで数年前からプレート境界におけるカップリングが段階的に弱くなったことが報告されている(Suito et al., 2011; Yokota and Koketsu, 2015)．本研究では季節変化と直線変化を仮定して解析を行ってきたが，ここでは曲線変化を想定して，時間の二次の項を追加パラメータとして解析を行う．本研究で対象としている地域では，数十年以内に巨大地震が発生するといわれているので，カップリングの時間変化の有無を調べることは重要である．時間の二次の項を推定した時系列解析の結果と直線変化を仮定した場合を比較して図 4.1 で示す．

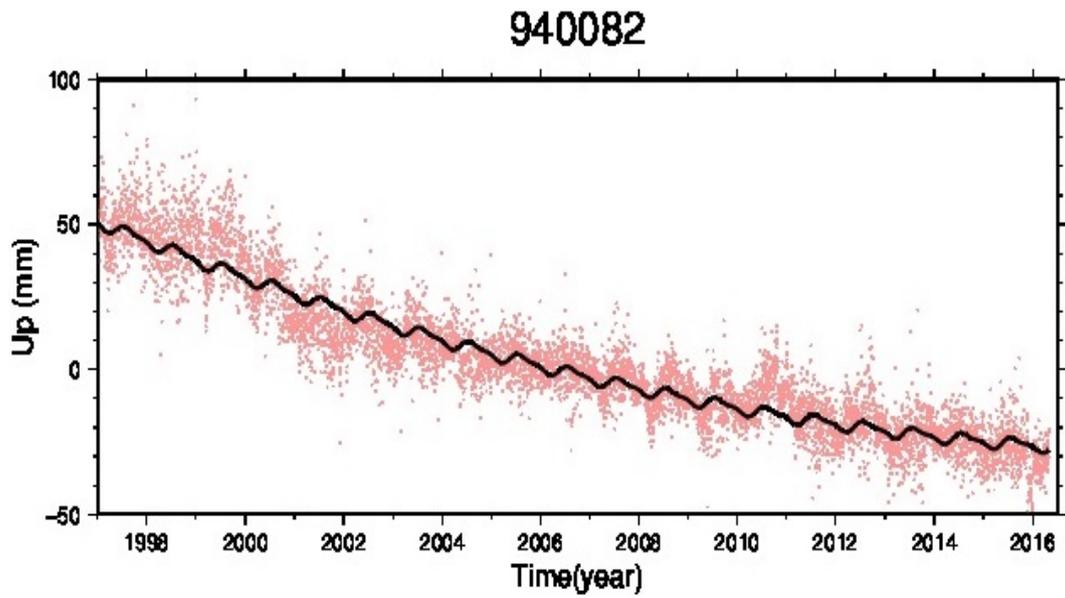
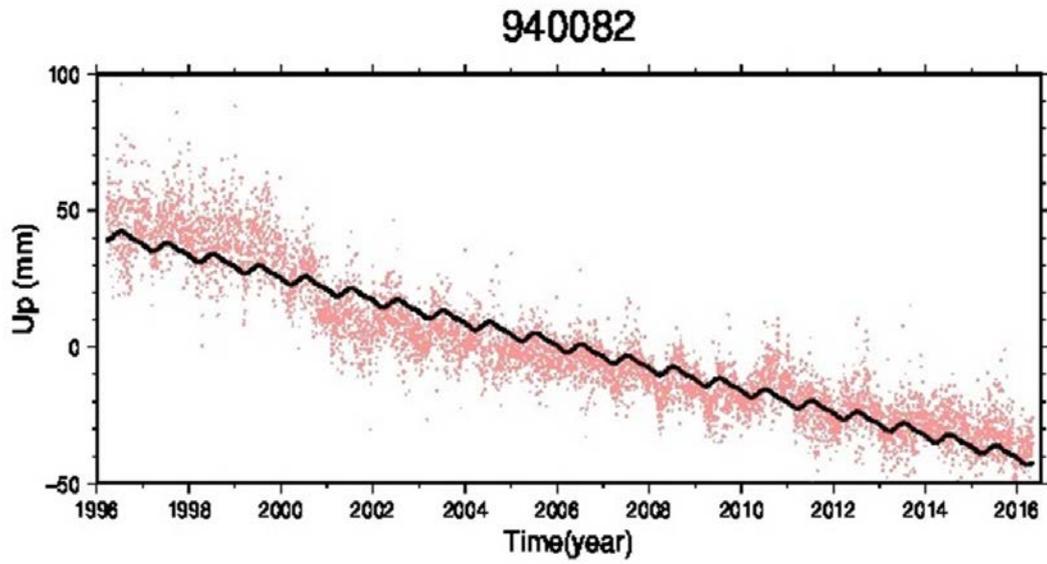


