

図-33 「本宮」 - 「那智勝浦」の基線変化 (上) と基線の標準偏差の絶対値変 (下)

それでは、実際に樹木が電子基準点の解析結果影響を及ぼした例を紹介する。電子基準点「那智勝浦」は、写真-8から判るようにすぐ北側に大木が存在し北側の電波はほぼ遮蔽された状況にあった。2003年7月25日に伐木して環境の改善をはかったことに伴い、時系列データにオフセットが生じた。図-33は、「本宮」に対する「那智勝浦」の時系列を表したグラフである。伐木によって、水平方向2~3cm、比高約11cmものギャップが生じている。上のグラフをよく見ると2000年後半から、それ以前のパターンと異なっている。年周期な揺らぎの振幅は大きく、南西方向・沈下傾向であったトレンドは明らかに北東方向・隆起へ転じている。比高成分において伐木後のデータが、2000年時以前の値に戻ったことで2001年から伐木までの間は影響を受けていたと考えられる。

図-33のグラフは、各成分の標準偏差の絶対値を表したもので、上にプロットされているほど精度が悪いことを意味している。このグラフからは、観測精度は冬に高く夏に低下することを繰り返しながら次第に悪化し、伐木によって精度が向上したといえる。最も観測精度が低い時期(第三四半期)に伐木したにもかかわらず、冬季なみの水準に推移し格段の効果が得られた。注意として標準偏差にはGPS衛星の配備や解析戦略の変更なども含まれていることから同一条件ではない。

(4) 補正値の計算方法—保守の場合—

電子基準点で先ほど述べた保守を実施すると、解析結果にギャップとなって現れ、地殻変動の監視・解析業務に支障をきたすので、そのギャップは補正を施し連続性を保たなければならない。アンテナの設置誤差は交換時に測定できないことや、必ずしも一定でないことから、補正値は各点毎に解析結果から計算で求めるしか手段はない。補正は、保守後の解析結果を保守前のデータに合わせている。その補正の概要を述べる。

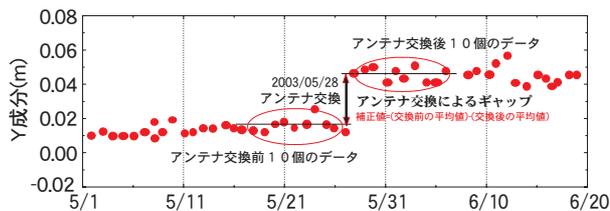


図-34 アンテナ交換等の保守によって生じたギャップ

図-34は、アンテナ交換によって時系列に約+3cmのギャップが生じた例を示したものである。このギャップ量は基本的に交換前後10日間のそれぞれのデータから標準偏差の2倍を超過したばらつきのある大きいデータを除き座標値から求めた。場合によっては同時期に保守作業が実施されていない隣接点と複数の基線を設け座標差から計算した。このような解析結果に及ぼす保守が短期間(10日間)に2度以上行われていた場合は、計算に要する日数を減らして算出した。

解析の固定点「つくば1」のアンテナ交換は、その設置誤差がその観測網全点の座標に影響する。また、「つくば1」の座標値は、プレート運動速度と一致するような強い拘束条件をかけており、「つくば1」に補正は入れられない。そこで、「つくば1」のアンテナ交換では、旧GEONETのTrimble網に属する観測点の中から工事前後10日間に工事されていない525点について3次元直交座標での座標差を求め、その平均値を補正値とした。補正値は、10日間の標準偏差の2倍を超過したばらつきのある大きなデータを除いて算術平均で求めた(表-7参照)。

$$\text{補正値} = (\text{工事前: 2003/02/23} \sim \text{2003/03/04 平均値}) - (\text{工事後: 2003/03/06} \sim \text{03/15 平均値})$$

