験潮場の GPS 連続観測点を用いた潮位データ解析手法の検討
Analysis of Sea Level Change with Continuous GPS Stations at Tide Gauges

測地観測センター　三浦優司・川元智司
Geodetic Observation Center
Yuji MIURA and Satoshi KAWAMOTO

要　旨

近年，地球環境問題の中で，温室効果ガスの上昇による地球温暖化のシナリオがあり，海面変動の監視は，重要な課題となっている．日本の長期的な海面変動を把握する上での課題が，潮位観測施設（以下,「験潮場」という.）で取得した潮位データには，潮位の変動と験潮場の地盤上下変動の 2 つの影響が混在しているという点である．長期的な海面変動を評価する場合，潮位データから験潮場の地盤上下変動の影響を補正し, 国際地球基準座標系 ITRF を基準とした潮位の変動として海面変動量を評価する必要がある. そのような背景から, 国土地理院では, 1995 年頃から宇宙測地技術を用いて験潮場の地盤上下変動を補正し，海面変動成分のみを抽出する検討を実施してきた（国土地理院，1996）．2002 年には，験潮場に GPS 連続観測点を設置し, 験潮場の地盤上下変動を ITRF に準拠した座標値として取得できるようになった（験潮場に取り付けられた GPS 連続観測点のことを，以下,「GPS-P 点」という）.

今回，川元ほか（2009）の手法を用いて，GPS-P 点を用いた験潮場の地盤上下変動の除去の他に気圧補正, 潮汐補正を行った潮位データを作成し, GPS-P 点設置時からの海面変動量の算出を試みた．算出した結果，日本の海面変動トレンドは全験潮場平均で 1.1mm/year であり，最近の研究報告にある全球的な海面変動トレンドとも調和していた．また，各験潮場の海面変動トレンドには地域分布が見られ，日本海側では 1mm/year から 3mm/year の海面上昇の傾向が見られたが，静岡県西部から四国にかけての太平洋側では, 海面下降の傾向が見られた. 考察の結果, 太平洋側の海面下降の傾向の要因として，黒潮の影響が大きく関わっていることが分かった．特に黒潮大蛇行時に神奈川県から四国にかけての 7 験潮場では明瞭な潮位変化が確認された．一時的に潮位データが変化すると，変化量の大きい潮位データが影響して海面変動トレンドが変わってくることから，黒潮大蛇行といった海流の流路変化に注意すべきである．

1. はじめに

1.1 長期的な海面変動監視への関心

近年，地球環境問題の中で，温室効果ガスの上昇による地球温暖化のシナリオがあり，長期的な海面変動の監視は，重要な課題となっている．IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Chang： 気候変動に関する政府間パネル）がとりまとめた第 4 次報告書では，沿岸は，気候変動及び海面上昇により，沿岸浸食を含む増大するリスクにさらされ，現在から 100 年後には最大で 50cm 程度，全球的に海面が上昇すると予測している（Solomon et al., 2007）．このシナリオが予測どおりに進行するならば，被害はまず沿岸部において，浸水等の形で現れる．第 4 次報告書には，1993 年から 2003 年にかけての海面変動トレンドの全球図が示されており，海面変動は，地域によって偏りがあり，海面が上昇する地域もあれば，下降する地域があることが示されている．したがって，日本沿岸の長期的な海面変動を地域的に把握することが必要である．

1.2 長期的な海面変動を監視する技術と課題

海面変動を計測する技術としては，主に「沿岸部に験潮儀を設置して海面を直接計測する方法」と「衛星に搭載した海面高度計（以下,「アルチメトリー」という）を使用して海面を計測する方法」がある．IPCC の第 4 次報告書では，1961 年から 2003 年にかけて，この 2 つの技術による計測結果から，1.8 ± 0.5mm/year の割合で全球的な海面水位が上昇したと報告している．アルチメトリーは，衛星を利用していることから，広域の観測を行うことができ，全球的な海面変動を面的にとらえることができる．しかし，衛星の軌道のずれ，対流圏遅延，電離層遅延等の誤差要因があり，データの補正が必要である．また，陸域との境界である沿岸部では，観測精度が悪くなる．一方，験潮儀から取得した観測結果は，その場所での海面変化を直接取得している．また，験潮儀で取得した潮位データは，陸域と海域の境界である沿岸部であるため，アルチメトリーのデータと組み合わせることにより，より正確な海面変動の把握につなげることができる．このことは，近年の国際的な測地分野の取り組みである IAG GGOS（Global Geodetic Observation System of International Association of Geodesy）でも取り組むべき課題の一つとしてあげている（Plag and Pearlman, 2009）.

人工衛星は，地球重心を中心に上空を周回してい

る．したがって，アルチメトリーから得られる海面データは，地球重心を基準とした準拠楕円体からの高さである楕円体高で得られる（以下，楕円体高で得られる潮位のことを「絶対的潮位」という.）．それに対して，験潮儀で得られる潮位データは，験潮場の地盤を基準とした潮位変化の値である（以下，験潮場の地盤を基準とした潮位のことを「相対的潮位」という.）．相対的潮位は，験潮場の地盤を基準としているため，験潮場の地盤が上下すると，潮位の数値に影響が出る．つまり，相対的潮位には，潮位の変動と験潮場の地盤上下変動の 2 つの影響が混在している．特に日本のように地殻変動が大きい場所では，長期的な海面変動を監視する上で，潮位データに混在する地殻変動の影響を取り除き，準拠楕円体を基準とした絶対的潮位の変動として長期的な海面変動を評価する必要がある．

1.3 験潮場（国土地理院 潮位観測施設）

国土地理院は，平均海面から土地の高さの基準を決め，地殻変動を監視することを目的として，全国 27 ヶ所において潮位連続観測を実施している(図-1)．全国 27 ヶ所のうち，2 ヶ所については，地殻変動を監視するための機動観測点であり，残り 25 ヶ所については，定常的な観測を行う験潮場として潮位データを公開している．

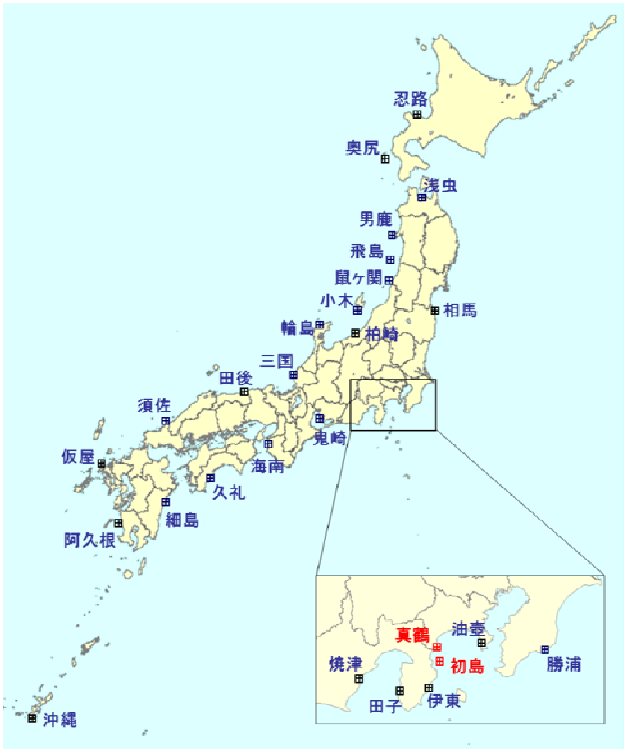

図-1　験潮場位置図（赤字：機動観測点）

国土地理院の験潮場では，フロート式験潮儀を採用して潮位観測を実施している．フロート式験潮儀は，フロートと呼ばれる浮標を浮かべ，フロートの上がり下がりから潮位を観測する機器である．フロートは，ワイヤーでプーリー（滑車）につながれており，フロートの動きが，プーリーの回転と連動することで潮位データとして記録される（図-2，写真-1）．各験潮場で取得した潮位データは，専用回線（IP-VPN）を通して，1 秒値がリアルタイムに測地観測センター内に設置された験潮サーバに保存される．また，各験潮場にある収録装置の記録媒体（メモリーカード)には 30 秒毎の潮位データが保存されており，通信が途切れた場合でも，験潮サーバからデータ回収命令を送れば，各験潮場にある収録装置の潮位データが再取得できる仕組みとなっている．