図 3.1 室戸岬における上下変動の時系列解析[1996-2016]. 上図は直線変化を仮定, 下図は時間の二次の項を推定している.

これまでの直線変化を仮定した上下変動の時系列解析結果と比べると、時間の二次の項を推定した解析のほうがモデルへのフィットがよいことがわかる。観測地域のプレート境界面のカップリングに時間変化があることがこの結果の一つとして考えられる。しかし F3 解は基本的に相対測位による測位解であり、このような結果の要因として単なる基準点の動きであることも考えられる。本研究での GEONET の上下データを使った解析では茨城県つくば市の中央局を基準点としている。この基準点の動きに非直線変化があれば、その影響を受けた他局の測位結果に時間の二次の項が現れるようにみえているだけの可能性がある。

非線形成分の有無を調べる方法について、以下の簡単な図を用いて説明する。

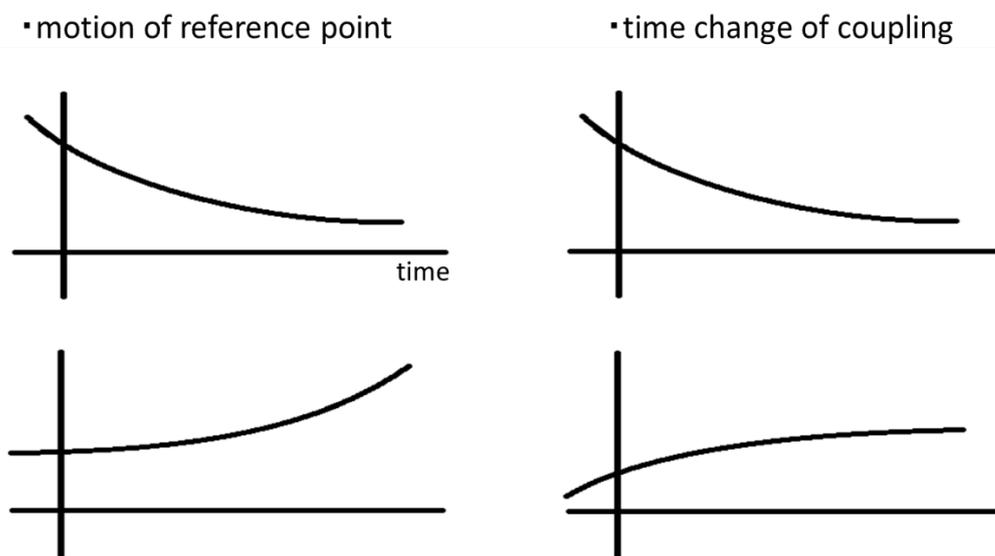


図 4.2 基準点の動きとカップリングの時間変化の場合の上下変動モデル。基準点の動きが原因であれば、二次の成分は全部の局に同じよう出現する（左図）が、カップリングの弱化であれば沈降する局と隆起する局で二次の成分は逆に出現する（右図）。