表-7 「つくば1」のアンテナ交換に伴う補正量

成分	補正値	備考
X	-0.0014m	全点共通の値
Y	0.0035m	全点共通の値
Z	0.0154m	全点共通の値
南北	0.0105m	北をプラス、つくば1での値
東西	-0.0018m	東をプラス、つくば1での値
上下	0.0118m	上をプラス、つくば1での値

このように、人為的な要因で発生した時系列のオフセットは、前述したとおり、前後一定期間（基本は10日間）の平均値の差から求め、上で求めた3次元直交座標系の補正量を、Trimble網の全点に3月5日以降に加えてデータを連続的にした。補正した例を図-35に示す。

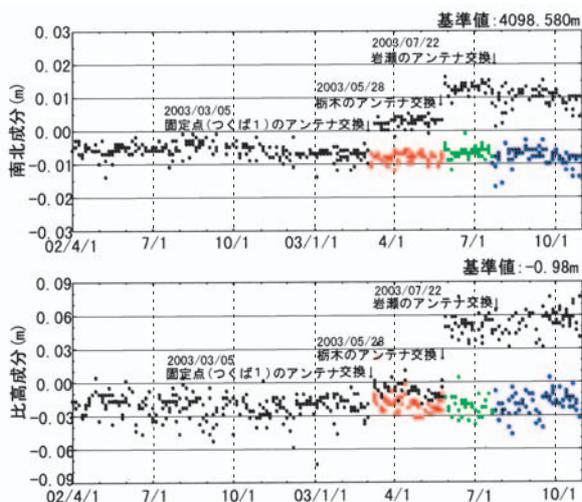


図-35 「栃木」-「岩瀬」基線におけるアンテナ交換によって生じたギャップに対し補正前後のグラフ。色分けしたところがアンテナ交換を実施し、補正した箇所を示す。

2. 4. 3 道東地方における凍上現象

(1) 凍上現象とその対策法

土は表層から浸透する寒気が凍結温度0℃になる深さのところまで凍る。もともと土に含まれている水分が凍るのなら問題は無いが、凍るときに下層から水分を吸い上げて氷晶をつくる。この作用が繰り返し起きることにより氷晶が発達し凍結度圧が大きくなり結果として構造物を押し上げてしまう。これが凍上現象と呼ばれるものである。

この現象は、家屋等建築物・道路・橋梁等に悪影響をおよぼすため各種の対策法がある。

まず凍上現象が起きる条件は

- 1) 凍上を起こしやすい土質であること（粘土、シルト質、火山灰等との混合土）
- 2) 土中の温度が凍結するまで下がること。
- 3) 氷晶を造るのに十分な水分補給が下層からあること。

以上の3点が必要条件となり、このうち一つでも欠ければ凍上は起きない。

そこで、この条件に対応した対策法がある。以下にその対策法を紹介する。

- 4) 構造物の周囲の土を非凍土材に置き換える置換工法。
- 5) 構造物の周囲に断熱材を張り巡らす、ヒートパイプ等で暖める。
- 6) 構造物の下層に水抜き用の排水管、排水溝を設置する。

(2) 電子基準点の凍上対策試験施工

国土地理院では平成10年度より凍上対策試験施工を行っている。平成10年度に非凍土材を入れる置換工法、平成11年度から13年度にかけては電子基準点の基礎の周囲に断熱材を貼り付ける工法を行い、14年度と15年度は非凍土材を入れる置換工法と断熱材との併用を行っている。凍上対策の施工方法としては構造物の下層に排水管等の排水設備を設置するのが一番効果的といわれているが、新規に電子基準点を設置するならば可能だが、既存の電子基準点ではこの工法は難しいため行っていない。

(a) 最大凍結深度の（積雪量が0cmとした場合の凍結深度）の推計

凍上対策作業において、まずその電子基準点の設置されている場所の土壌及びコンクリート基礎の凍結深度が重要になってくる。

凍結深度（地面が凍結する深度）は、積算寒度（平均気温が0℃を記録した日からの積算温度）と土壌の凍上比例定数（地中水の含有率を含む）によってAldrichによるNeumanの簡易式で求め、試験施工における非凍土材、断熱材の挿入、掘削長を計算した。なお計算に使用したデータはアメダスデータを利用した。