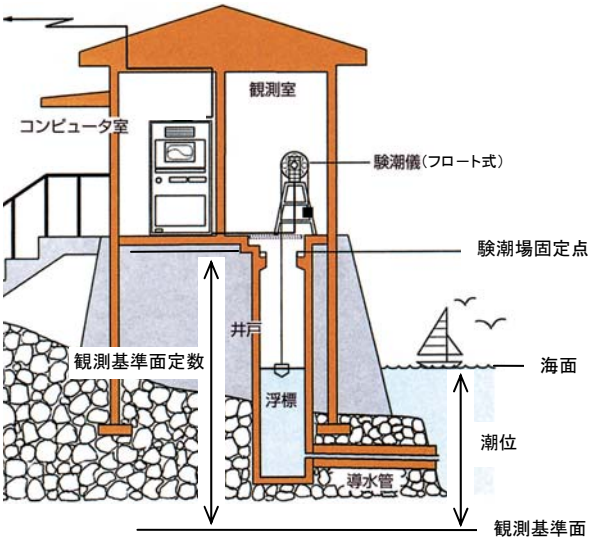

図-2　験潮場の概略図

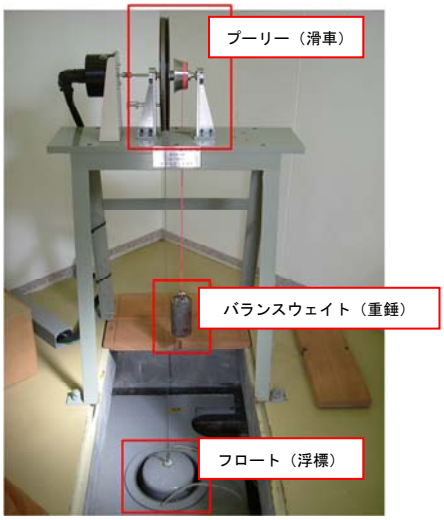

写真-1　フロート式験潮儀各部の名称

験潮場井戸の前後の 2 ヶ所には，験潮場固定点が設けられており，水準測量によって，最寄の基準点と取り付けられるようになっている（以下，水準測量によって，最寄の基準点と取り付けることを「水

準測量取り付け観測」という.). 水準測量取り付け観測後,前後の験潮場固定点の値を平均することで,井戸の中心位置での験潮場固定点の高さが求まる. フロートで計測している潮位は,観測基準面という仮想の基準面をもとにしており,験潮場固定点から観測基準面までの距離は,各験潮場によって,4m, 5m, 6m といった形で定められている(以下,固定点から観測基準面までの距離のことを「観測基準面定数」という.). 図-2 にあるように,フロートで計測した潮位,観測基準面定数,験潮場固定点の高さから,潮位と地上にある基準点とを結びつけることができる.

国土地理院における潮位観測の歴史は古く,明治初期から潮位データを取得しており,特に「油壺」(神奈川県三浦市),「細島」(宮崎県日向市),「輪島」(石川県輪島市)及び「忍路」(北海道小樽市)の 4 験潮場では,100 年を超える潮位データを蓄積している(国土地理院,1994). これらのデータは,土地の高さの基準や地殻変動の監視といった用途だけでなく,日本の長期的な海面変動を把握するデータとしても活用されている.

気象庁刊行の気候変動監視レポート 2010 では,「日本沿岸の海面水位を長期的に見た場合,世界平均にみられるような明瞭な上昇傾向はみられない」と報告している(気象庁). この結果は,国土地理院所管の「忍路」,「輪島」,「細島」,気象庁所管の「浜田」(島根県浜田市)の計 4 ヶ所の験潮場の潮位データから得られている. このように国土地理院の験潮場のデータは,長期的な海面変動の監視にも役立てられている.

ただし,この結果の算出にあたっては,地殻変動の小さな地域にある験潮場を抽出しているものの,地殻変動の影響を補正しているわけではない. したがって,今後,各験潮場において地殻変動を補正した潮位データを算出することで,長期的な海面変動監視への更なる貢献が期待できる. 国土地理院では,この課題に対して,験潮場で取得した潮位データと宇宙測地技術を結合することによって,地殻変動を補正した潮位データを得ることを検討してきた. 1995 年から 1996 年にかけて,海面変動観測手法に関する調査作業を実施し,VLBI, GPS を用いて潮位データから地殻変動量を補正し,絶対的潮位として海面変動を観測する手法について検討を行っている(国土地理院,1996). その後,2002 年頃から国土地理院の験潮場の屋上及び脇には GPS 連続観測点(GPS-P 点)が取り付けられ,GEONET の一部として,日々の座標値を連続的に取得している(写真-2, 写真-3).

験潮場に GPS 連続観測点を設置して並行観測する取り組みは,国際 GNSS 事業(International GNSS Service:以下,「IGS」という.)でも推奨している(Bevis et al., 2002). IGS では,潮位データと GPS データを結びつけて,地球科学への貢献を目的として,IGS-TIGA パイロットプロジェクト(以下,「IGS-TIGA」という.)と呼ばれる試験的な取り組みを行っている(http://adsc.gfz-potsdam.de/tiga/index_TIGA.html). 測地観測センターでは,験潮場に設置してある GPS-P 点を IGS に登録し,取得したデータを提供することで,IGS-TIGA の取り組みに貢献している.

今回の取り組みは,上記の背景から験潮場にある GPS 連続観測点(GPS-P 点)のデータを利用し,準拠楕円体を基準とした絶対的潮位データを作成し,海面変動量の算出を試みたものである.

写真-2 「忍路」の GPS-P 点(屋上型)

写真-3 「男鹿」の GPS-P 点(地上型)

1.4 全球的な海面変動トレンド

最近の報告書・論文等から,全球平均した海面変動トレンドについて,下記の報告がある.

1) IPCC 第 4 次報告書(Solomon et al., 2007)

験潮場で観測した潮位とアルチメトリーによる観測結果から,1961 年から 2003 年にかけて,1.8 ± 0.5mm/year の海面上昇,アルチメトリーによる観測結果から,1993 年から 2003 年の 10 年間では,3.1 ± 0.7mm/year の海面上昇があったとの見解を示している. また,1993 年から 2003 年の海面変動の地域分布図では,日本近海において,日本海側に比べ,太平洋側付近では,緯度方向に大きく海面変動の傾向

が変化していることが示されている．

2) Wöpplemann et al.（2009，2007）

験潮場に最も近い GPS 連続観測点のデータと験潮場で取得した潮位データから，全球的な海面変動トレンドを算出している．手法は，以下のとおり．

① 験潮場に最も近い GPS 連続観測点のデータから算出した「験潮場地盤の上下変動速度」と 験潮場で取得した潮位から「潮位の変動速度」を求める．

② ①で求めた「験潮場地盤の上下変動速度」と「潮位の変動速度」を差し引き，各験潮場での海面変動トレンドを算出する．

③ ② で求めた各験潮場で求めた海面変動トレンドを平均し，全球上での海面変動トレンドとする．

結果は，国際地球基準座標系 ITRF2000 において 1.31 ± 0.30mm/year（Wöpplemann et al. 2007），ITRF 2005 において 1.61 ± 0.19mm/year（Wöpplemann et al. 2009）の海面変動トレンドであったと報告している．ただし，この手法では，潮位の観測期間に対して，GPS データの取得期間が短く，観測の空白期間を埋めるため，「短期間の GPS データから算出した地殻変動速度」を全期間一定として，潮位データに混在する地殻変動成分を補正している．したがって，地震や余効変動等の地殻変動速度の変化を考慮しておらず，地震等により地殻変動量が絶えず変化する日本での海面変動トレンド算出には，適用しにくい手法であることに留意する必要がある．

3) AVISO

AVISO とは，Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data の略称で，フランス国立宇宙研究センター（le Centre national d'études spatiales：CNES）が提供するアルチメトリーで取得したデータのアーカイブサイトである（http://www.aviso.oceanobs.com/）．AVISO のサイトでは，アルチメトリーによる観測結果から，1993 年～2012 年の 20 年間に全球平均で 3.18mm/year の海面上昇が生じたと報告している．また，アルチメトリーによる海面変動の地域分布図では，① 地域的な海面変動トレンドの違いは，±10mm/year 程度であること，② IPCC 第 4 次報告書と同様に，日本の太平洋側付近では，緯度方向に大きく海面変動の傾向が変化することが示されている（AVISO）．