図 4.2 は左が基準点の動きの影響を受けている場合を、右がカップリングの時間変化（この場合は弱化）がある場合を示している。図 4.1 より室戸岬の様な沈降している局で時間の二次の項を推定して時系列解析を行うと沈降が次第に遅くなっていくような結果となる。この結果が基準点の動きの影響を受けているものであるとすると、沈降が遅くなっているのではなく基準点の隆起が減速している（または沈降が加速している）影響を受けていることになる。したがって、本研究の観測地域で隆起している局では隆起が加速しているように見え、図 4.2 の左下のような結果となるはずである。一方で、室戸岬での沈降が遅くなっているのがカップリングの時間変化（弱化）であるとする、隆起している局の時系列解析は隆起が次第に減速していくという図 4.2 の右下のような結果となるはずである。2 つの要因のどちらであるかを調べるため、観測地域の室戸岬以外の局、特に隆起している場所で時間の二次の項を推定して時系列解析を行った。



図 4.3 図 4.4 と図 4.5 で二次の成分の比較を行った GNSS 局の場所

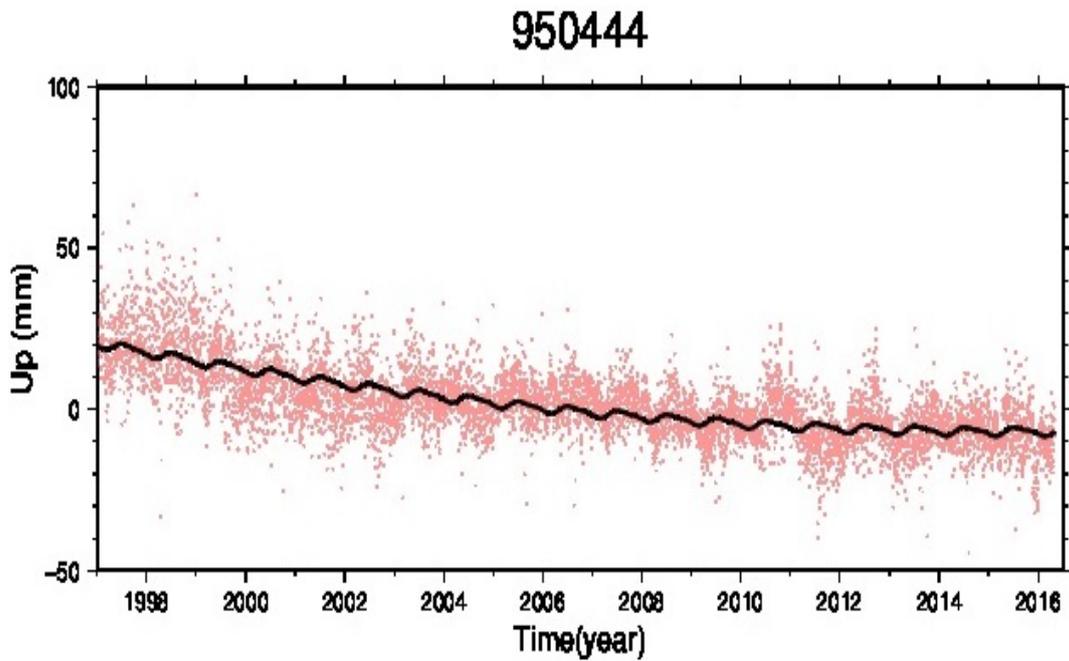


図 4.4 950444 局の上下変動 [1996-2016] を時間の二次の項を入れて時系列解析したもの.