Z_G ：含水率10%の混合土の凍結深

$$Z_G : 1.94 \sqrt{^{\circ}\text{C} \text{days}}$$

Z_C ：含水率7%のコンクリートの凍結深

$$Z_C : 5.20 \sqrt{^{\circ}\text{C} \text{days}}$$

例) 2000年根室における凍結深度

土壌凍結深 平均 53.5cm

基礎凍結深 142.5cm

(b) これまでの凍上対策施工の検証

平成13年度までに4種類の工法が行われた。平成10年には電子基準点の周囲50cmに非凍土材を入れる工法、平成11年度からは電子基準点の周囲に断熱材を入れる工法を3種類施工したが、断熱材を入れる工法は効果が長続きしないことがわかった。(図-36、図-37) これは寒気により周囲の土が凍結、融解を繰り返すことにより土圧の影響を受け断熱材が破壊され本来の能力を発揮できなくなったものと推

測される。しかし断熱材で電子基準点の基礎を覆うことは土壤凍結深に対し基礎凍結深の方が1m近く深いため重要である。

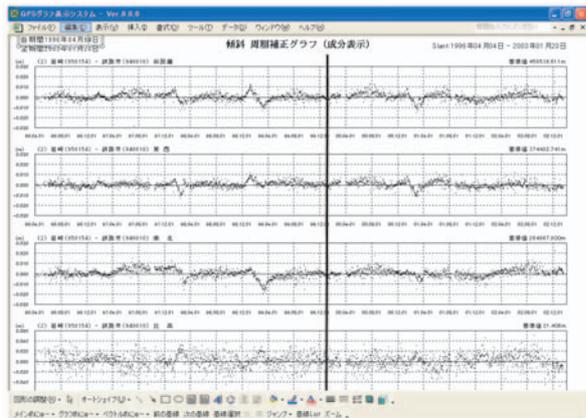


図-36 黒線 平成11年12月 凍上対策施工 釧路市 (940010)

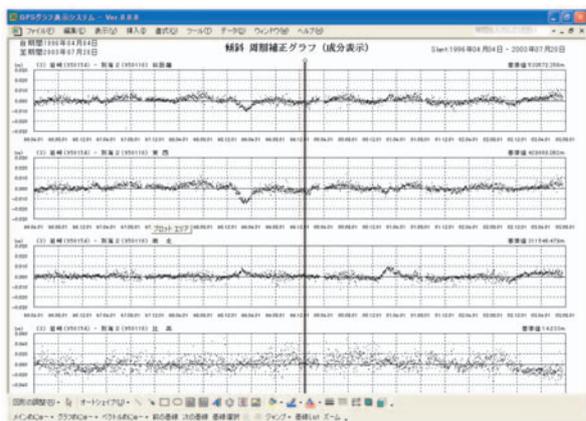


図-37 黒線 平成11年12月 凍上対策施工 別海2 (950118)

(3) 平成14年度以降の凍上対策施工方法

そこで平成14年度以降の施工方法として非凍土材を入れる置換工法を基本とし断熱材で基礎を覆う併用工法としている。

具体的には、アメダスでの平均気温から求めた観測点のコンクリート基礎の最大凍結深140cmまで周囲の基礎を掘削した。側面を基礎深まで掘削しないのは基礎の移動を防ぐ目的もある。厚さ10cmの断熱材(抽出式ポリスチレン)を基礎に接着し、さらに厚さ10cmの断熱材を圧着した。そこから外側1mの土壤を砂利に入れ替えた。さらに地表下20cmにビニールシートを敷き上部に芝張りを施した(図-38)。