2. 実施した取り組みについて

2.1 概要

1.4 にある最近の研究結果から，年間 mm スケールでの変動の算出が目安となる．また，Wöpplemann et al.（2009，2007）の手法のように，GPS データの空白期間を「異なった期間で算出した地盤上下変動速度」で補正するのは，地震が多く，地殻変動の傾向が変化する日本では適した方法ではなく，潮位データと GPS データの取得期間は整合している必要がある．

しかし，潮位データには，満潮・干潮・大潮・小潮といった潮汐や気圧変化による海面変動といったノイズ成分が多く含まれている．たとえば，潮汐成分のような規則的な周期変化は，長期間の潮位データを用いることで海面変動トレンド算出への影響を軽減できるが，通常，十数年程度のデータが必要である．また，気圧変化による不規則的な潮位変化は，そのときの気象状況に応じて生じるため，直接バイアスとして海面変動トレンド算出に影響を与える．したがって，験潮場に GPS-P 点が設置された 2002 年頃から 2010 年までの 10 年に満たない潮位データから有意な海面変動量を算出するには，潮位データから「潮汐による変動成分」や「気圧変化によるバイアス成分」を補正し，取り除いた方がよい．

今回，川元ほか（2009）の手法を用いて，国土地理院の験潮場で取得した潮位データに，気圧・潮汐等の補正を加え，ノイズ成分の軽減を試みた．その後，補正した潮位データと GPS-P 点のデータを結合し，地殻変動成分を補正した絶対的潮位データを作成し，2003 年からの海面変動トレンドを算出した．また，結果の考察として，「験潮場と験潮場近傍にある電子基準点の地盤上下変動量が同じである」と仮定した場合の海面変動トレンドとの定量的な比較を行っている．

2.2 潮位データの処理

2.2.1 毎時潮位

測地観測センターの験潮サーバに保存された潮位データは，「30 秒潮位」，「毎時潮位」，「日平均潮位」，「月平均潮位」，「年平均潮位」，「満干潮位」の形で整理し，国土地理院ホームページ「潮位を測る」（http://tide.gsi.go.jp）において公開している．

国土地理院の験潮場では，波浪等による短周期成分の波を取り除くため，比較的長めの導水管を通して，観測井戸に海水を取り入れている．それに加えて，30 秒潮位から毎時潮位を算出する際には，約 2 時間以下の周期の波を除去するように重量平均値を用いたデジタルフィルタ処理を行い，平滑化している（高原，1987；中堀，1983）．

今回，解析を実施するにあたり，平滑化した潮位データである毎時潮位をベースに気圧補正，潮汐補正を実施している．

2.2.2 気圧補正

潮位は，大気圧によって影響を受ける．高気圧のときは，大気の重みが通常時より大きく海水にかか

るため，海水は平時に比べ低くなる．逆に低気圧のときは，大気圧が通常時よりも低いため，海水は平時に比べ高くなる．したがって，潮位データから海面変動を評価するには，大気圧の影響を取り除いた方がよい．

気圧差 ΔP と潮位差 Δh の静力学的な関係は，静水圧平衡の式

$$\Delta P = -\rho g \Delta h \qquad \cdot\cdot(1)$$

で表されることから，潮位 H に加える気圧補正量 ΔH は，

$$\Delta H = -\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho g} = C_0(P(t) - P_0) \qquad \cdot\cdot(2)$$

と展開できる．ここで，ρ は海水密度（$\rho \cong 1.02\,g/cm^3$），g は重力加速度（$g \cong 9.8\,m/s^2$），C_0 は気圧変化に伴う比例定数（$C_0 = 1/\rho g \cong 0.01\,m/h\,Pa$），$P(t)$ は時刻 t での気圧，P_0 は標準大気圧（$P_0 = 1013hPa$）である．

今回，この補正式を用いて毎時潮位データに対して，気圧補正を実施した．なお，気圧は験潮場に最も近い気象台・測候所のデータを使用している（気象庁）．近傍の気象台・測候所の気圧データを用いる妥当性については，濱田ほか（2010）が検証作業を実施し，「験潮場」と「近傍の気象台等」の場所の違いを要因とする顕著な乖離はなく，長期的な海面変動監視に適用可能と報告している．

2.2.3 潮汐補正

潮位には，満潮・干潮・大潮・小潮といた規則的な周期的な変化があり，潮汐と呼ぶ．潮汐を起こす力は，天体（月と太陽）の引力の効果である．今回，潮汐補正を実施するにあたり，気象庁が潮汐の予報で用いる 60 個の分潮の値（気象庁, 1999）を使用した．

潮汐の影響と一次トレンドを考慮すると潮位データ $f(t)$ は，

$$f(t) = a_0 + b_0 t + \sum_{n=1}^{60}(\mathrm{D}_n \cos \omega_\mathrm{n} \mathrm{t} + \mathrm{E}_n \sin \omega_\mathrm{n} \mathrm{t}) + \varepsilon(\mathrm{t}) \qquad \cdot\cdot(3)$$

で表される．ここで，a_0 は平均海面の高さ，b_0 は一次トレンド，D_n ，E_n は分潮の振幅，ω_n は角速度（分潮速度の掲載値（気象庁, 1999）を使用），$\varepsilon(\mathrm{t})$ は偏差成分である．

気圧補正した毎時潮位データから，最小二乗法を用いて a_0 ，b_0 ，D_n ，E_n を推定し，潮汐成分（ $\sum_{n=1}^{60}(\mathrm{D}_n \cos \omega_\mathrm{n} \mathrm{t} + \mathrm{E}_n \sin \omega_\mathrm{n} \mathrm{t})$ ）の除去を行った．

補正前と補正後のデータを図-3 に示す．補正を行うことで，変化量が少なくなり，データを評価しやすくなったことが分かる．

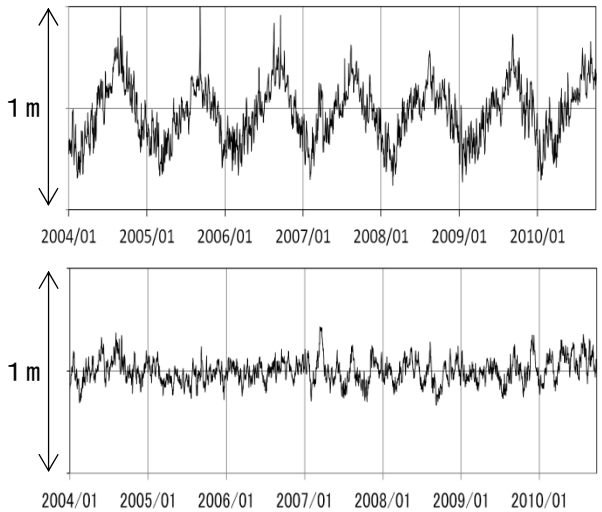

図-3 「阿久根」の潮位データ
（上）：補正前の潮位データ（日平均）
（下）：気圧補正と潮汐補正を施した潮位データ（日平均）

2.3 潮位データと GPS データの結合

2.3.1 GPS データ

各験潮場に設置された GPS 連続観測点の座標値には，日々の座標値の最終解（以下，「F3 解」という．）を使用した．2009 年 4 月から GEONET の解析は，GEONET 解析戦略第 4 版に変更されたが，この変更によって ITRF2005（Altamimi et al., 2007）に準拠した座標値が日々算出されており，最終解の精度が向上している（中川ほか, 2009； 小谷ほか, 2009）．今回，絶対的潮位データの作成に F3 解を使用していることから，算出した結果は ITRF2005 に準拠したものとなっている．

2.3.2 潮位データと GPS データの結合方法

験潮場に設置してある GPS 連続観測点（GPS-P 点）のデータを組み合わせることで，気圧変化，潮汐成分を取り除いた潮位データから，地球重心を基準とした潮位の楕円体高（絶対的潮位：$\mathrm{L}(t)$）を算出した．使用した GPS データが「ITRF2005 に準拠した日々の座標値」であるため，気圧補正と潮汐補正を施した毎時潮位のデータは，日平均データに平均処理して計算を実施している．