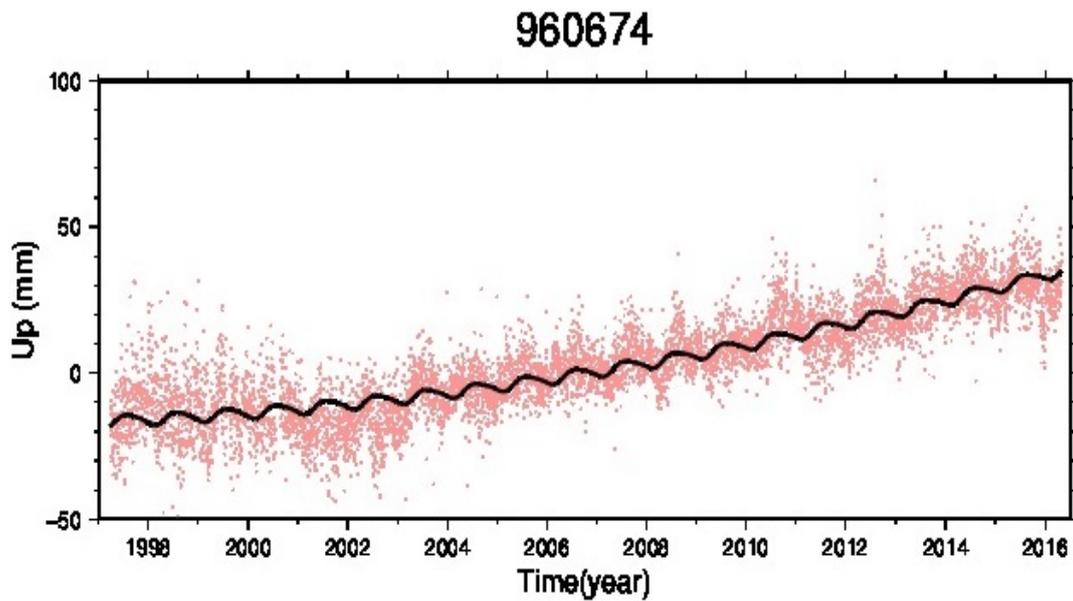
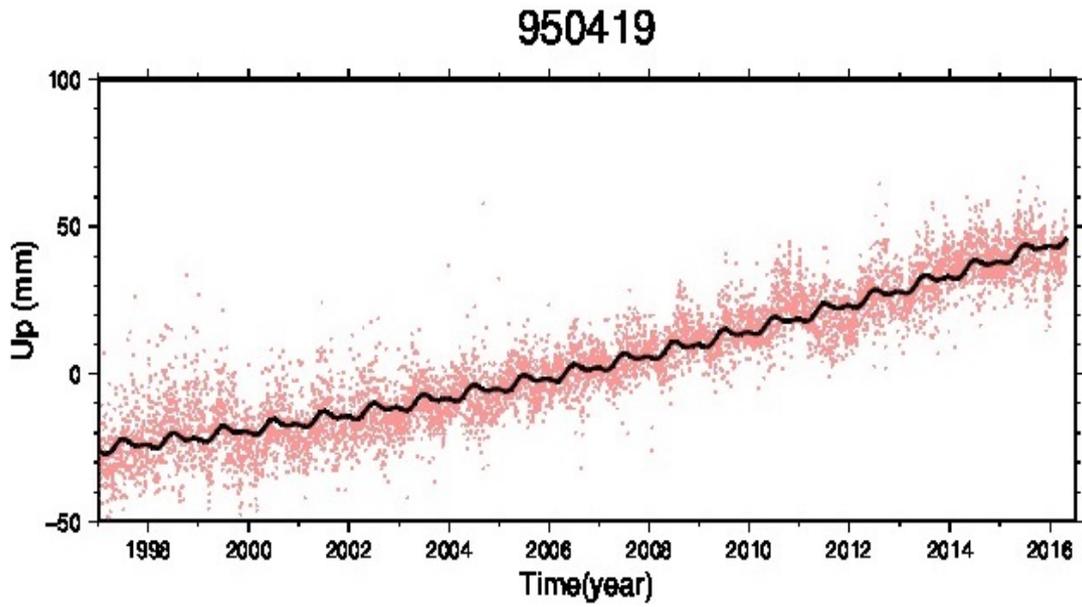


図 4.5 南海トラフでのプレートカップリングの影響で隆起している 0419, 0674 の両局で、上下変動の時系列 [1996-2016]に時間の二次の項を入れたモデルを当てはめた結果.