この方法により側壁寒気と凍上に必要な地中水を遮断することが出来、また断熱材は凍結土圧に対する緩衝材の役割も期待でき凍上阻止に効果が期待できる。

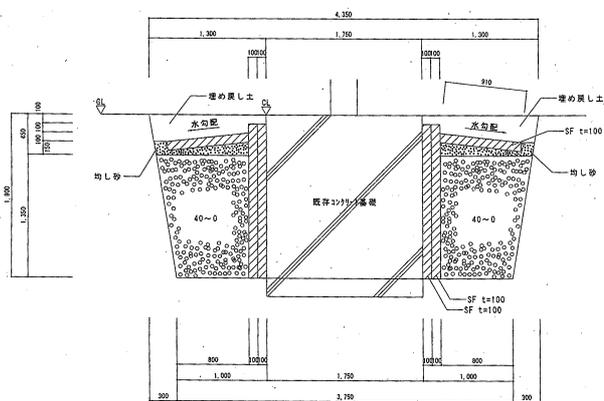


図-38 施工図(側面)

(4) 今後の課題

北海道東部は、地震予知連絡会において、地震予知に関する観測研究を効果的に実施するため重点的に観測を強化する特定観測地域として選定されている。この地域において、冬季における地殻変動監視の障害となる凍上現象によるノイズを極力排除し、観測業務を行うことは重要な課題である。そのためには凍上現象軽減は必要不可欠な対策である。しかし道東地方の電子基準点で凍上現象と思われる変位を観測している点は15点程度あり、対策点は8点にとどまっており、しかも対策の効果が薄れてきている点も数点ある。今後は予算的な面、施工方法の調査研究、試験施工など必要な措置を早期に検討、確立することにより、道東地域における冬季の監視精度向上、安定を目指すことが急務である。

3. 電子基準点が捉えた地殻変動とその提供

3.1 地殻変動検出例

全国GPS連続観測システムは1994年10月1日より本格的に稼動を開始した。稼動開始直後の10月4日に発生した北海道東方沖地震(M8.1)を皮切りに、同年12月28日の三陸はるか沖地震(M7.5)、また、1995年1月17日には多くの犠牲者を出した兵庫県南部地震(M7.2)が発生し、稼動後わずか4ヶ月でマグニチュード7を超える三つの大地震の洗礼を受けた。全国GPS連続観測システムにより得られた地震に伴う地殻変動は、いずれも地震後数日で地震予知連絡会や一般に公表され、GPS連続観測システムの即応性を明らかにした。その後、有珠山や三宅島の火山活動、鳥取県西部地震等の地殻変動を迅速かつ従来にない高い精度で捉えている。ここでは、近年、全国GPS連続観測システムが捉えた地殻変動の解析結果を紹介する。

3. 1. 1 宮城県北部を震源とする地震

2003年7月26日0時13分頃に宮城県北部を震源とする震度6弱 (M5.5) の地震が発生した。その7時間後の同日7時13分頃には震度6強 (M6.2) の地震が発生、さらに16時56分頃に震度6弱 (M5.3) の地震が連続して発生した。緊急解析 (6時間観測データを3時間ずつずらしながら準リアルタイムに解析する) の結果からは、0時13分頃の地震と16時56分頃の地震に伴う地殻変動は検出されなかったが、7時13分頃の地震については、震源に近い電子基準点「矢本」を中心とした周辺地域に明らかな地殻変動を捉えた。電子基準点「水沢1」を固定として見た場合、「矢本」が南東方向に16.4cm移動し、5.8cm隆起したことが検出された (図-39)。

今回の活動は、前震、本震、余震型で推移しており、0時13分頃のM5.5の地震が前震、7時13分頃のM6.2の地震が本震と考えられている。

* 電子基準点「矢本」については、地震後に同点周辺の停電による影響で観測データが回収不可能であったため、東北地方測量部職員が現地に入り、非常用電源を使用してデータ回収に成功した。さらに電子基準点のピラーが地震時に0.1度程度傾いた (水平方向の移動量約0.7cmに相当) ことが確認されており、地殻変動だけでなく別の要因による局所的な地盤変形の影響が含まれている可能性がある。