作成には，以下の式を使用した．

$$L(t) = g(t) - K - H + F(t)$$

$$F(t) = f(t) - \sum_{n=1}^{60}(D_n \cos \omega_n t + E_n \sin \omega_n t) + \Delta H \quad \cdot\cdot(4)$$

g(t) は GPS-P 点の楕円体高，K は験潮場固定点を基準とした GPS-P 点の比高，H は観測基準面を基準とした験潮場固定点の比高（観測基準面定数），F(t) は気圧変化と潮汐成分を取り除いた潮位データを表している（図-4）．

験潮場固定点と GPS-P 点までの比高（K）は，2003 年から 2004 年にかけて水準測量と鋼巻尺を用いた取り付け観測を実施しており，その結果を使用している（国土地理院，2003）．

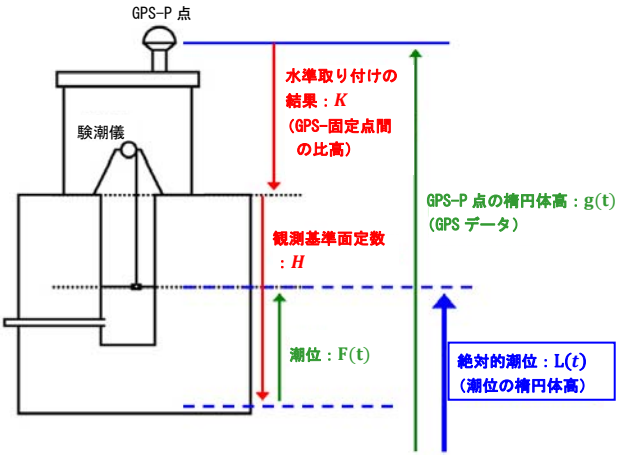

図-4　潮位データと GPS データの結合計算 概念図

3. 得られた結果と考察

3.1 絶対的潮位データ（準拠楕円体からの海面高データ）

作成した潮位データ（絶対的潮位データ）を図-5 に示す．本データは，準拠楕円体からの海面の高さであるため，その場所でのジオイドに近いデータとなっている．また，本データに線形近似式をフィッティングさせることによって，海面変動トレンドを算出した（図-6）．

1) 日平均値と月平均値について

今回作成した潮位データでは，日平均値と月平均値を算出している．海面変動トレンドをそれぞれのデータで推定したところ，日平均データから推定した海面変動トレンドは，標準偏差の値がトレンドの推定に対して，有意な範囲内にあった（表-1）が，月平均データから推定した海面変動トレンドは，標準偏差の値が大きく，トレンドの推定において，有意な値とは言えなかった（表-2）．これは，月平均値

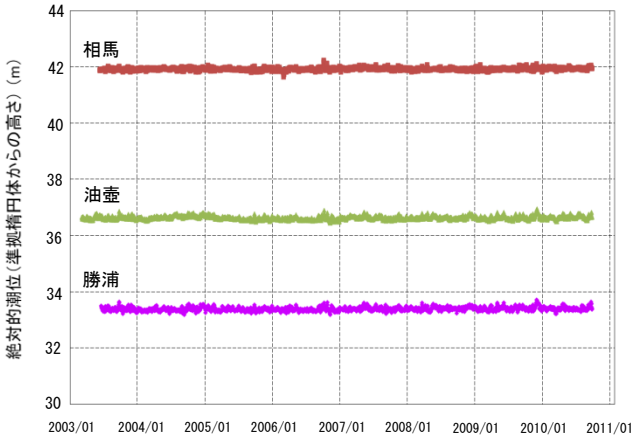

図-5　作成した絶対的潮位データ（油壺，勝浦，相馬）

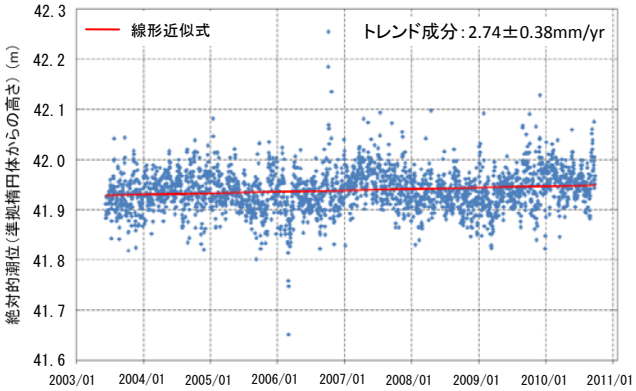

図-6　「相馬」の絶対的潮位データと海面変動トレンド

表-1　日平均値から求めた海面変動トレンド

No.	験潮場名	海面変動トレンド（mm/yr）	標準偏差(mm/yr)
1	油壺	1.59	0.55
2	細島	−0.81	0.59
3	輪島	1.64	0.75
4	忍路	0.19	0.48
5	海南	−0.83	0.80
6	浅虫	1.85	0.44
7	鼠ヶ関	−0.77	0.62
8	柏崎	−1.24	0.75
9	鬼崎	−1.83	0.85
10	田後	2.13	0.74
11	勝浦	6.80	0.59
12	三国	0.90	0.97
13	久礼	−3.35	0.76
14	男鹿	1.07	0.68
15	阿久根	2.04	0.56
16	須佐	2.92	0.58
17	仮屋	1.11	0.50
18	相馬	2.74	0.38
19	伊東	6.55	0.70
20	小木	4.40	0.56
21	沖縄	1.14	0.58
22	田子	0.08	0.76
23	焼津	−11.56	0.80
24	奥尻	−0.33	0.44
25	飛島	10.37	0.20

表-2　月平均値から求めた海面変動トレンド

No.	験潮場名	海面変動トレンド(mm/yr)	標準偏差(mm/yr)
1	油壺	1.68	2.04
2	細島	−1.50	2.38
3	輪島	1.50	2.29
4	忍路	0.19	1.56
5	海南	−0.91	3.51
6	浅虫	1.87	1.57
7	鼠ヶ関	−0.68	2.14
8	柏崎	−1.24	2.24
9	鬼崎	−3.80	3.45
10	田後	2.12	2.20
11	勝浦	6.98	1.76
12	三国	1.13	3.17
13	久礼	−3.50	3.33
14	男鹿	0.89	2.12
15	阿久根	1.98	2.16
16	須佐	3.18	1.96
17	仮屋	1.14	1.97
18	相馬	2.81	1.06
19	伊東	6.33	3.02
20	小木	4.43	2.15
21	沖縄	1.81	2.75
22	田子	−1.77	3.21
23	焼津	−11.27	3.51
24	奥尻	−0.01	1.44
25	飛島	10.37	0.57

だとデータ数が少なくなるためで，最小二乗法で直線近似して求めたトレンドの推定結果を評価できないことを示している．したがって，本報告での，海面変動トレンドの評価は，日平均値のデータを基に実施している．

2) GPS-P 点の年周補正について

GPS-P 点は建物の屋上に設置してある場合が多く，日射による建物の熱変形による座標値への影響が懸念された．夏場と冬場の日射量の違いによる熱変形であれば，年周期的な変化をしていることが考えられる．今回，GPS-P 点で取得したデータに年周補正を実施した場合と実施しなかった場合の 2 パターンで，絶対的潮位データを作成し，海面変動トレンドの算出結果に与える影響を調べた（図-7）．その結果，0.1mm/year を超えるような海面変動トレンドの違いは見られなかった [1]．この要因として，GPS データの年周変化は長期間のデータを用いることで軽減されること，GPS データの年周変化の振幅は潮位変化に比べて小さいことが上げられる．