図 4.4 では室戸岬同じく沈降している局での時間の二次の項を推定した時系列解析の結果を示したが、室戸局と同様に沈降が遅くなっているように見えるという結果となった。図 4.5 で隆起している局での時間の二次の項を推定した時系列解析の結果を示した。どちらの結果からも隆起が加速しているように見えることがわかり、これは図 4.2 の左の場合に相当する。従って、時間の二次の項の変化は基準点の動きの影響を受けているためだと考えられる。

さらに詳しく調べるために直線トレンドと加速度の関係の概念図を図 4.6 に示す。基準点の動きの影響を受けているとすると、本研究の観測地域では解析した結果のトレンドに対してカップリングの時間変化がないので、図 4.6 左の図のように解析した局の直線トレンドに関わらず時間の二次の項はある一定の値をとる。一方で、カップリングの時間変化（弱化）があるときは直線トレンドに対して、そのトレンドが減少するように時間変化するので、二次の時間変化は直線変化と線形の関係にあり、図 4.6 右のように原点を通るある一定の傾きを持った直線にのる。

実際の GNSS 点で得られた直線トレンドと時間の二次の項の推定結果を図 4.7 に比較する。明らかに図 4.6 の左のケースに相当し、基準局の上下運動の時間の二次の成分が現れていることを示唆する。

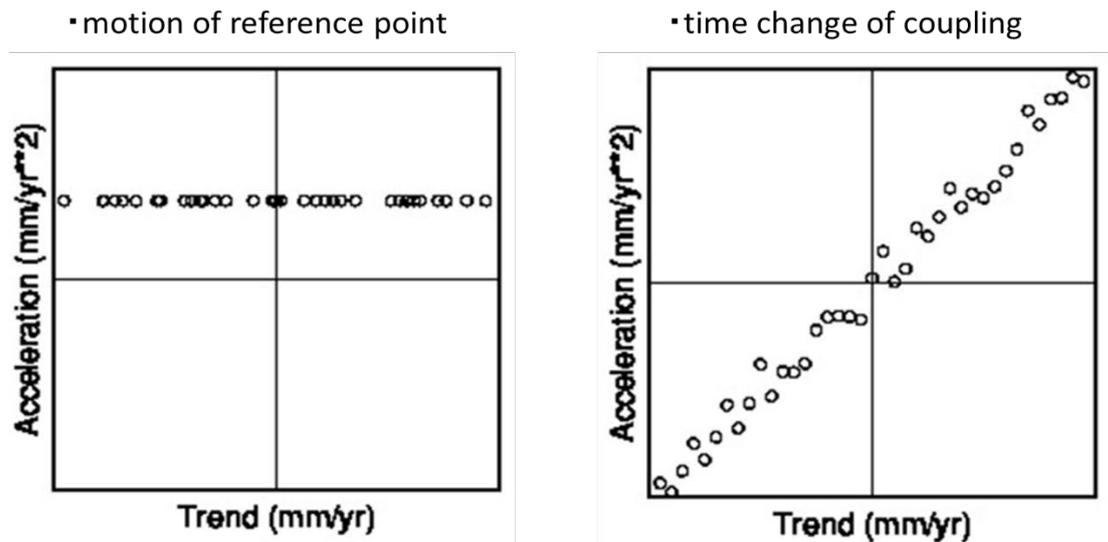


図 4.6 基準点の動きの影響を受けているとき（左）とカップリングの時間変化がある場合（右）の、直線トレンド（時間の一次の項）と加速度（時間の二次の項）の関係を示す概念図。