3. 1. 2 平成15年 (2003年) 十勝沖地震

(1) 過去最大の地盤の水平移動・沈降を観測

9月26日4時50分頃に北海道十勝沖を震源とする震度6弱 (M8.0) の地震が発生し、北海道の広い範囲で地殻変動が検出された。震源に近い襟裳岬周辺では変動が大きく、電子基準点「岩崎」を固定として見た場合、「広尾」が最大で南東方向に約97cm移動し、「大樹2」で約28cmの沈降が検出された (図-40)。これは、全国GPS連続観測システムの稼働開始以来、水平・上下方向とも最大の変動量であった。

(2) 地震発生後の地殻変動 (余効変動) を検出

大地震が発生すると、その後に生じるゆっくりとした地殻変動がしばらく続くことがある。このような現象を余効変動と呼んでいる。今回の地震で襟裳岬付近を中心に北海道の広い範囲で余効変動が観測されており、最大の変動量は電子基準点「えりも1」で観測され、9月27日から12月上旬の時系列で見た変動の推移では、東西成分で東に約9.8cm、南北成分で南に約6.4cmの変動が続いているのがわかる。また、南東方向に11.7cmの水平変動が確認されている (図-41)。

3. 1. 3 豊後水道周辺のゆっくりすべり

豊後水道周辺において、2003年6月上旬頃から地震動を伴わない地殻変動 (ゆっくりすべり: Slow Slip) が観測された。その範囲は、豊後水道周辺の四国西南部から九州の東海岸付近にかけての地域で、兵庫県の「兵庫日高」を固定として見た地殻変動は、愛媛県三崎町や同県御荘町の電子基準点において、南東方向に約7ヶ月間かけて最大約2.6cm移

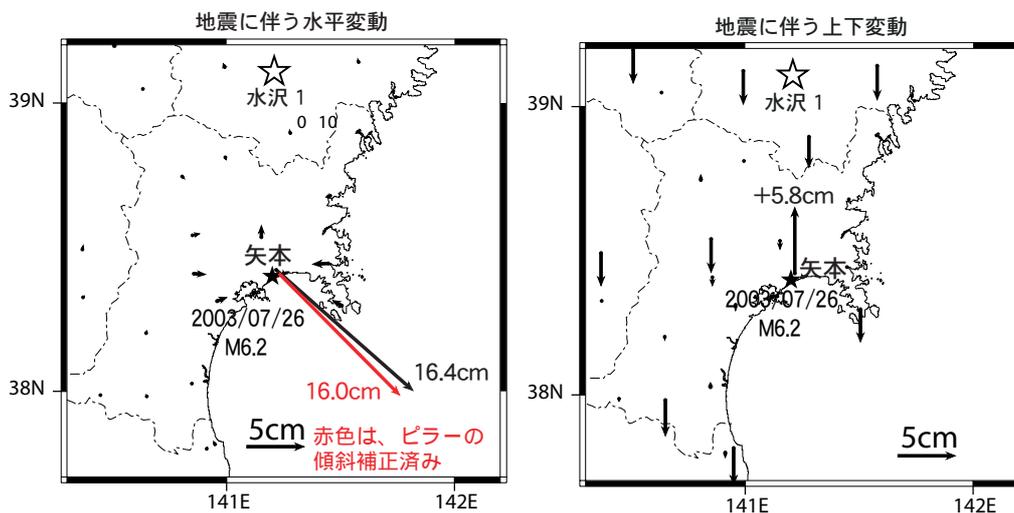


図-39 宮城県北部の地震に伴う地殻変動 (左図: 水平成分 右図: 上下成分)
固定点を「水沢1」として、2003/7/16~7/25の平均値に対する7/27~8/5の平均値の差。地震によって「矢本」のピラーは、東へ0.7cm傾斜しその量を補正した変動量は、16.0cmである。