3.2 海面変動トレンドの評価

絶対的潮位の海面変動トレンド（2003 年～2010 年）は，全験潮場平均で+1.1mm/year であり，各験

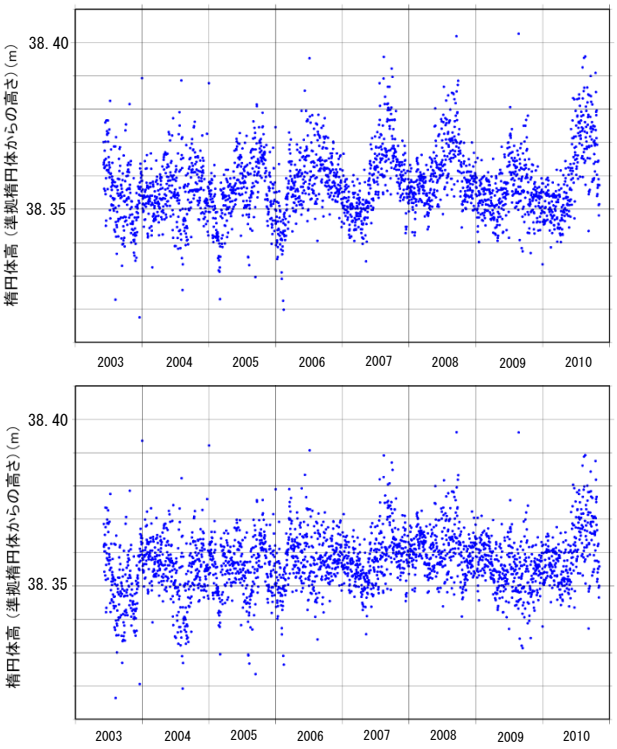

図-7　「忍路」の GPS-P 点データ
（上：年周補正なし，下：年周補正あり）

潮場で見られた海面変動トレンドは，±12mm/year の範囲に収まっていた．したがって，1.4 で紹介した過去の研究報告とも調和した算出結果となった．

加藤・津村（1979）では，潮位データの偏差成分の特徴から日本全国を 9 の海域に分けている（図-8）．今回，作成した潮位データを各海域ごとに重ね合わせ処理し，各海域での海面変動トレンドを見積もった [2]（図-9）．

その結果，日本海側及び北太平洋側（海域Ⅱ，海域Ⅲ，海域Ⅶ，海域Ⅷ，海域Ⅸ，その他）では，海面上昇の傾向が見られるが，静岡県西部から四国にかけての太平洋側（海域Ⅳ，海域Ⅴ，海域Ⅵ）では，

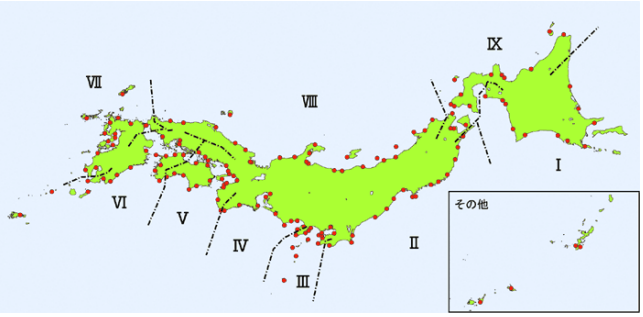

図-8　加藤・津村（1979）の海域区分

[1] 本報告に記載している海面変動トレンドの数値は，GPS データに年周補正を施していないものである．

[2] 重ね合わせ処理とは，各験潮場で取得した絶対的潮位データを，基準日からの変化量として換算した後，各海域ごとに平均化することで「海域ごとの絶対的潮位の変化量データ」を作成する処理のことをいう．

海面下降の傾向が見られた（表-3，図-10）．このような傾向は，1.4 で記載したアルチメトリーから得られた全球的な海面変動の地域分布図でも見られており，今回の計算から算出した各海域の海面変動トレンドの傾向は，これまでの研究報告と整合する結果となった．

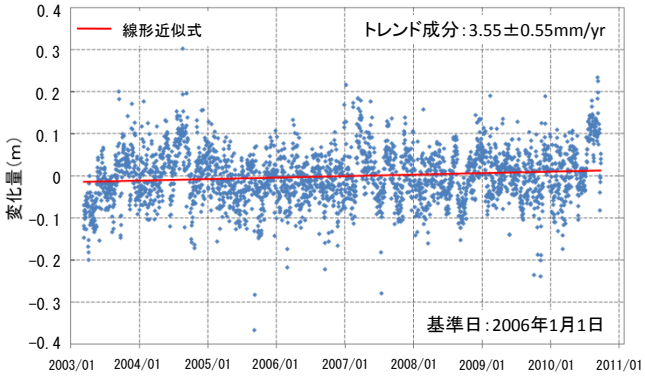

図-9　重ね合わせ処理した潮位データ（海域Ⅷ）
使用データ：
「男鹿」，「飛島」，「鼠ヶ関」，「小木」，「柏崎」，
「輪島」，「三国」，「田後」，「須佐」

表-3　各海域での海面変動トレンド

海域	海面変動トレンド(mm/yr)	標準偏差(mm/yr)	対象験潮場
Ⅰ	---	---	該当なし
Ⅱ	4.79	0.42	相馬，勝浦
Ⅲ	3.93	0.58	油壺，伊東
Ⅳ	−4.56	0.78	田子，焼津，鬼崎
Ⅴ	−2.17	0.75	海南，久礼
Ⅵ	−0.81	0.59	細島
Ⅶ	1.49	0.51	仮屋，阿久根
Ⅷ	3.55	0.55	男鹿，飛島，鼠ヶ関，小木，柏崎，輪島，三国，田後，須佐
Ⅸ	0.97	0.41	忍路，奥尻，浅虫
その他	1.14	0.58	沖縄