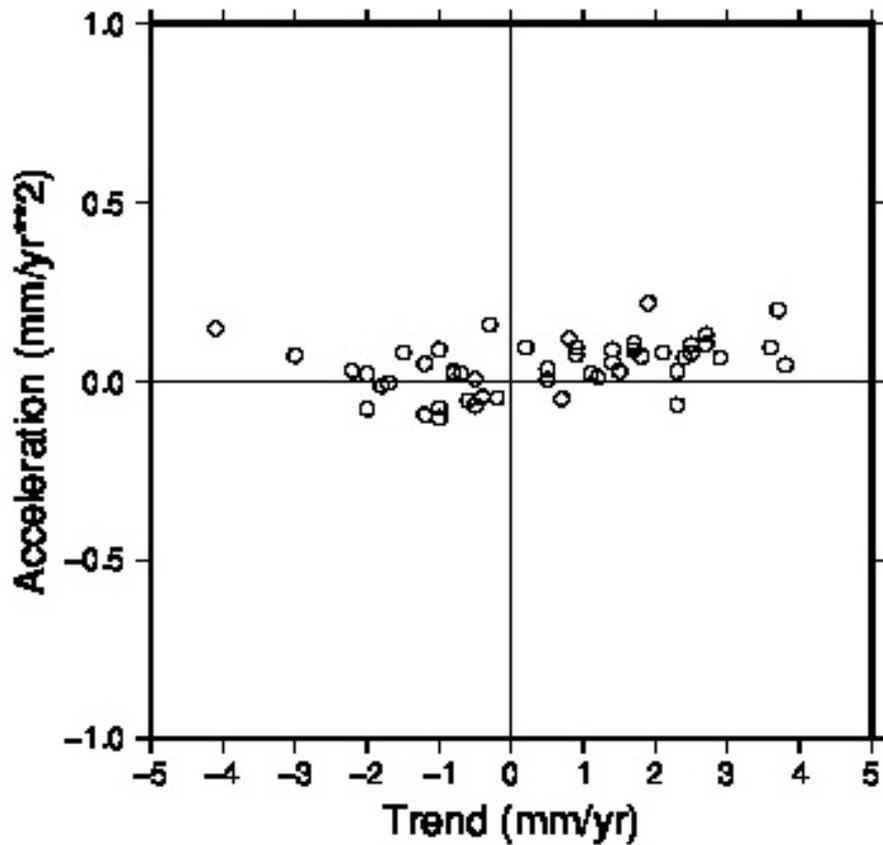


図 4.7 本研究での解析で推定された西南日本の GNSS 局の上下運動に関して、直線トレンド（横軸）と加速度（縦軸）を比較した結果。トレンドに関わらず二次の項は均一な値を示しており、カップリングの弱化ではなく基準局の上下運動の二次成分が全局に現れているに過ぎないことを示唆する。

図 4.7 から、少しのばらつきがあるもののトレンドに関わらず一定の正の加速度を持つという結果である。時間の二次の項を推定した時系列解析（図 4.4, 4.5）からもわかるように、本研究で解析した上下変動に加速度成分があるようにみえたのはカップリングが時間変化したからではなく、基準点の上下速度に時間の二次の成分があるからである。

5 まとめと今後の課題

本研究では西南日本における上下変動を GEONET の上下データ 1996-2016 年の 20 年を用いて解析を行った。3 年間のみのデータを用いて解析した先行研究の結果と比較すると上下変動の時系列解析において個々のデータのばらつきが少なくなっており、季節変化と直線変化を仮定したモデルへのフィットがよくなった。また上下変動の時系列解析から検出された上下速度は、先行研究で推定精度が 2mm/yr であるのに対して本研究では長期のデータを使うことで 0.1mm/yr にまで小さくなった。

上下成分からはカップリングの情報を得ることが出来る。本研究では計算機プログラム DC3D (Okada,1992)を用いることで、室戸岬から隠岐に至る測線の付近の GNSS 局で観測された上下速度から、南海トラフのプレート境界におけるカップリングの強さを推定した。本研究で推定した上下速度を南海トラフからの距離の関数としてプロットし、計算された上下速度の曲線がデータにうまくフィットするようにカップリングの強さを微調整した結果、海溝軸から 150km 程度の距離のところまでは強いカップリングを保ち、そこより深い部分で弱いカップリングに遷移するモデルが観測された上下速度にもっともよく再現した。20 年間という長期のデータを使うことで、上下速度の推定精度が先行研究(Aoki and Scholz, 2003)より一桁以上良くなっているため、図 3.13 で与えたカップリングの強さを表す数値の推定精度も高くなっていると考えられる。