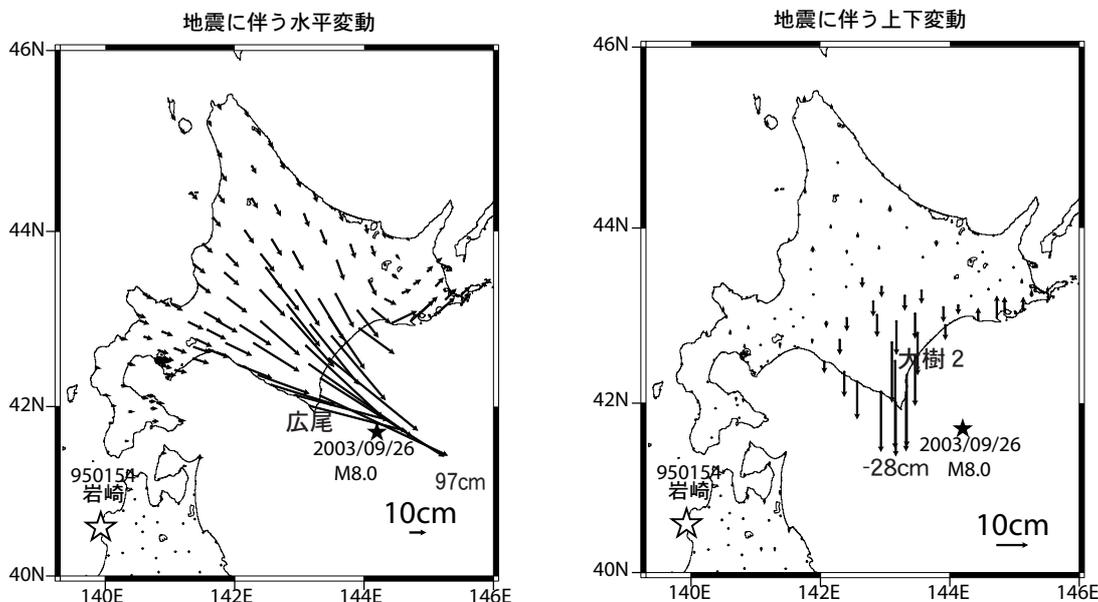


図-40 平成15年（2003年）十勝沖地震に伴う地殻変動（左図：水平成分 右図：上下成分）
 固定点を「岩崎」として、2003/9/16～9/25の平均値に対する9/27の座標値の差。