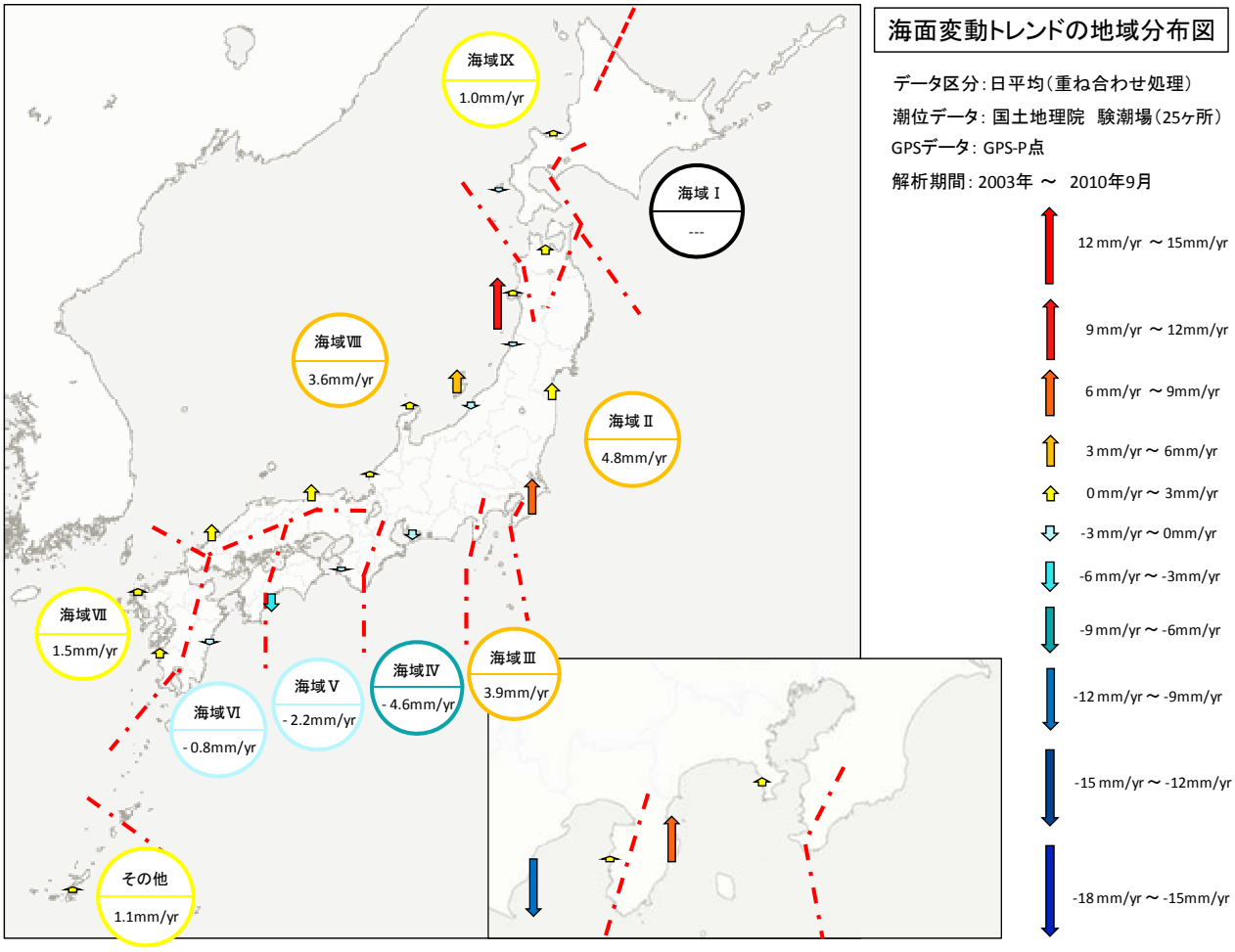

図-10　各海域での海面変動トレンド（GPS-P 点を使用）
※ 矢印は，各験潮場での海面変動トレンドを示している．

3.3 電子基準点から求めた海面変動トレンドとの比較

電子基準点は, 1992 年から 2001 年までの間に 946 点に設置され, 現在, 全国に 1240 点設置されている. したがって，2002 年頃から験潮場に設置してある GPS-P 点よりも電子基準点の方が設置年数が長い場合が多い．つまり，験潮場近傍にある電子基準点データを GPS データとして活用することで, より長いデータ期間（1996 年～）で海面変動トレンドを算出することができる．ただし，験潮場近傍にある電子基準点は，GPS-P 点と異なり，験潮場の地盤と直結していないため,「験潮場の地盤と験潮場近傍の電子基準点が同じ動きをする」と仮定している．したがって，験潮場と電子基準点の間に異なる地盤の動きがあった場合には，算出結果は正しい結果とならない．上記のことから，今回の報告では,「GPS-P 点から算出した海面変動トレンド」の検証として，電子基準点を用いた絶対的潮位の変動量を求め，相互の海面変動トレンドの結果を比較することとした．

「GPS-P 点から算出した海面変動トレンド」の検証として，解析に使用した験潮場近傍の電子基準点を表-4 に，求めた海面変動トレンドの結果を表-5, 表-6，図-11 に示す．解析処理は，2.で記載した手法と同じであるが，電子基準点と験潮場の位置が異なるため,「験潮場固定点を基準とした GPS-P 点の比高（K）」,「観測基準面定数（H）」を加味して算出した絶対的潮位（(4)式参照）ではなく，ある基準値をベースとした絶対的潮位の変動量として海面変動トレンドを求めている．

表-4　解析に使用した電子基準点と験潮場までの距離

No.	験潮場名	使用した電子基準点	験潮場－電子基準点間の距離(km)
1	油壺	三浦2(960759)	0.18
2	細島	日向(940094)	3.97
3	輪島	輪島(940053)	2.77
4	忍路	小樽2(960517)	0.19
5	海南	和歌山海南(940069)	3.14
6	浅虫	平内(960536)	2.05
7	鼠ヶ関	鶴岡(020932)	18.96
8	柏崎	柏崎2(960567)	1.13
9	鬼崎	常滑2(960632)	0.74
10	田後	岩美(940072)	1.61
11	勝浦	勝浦(93041)	4.39
12	三国	三国(940055)	3.38
13	久礼	中土佐2(960683)	1.58
14	男鹿	男鹿1(940030)	6.84
15	阿久根	阿久根(940096)	0.47
16	須佐	須佐(940076)	1.34
17	仮屋	玄海(940091)	0.34
18	相馬	相馬2(960558)	2.01
19	伊東	伊東八幡野(93062)	2.04
20	小木	小木(950235)	0.73
21	沖縄	知念(960745)	1.21
22	田子	西伊豆(93085)	3.96
23	焼津	焼津A(990840)	3.84
24	奥尻	奥尻2(960527)	4.10
25	飛島	飛島(950194)	※

※「飛島」（山形県酒田市）は，験潮場地盤に電子基準点が設置されており，GPS-P 点として解析を実施している．

表-5　電子基準点から求めた海面変動トレンド（験潮場毎）

No.	験潮場名	海面変動トレンド(mm/yr)	標準偏差(mm/yr)
1	油壺	1.16	0.24
2	細島	2.74	0.22
3	輪島	2.60	0.26
4	忍路	2.72	0.20
5	海南	−0.12	0.29
6	浅虫	−1.52	0.21
7	鼠ヶ関	0.08	0.62
8	柏崎	−1.24	0.30
9	鬼崎	0.90	0.35
10	田後	−1.71	0.27
11	勝浦	2.27	0.22
12	三国	7.08	0.32
13	久礼	1.18	0.32
14	男鹿	1.44	0.24
15	阿久根	1.41	0.22
16	須佐	2.24	0.21
17	仮屋	1.69	0.18
18	相馬	1.48	0.17
19	伊東	1.15	0.23
20	小木	4.28	0.19
21	沖縄	2.63	0.24
22	田子	2.48	0.27
23	焼津	−7.56	0.47
24	奥尻	1.16	0.20
25	飛島	10.37	0.20

表-6　電子基準点から求めた海面変動トレンド（海域毎）

海域	海面変動トレンド(mm/yr)	標準偏差(mm/yr)	対象験潮場
Ⅰ	---	---	該当なし
Ⅱ	2.28	0.16	相馬，勝浦
Ⅲ	1.63	0.22	油壺，伊東
Ⅳ	1.42	0.28	田子，焼津，鬼崎
Ⅴ	−0.52	0.27	海南，久礼
Ⅵ	2.74	0.22	細島
Ⅶ	1.65	0.19	仮屋，阿久根
Ⅷ	3.32	0.20	男鹿，飛島，鼠ヶ関，小木，柏崎，輪島，三国，田後，須佐
Ⅸ	0.92	0.17	忍路，奥尻，浅虫
その他	2.63	0.24	沖縄