また本研究では上下速度の非線形成分の有無についても調べた。沈降している室戸岬において時間の二次の項を推定して上下変動の時系列解析を行った結果、季節変化と直線変化のみを仮定した結果よりもモデルへのフィットがよくなった。これは、カップリングの時間変化がある可能性を示唆する。しかし、他の局でも同じように解析を行った結果、室戸岬では沈降が遅くなっているように見えるのに対して、隆起している局では隆起が加速していることがわかった。これは本来プレート間カップリングによって異なる方向に上下運動している二局が同じ符号の加速度を示したことを意味する。このことから、時間の二次の項は、基準点の上下運動の速度変化の影響を受けている可能性が高いことがわかった。

本研究の対象地域である南海トラフでは数十年以内に次のプレート間巨大地震が発生すると言われており、将来カップリングの時間変化が検出される場合も考えられる。その時にさらに詳しく解析結果を検出するための今後の課題として次の 2 点を挙げる。一つはスロー地震などに伴う変位の影響を取り除くことである。例えば図 4.5 の 969674 のような局の上下変動の時系列解析において、2003 年前後で明らかにトレンドが変化しており時系列解析の結果に影響している。このようなイベントの影響を受けた期間のデータを除いて時系列解析を行うことによって上下速度の推定値の信頼性が向上する。もう一つは室戸岬から隠岐に至る測線以外の近隣地域の観測値を解析することである。具体的には潮岬から近畿地方において同様の解析を行うことによって、カップリングの海溝軸方向の一様性について手がかりを得ることができるだろう。

6 謝辞

本研究を進めるうえで宇宙測地学研究室の皆様をはじめ、固体系ゼミの皆様から多くのご指導，ご協力を頂きました。

指導教官である日置幸介教授には大変お世話になりました。全く知識のない私に，研究に関する初歩の初歩から丁寧に教えていただき，**Linux** の使い方についてもご指導頂きました。小さな質問に対しても詳しく答えて下さりました。私が研究をするうえで日置先生には感謝の気持ちでいっぱいです。本当にありがとうございます。今後ともご指導のほどよろしくお願いいたします。

また宇宙測地学研究室の先輩方には **PC** のセットアップやプログラミングについてなど教えていただきました。お忙しい中ありがとうございました。

本研究で用いた **GEONET** の日々の座標値(**F3**)は国土地理院が提供しているものを利用しています。

7 参考・引用文献

- Aoki, Y. and C. H. Scholz (2003): Vertical deformation of Japanese islands, 1996-1999, J. Geophys. Res., 108, B5, 2257, doi: 10. 1029/2002JB002129, 2003
国土地理院 HP <http://www.gsi.go.jp/kizyunten.html>
- 中川他 (2009): GPS 連続観測システム(GEONET)の新しい解析戦略 (第 4 版) によるルーチン解析システムの構築について. 国土地理院時報. 118. 1-8.
日本測地学会テキスト HP <http://www.geod.jpn.org/web-text/index.html>
- Okada, Y. (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 1018-1040
- Savage, J.C.(1983): A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone J. Geophys. Res., 88, 4984-4996.
- Suito, H., T. Nishimura, M. Tobita, T. Imakiire, and S. Ozawa (2011): Interplate fault slip along the Japan Trench before the occurrence of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake as inferred from GPS data, Earth Planets Space, 63, 615-619.
- Yokota, Y. and K. Koketsu (2015): A very long-term transient event preceding the 2011 Tohoku earthquake, Nature Comm., 6, 5934.