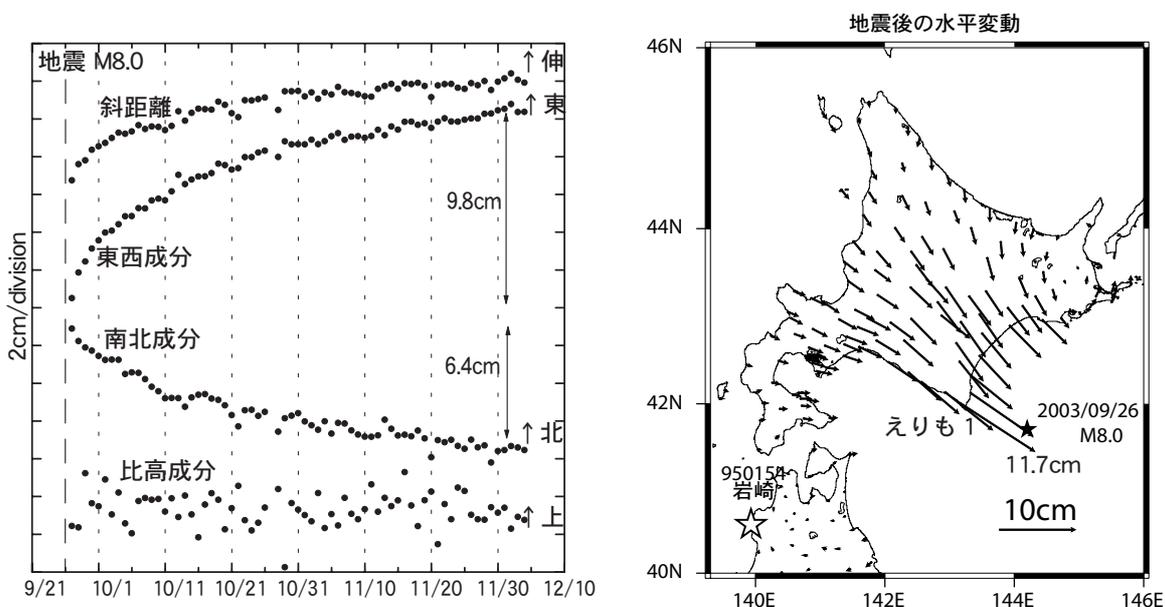


図-41 平成15年（2003年）十勝沖地震の余効変動
 左図：「岩崎」に対する「えりも 1」の時系列変化
 右図：固定点を「岩崎」として、2003/9/27の座標値に対する2003/12/1～12/10の平均値の差

動している（図-42）。この地域では、1996年から1997年にかけて約3cmの地殻変動が捉えられており、今回の活動は、前回の活動とほぼ同じ領域で発生している。

3. 2 解析データの提供

現在、全国に約1,200点の電子基準点が設置され、それらによって構成されたGPS連続観測網（GEONET）による地殻変動観測は、地震観測とともに地震調査

研究において不可欠であり、いわば車の両輪として無くてはならぬものになっている。また、火山活動に関しても前兆現象や火山活動の消長を監視する上で貢献している。

GEONETによる24時間データを用いた定常解析により各電子基準点の日々の座標値が得られ、この結果を用いて全国の地殻変動が監視されている。また、異常な地殻変動データが検出された場合、震度5以上の地震や火山噴火が起きた場合、あるいは震

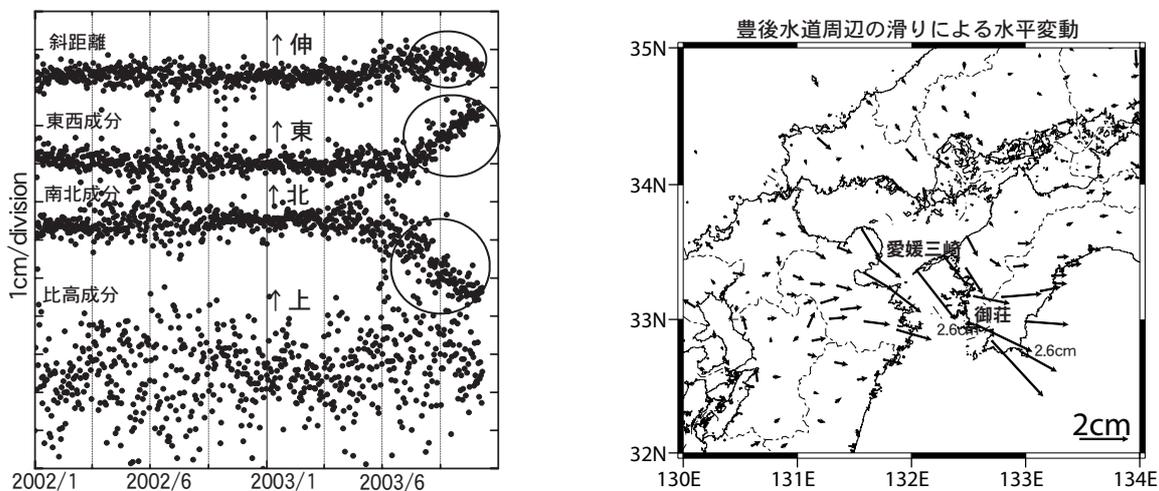


図-42 豊後水道周辺のゆっくり滑り (右図：愛媛三崎の時系列変化 左図：水平変動)
 固定点を「兵庫日高」として、2001/1/1～2003/3/31のデータからトレンド・年周・半年周成分を推定し、それらの補正を施した値を元に2003年5月に対する2003年12月の変動