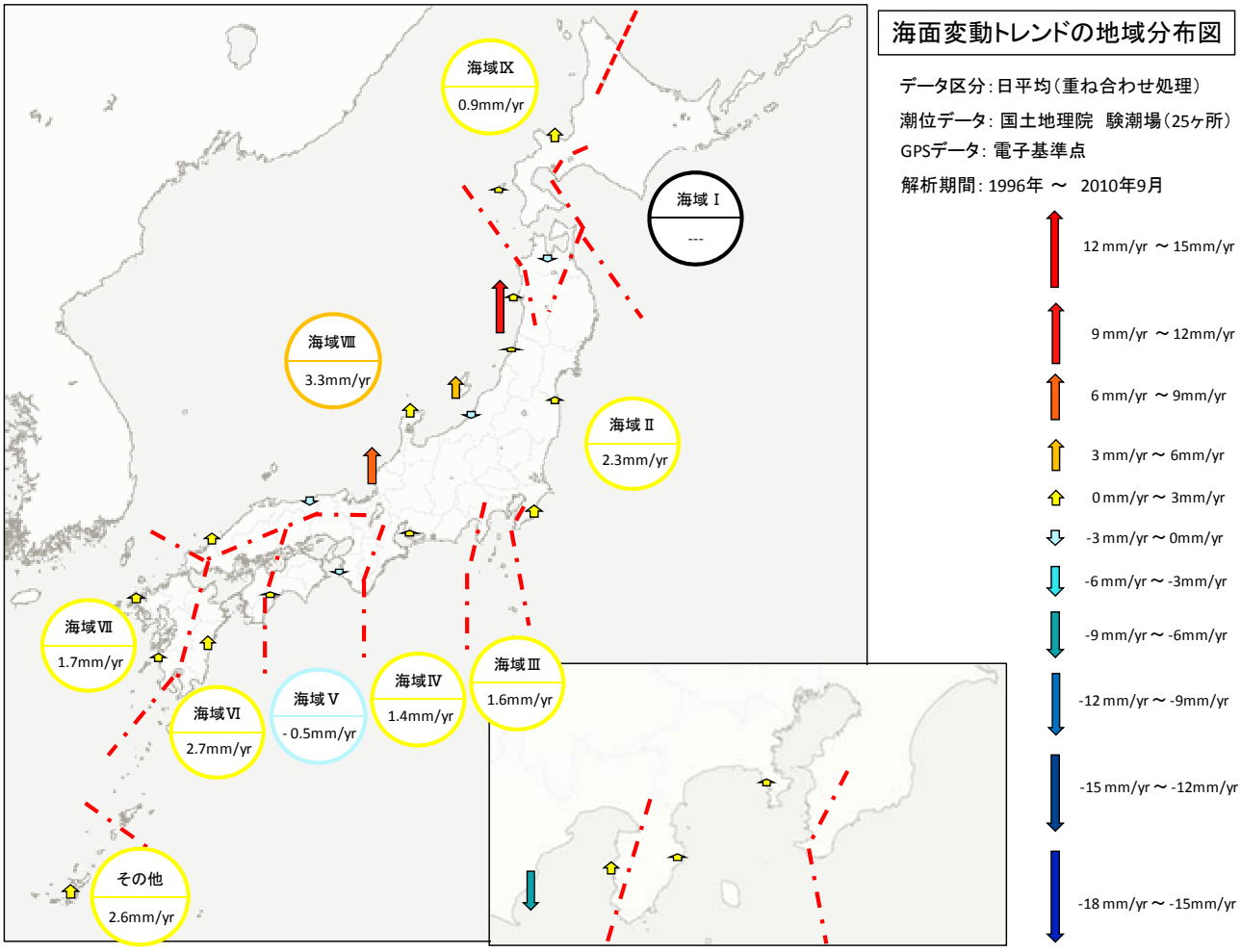

図-11　各海域での海面変動トレンド（電子基準点を使用）
※ 矢印は，各験潮場での海面変動トレンドを示している．

解析した海面変動トレンドの結果は，日本海側の海域（海域Ⅶ，海域Ⅷ，海域Ⅸ）では，GPS-P 点を使用した場合と同程度の 1mm/year から 3mm/year の海面上昇の傾向であったが，静岡県西部から四国にかけての太平洋側の海域（海域Ⅳ，海域Ⅴ，海域Ⅵ）では，海面上昇の傾向もしくは海面下降の傾向が軽減しており，「GPS-P 点から算出した海面変動トレンドの傾向」と整合しない結果となった．

「GPS-P 点から求めた海面変動トレンド」と「電子基準点から求めた海面変動トレンド」が一致しない要因として，海流の影響が大きく関係している．作成した絶対的潮位データでは，2004 年 7 月から 2005 年 8 月までに生じた黒潮大蛇行による一時的な潮位変化が確認された．具体的には，「油壺」，「伊東」（静岡県伊東市），「田子」（静岡県西伊豆町），「焼津」（静岡県焼津市），「鬼崎」（愛知県常滑市），「海南」（和歌山県海南市），「久礼」（高知県中土佐町）の神奈川県から四国にかけての 7 験潮場では，図-12 に示す明瞭な潮位変化が見受けられた．黒潮大蛇行が生じると，東海地方沿岸に冷水渦が現れ，海面の高さに変化が生じることが報告されている（気象庁）．一時的に数ヶ月に渡って潮位データが変化すると，変化量の大きい潮位データによって海面変動トレンドが変わってくる．つまり，「電子基準点から求めた海面変動トレンド」では，「GPS-P 点から求めた海面変動トレンド」に比べて観測期間を長く取っていることから，2004 年から 2005 年にかけて発生した黒潮大蛇行の影響が軽減され，「GPS-P 点から求めた海面変動トレンド」と異なる算出結果となったといえる．

したがって，10 年弱の潮位データから，太平洋側の長期的な海面変動トレンドを算出するには，海流の影響を考慮する必要がある．逆に，黒潮大蛇行といった海流の大きな流路変化がない日本海側での海面変動トレンドとして，1mm/year から 3mm/year の海面上昇の傾向という結果は「GPS-P 点から求めた海面変動トレンド」と「電子基準点から求めた海面変動トレンド」の結果がほぼ一致していることからも，妥当であると考えられる．

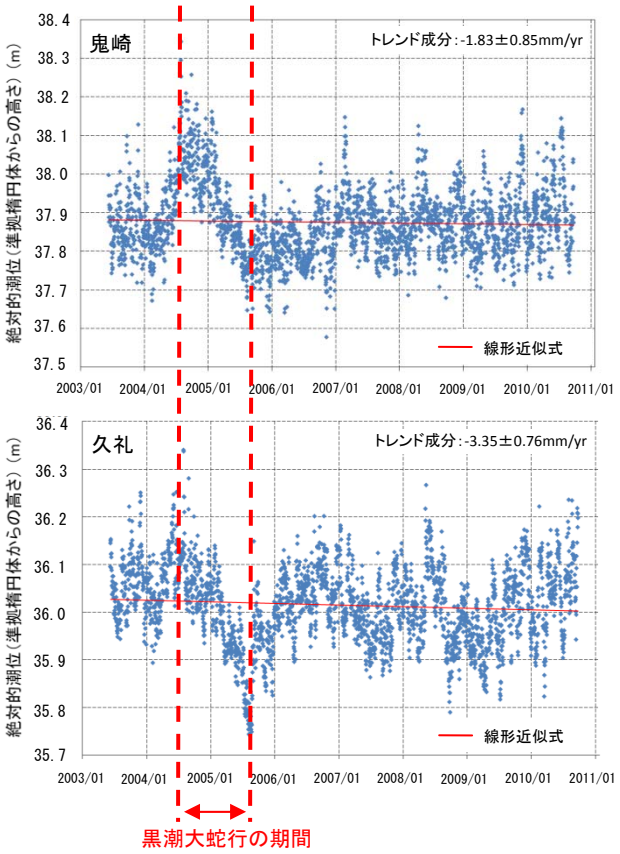

図-12　黒潮大蛇行時の絶対的潮位変化（鬼崎，久礼）

4. 今後の課題

4.1 潮位データ

今回実施した解析では，潮位データに気圧補正，潮汐補正を実施した後，験潮場の地盤上下変動の除去を実施した．しかし，潮位には，その他にも，海流，海水温，塩分濃度，験潮場の地域特性等の影響が含まれているため，今後検討する必要がある．

1) 海流の影響

3.3 で述べたように，神奈川県から四国にかけての験潮場では，作成したデータに黒潮大蛇行の影響が見受けられ，今後，海流の影響の補正・除去手法を検討する必要がある．

2) 高潮の影響

験潮場は港湾内に設置されていることが多い．湾内において高潮は，主として気圧低下による海面の吸い上げと強風による湾内への吹き寄せによって生じる．今回の解析手法では，静水圧平衡の式を用いることにより気圧補正を行っているが，風による吹き寄せによる効果は含めていない．

作成した絶対的潮位データを，毎時平均風速 10m を閾値として，データの分布状況をグラフに描いてみたところ，風速 10m 以上のデータのばらつきに目立った偏りは見られなかった．したがって，高潮による一時的な潮位の影響は，今回算出した海面変動トレンドに与える影響は少ないことが予想されるが，十分な評価ではない．したがって，今後，高潮時の潮位データが与える影響を精査していく必要がある．

3) 海水温と塩分濃度の影響

海面は，海水温や海水の塩分濃度によっても変動する．海水温や海水の塩分濃度は，水深によって変化するため，直接補正することは難しい（国土地理院, 1996）が，IPCC 第 4 次報告書に，「アルチメトリーから得られた海面変動の地域分布図」と「海水の熱膨張の地域分布図」を対比させたものが掲載されているように，数値シミュレーション等の研究結果と比較することは可能である．

4) 験潮場の地域特性

験潮場は沿岸部に位置しているため，河川に近い場所では，海水の塩分濃度が外海と異なる変化をする可能性がある（千早，2007）．たとえば，「鼠ヶ関」（山形県鶴岡市）周辺の海水比重は，通常の海水の比重よりも低く，近隣の河川の影響があることが報告されている（三和，2009）．また，最近は，験潮場井戸の亀裂から地下水が侵入する事例も確認され，補修作業を実施している（写真-4）．地下水が井戸内に入りこむと，外海の海水と比重が変わり，潮位に影響を及ぼす．したがって，験潮場での定期的な比重測定や観測用井戸の確認作業を継続的に実施する必要がある．

写真-4　「輪島」で確認された観測井戸の亀裂からの地下水の浸入（2010 年 11 月）

4.2 GPS-P 点データ

験潮場によっては，近くに急な傾斜地が存在する場合がある（写真-5）．験潮場の近くに急な傾斜地があると，GPS-P 点の上空視界が妨げられ，GPS 観測での誤差が大きくなる．この点についても，海面変動トレンドに与える影響を評価する必要がある．

写真-5　「阿久根」と背後にある傾斜地

4.3 他機関の潮位データの活用

潮位データと GPS データを組み合わせた海面変動モニタリングは，直接，観測点による海面変動を把握することが可能であるが，定点観測のため，アルチメトリーのように面的に海面を捉えることができない．そのため，他機関の潮位観測施設のデータを活用して，より稠密な観測点で海面変動トレンドを把握することが重要である．

気象庁の験潮場（注：気象庁では，験潮場のことを「検潮所」の名称で整理している）16 ヶ所にも，国土地理院において，GPS 連続観測点を設置している．したがって，16 ヶ所においても，験潮場の地盤上下変動の除去した絶対的潮位データを作成し，評価する必要がある．また，電子基準点は，全国約 1200 ヶ所に設置してあり，潮位観測施設の最寄りの電子基準点を使用することで，他機関の潮位観測施設の潮位データから，地殻変動成分を除去した潮位データを提供することも可能である．しかし，今回，国土地理院の験潮場において，近傍の電子基準点を用いた場合と GPS－P 点を用いた場合で，解析期間を同期間として海面変動トレンドの比較を行ったところ，「柏崎」（新潟県柏崎市）では大きくトレンドの値が違う結果となった（表-7）．このトレンドの違いは，2007 年 7 月に発生した新潟県中越沖地震により「柏崎験潮場」と「近傍の電子基準点（柏崎 2）」の間で，異なる地盤の動きがあったためである．したがって，近傍の電子基準点データを活用する場合には，験潮場と電子基準点間の水準測量を定期的に行い，変動量を確認するなど，データの取り扱いに注意を払う必要がある．

5. まとめ

今回，GPS-P 点を用いた験潮場の地盤上下変動の除去の他に気圧補正，潮汐補正を行った潮位データを作成し，GPS-P 点設置時からの海面変動量の算出を試みた．算出した日本の海面変動トレンドは，全験潮場平均で 1.1mm/year であり，最近の研究報告にある全球的な海面変動トレンドとも調和した結果であった．

表-7　「GPS-P 点を使用した場合」と「電子基準点を使用した場合」の海面変動トレンド比較
（解析期間：同期間に設定）

No.	験潮場名	① 海面変動トレンド (mm/yr) 【GPS-P点使用】	② 海面変動トレンド (mm/yr) 【電子基準点使用】	トレンド差 (mm/yr) 【①－②】	備考
1	油壺	1.59	1.23	0.36	
2	細島	−0.81	1.70	−2.51	
3	輪島	1.64	−0.46	2.10	
4	忍路	0.19	−0.16	0.35	
5	海南	−0.83	−2.31	1.48	
6	浅虫	−2.34	−2.93	0.59	
7	鼠ヶ関	−1.07	0.08	−1.15	
8	柏崎	−1.24	−8.20	6.96	※1
9	鬼崎	−1.83	−2.08	0.25	
10	田後	−1.83	−5.39	3.56	
11	勝浦	6.80	6.51	0.29	
12	三国	0.90	0.26	0.64	
13	久礼	−3.35	−3.16	−0.19	
14	男鹿	1.07	1.04	0.03	
15	阿久根	2.04	1.65	0.39	
16	須佐	2.92	2.50	0.42	
17	仮屋	1.11	1.59	−0.48	
18	相馬	1.48	2.34	−0.86	
19	伊東	6.55	6.62	−0.07	
20	小木	4.40	4.72	−0.32	
21	沖縄	1.14	1.49	−0.35	
22	田子	0.08	−0.27	0.35	
23	焼津	−11.56	−11.90	0.34	
24	奥尻	−0.33	−1.27	0.94	
25	飛島	--	--	--	※2

※1　新潟県中越沖地震（2007 年 7 月）の影響で，海面変動トレンドの算出結果に大きな差が出ている．

※2　「飛島」は，験潮場地盤に電子基準点が設置されており，GPS-P 点として解析を実施している．

各験潮場の海面変動トレンドには地域分布が見られ，日本海側及び北太平洋側では海面上昇の傾向が見られるが，静岡県西部から四国にかけての太平洋側では，海面下降の傾向が見られた．また，IPCC 第 4 次報告書や AVISO ホームページに掲載されているアルチメトリーによる結果でも同様の傾向がみられている．今回作成した潮位データから，このような地域分布には，黒潮の影響が大きく関わっていることが分かった．特に黒潮大蛇行時に「油壺」，「伊東」，「田子」，「焼津」，「鬼崎」，「海南」，「久礼」の神奈川県から四国にかけての 7 験潮場では明瞭な潮位変化が確認された．一時的に潮位データが変化すると，変化量の大きい潮位データが影響して海面変動トレンドが変わってくることから，黒潮大蛇行といった海流の流路変化に注意すべきである．

本取り組みで実施した「地殻変動を補正した潮位データ」や「験潮場での地殻変動量の情報」を提供することで，気候変動把握のための基礎データとし

ての活用が期待できる．今後も引き続き，測地観測センターでは，GPS 連続観測網（GEONET）と験潮場を維持管理する部署として，地殻変動及び潮位監視の取り組みを強化し，測量分野だけではなく，地球科学をはじめとする様々な分野に貢献することを目指していく．

参 考 文 献

Altamimi, Z., X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt and C. Boucher (2007) : ITRF2005: A new realease of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, J. Geophys. Res., 112, B09401, doi:10.1029/2005JB003629.

AVISO : Mean Sea Level rise, http://www.aviso.oceanobs.com/en/news/ocean-indicators/mean-sea-level/ (accessed 9 Feb. 2011) .

Bevis, M., W.Scherer, M. Merrifield (2002) : Technical Issues and Recommendations Related to the Installation of Continuous GPS Stations at Tide gauges, Marine Geodesy, 25:87-99.

気象庁（1999）：海洋観測指針（第 2 部），気象庁，88.

気象庁：海洋の健康診断表，http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/sougou/index.html (accessed 9 Feb. 2011)．

気象庁：過去の気象データ検索，http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php (accessed 9 Feb. 2011).

気象庁：気候変動監視レポート 2010,
http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/monitor/2010/pdf/ccmr2010_all.pdf (accessed 9 Feb. 2011) .

加藤照之，津村建四朗（1979）：潮位記録から推定される日本の垂直地殻変動（1951～1978），地震研究所彙報，Vol.54，559-628.

川元智司，三和功喜（2009）： 験潮場の GPS 連続観測データを用いた海面変動解析，日本測地学会第 112 回講演会予稿集，83-84.

国土地理院（1994）：験潮 100 年のあゆみ，国土地理院技術資料 B.1-No.21.

国土地理院（1996）：海面変動観測手法に関する調査作業報告書.

国土地理院（2003）：験潮場の GPS 観測局における高さ取り付け観測要領.

小谷京湖，畑中雄樹，吉田賢司，宗包浩志（2009）：GPS 連続観測システム（GEONET）解析固定点座標算出について，国土地理院時報，118，17-21.

中川弘之，畑中雄樹，湯通堂亨，石倉信広，豊福隆史，小谷京湖，宮原伐折羅，岩下知真子，川元智司，宗包浩志，石本正芳，菅原安広（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.

中堀義郎（1983）：高精度自動解析器の開発研究，国土地理院時報，57.

高原正勝（1987）：平均潮位の精度向上について，昭和 62 年度高等測量研修課題研究報告書.

千早昭二（2007）：全国験潮場井戸内と外海の海水比重差調査について（報告）.

濱田加奈子，三和功喜，川元智司（2010）：潮位観測と GPS 連続観測を関連づけた地殻変動検出の研究，平成 21 年度調査研究年報，http://www.gsi.go.jp/common/000057643.pdf (accessed 9 Feb. 2011).

三和功喜（2009）：鼠ヶ関験潮場調査作業作業報告書.

Plag H.-P. and M.Pearlman (eds.) (2009): Global Geodetic Observing System Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020, Springer.

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.) (2007): Climate Change 2007 -The Physical Science Basis-, Cambridge University Press.

Wöpplemann, G., C. Letetrel, A. Santamaria, M. N. Bouin, X. Collilieux, Z. Altamimi, S. D. P. Williams and B. Martin Miguez (2009) : Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame, Geophys. Res. Lett., 36, L12607, doi:10.1029/2009GL038720.

Wöpplemann, G., B. Martin Miguez, M. N Bouin and Z. Altamimi (2007) : Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide, Global Planet. Change, 57, 396-406.