度は小さいが多くの被害が起きた地震の場合には緊急解析が行われる。この緊急解析は、6時間のデータを用いて行う解析を3時間ずつずらして行うことにより、見かけ上3時間毎の解析結果を得ている(図-43)。

解析システムはまもなく新システムへ移行する。解析に関する現システムと新システムの違いは2.で述べられている。解析結果の時間分解能は、両システムともすべての点について24時間で変わらない。一方、緊急解析による時間分解能3時間では、現システムでは解析可能点数が最高30点であるため、解析はイベント発生時しか行われなかったが、新システムではすべての点を対象に定常的に解析が行われるためすべての点で3時間値が得られる。

これらの解析結果は、電子基準点の座標変化や電子基準点間の成分(斜距離, 東西, 南北, 比高)変化をグラフ化するほか、地殻変動モデルの推定等に使用され、それらの資料は、地震や火山活動に関する各種委員会等の本会議及び異常な地殻変動データが検出された場合や地震、火山噴火が発生した場合に開催される臨時会に提供される。

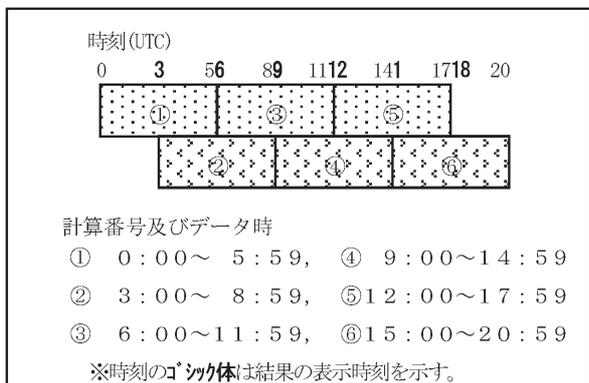


図-43 緊急解析における使用データの組合せ例

3. 2. 1 資料を提供しているおもな委員会等

(1) 地震調査委員会

平成7年1月17日に発生した阪神・淡路大震災の教訓を踏まえ、平成7年7月、全国にわたる総合的な地震防災対策を推進するため、地震防災対策特別措置法が制定され、同法に基づいて地震調査研究推進本部が総理府に設置(現文部科学省に設置)された。

地震調査委員会は地震調査研究推進本部を構成する委員会のひとつで、関係機関の職員及び学識経験者で構成されている。委員会は毎月定例に開催され、調査観測結果や研究成果を整理・分析して地震活動を総合的に評価し、その結果を広く公表するとともに国や都道府県等の防災機関に随時説明を行っている。また、被害地震が発生した場合や顕著な地殻変動が発生した場合等には、臨時会議を開催し、地震活動の現状や余震の発生確率等について評価を行っている。国土地理院は気象庁とともに共同庶務を担当している。

(2) 地震予知連絡会

地震予知連絡会は、地震予知の実用化を促進することを目的に、地震予知に関する観測研究を実施している関係機関や大学の30名の委員で構成され、それぞれの研究報告や観測情報を交換し、これらに基づいて学術的判断を行うこととして、昭和44年4月に国土地理院長の私的諮問機関として発足した。事務局は地理地殻活動研究センターが担当している。

地震予知連絡会は、年4回(5, 8, 11, 2月)定期的に開催されるほか、被害地震が発生した場合や顕著な地殻変動が発生した場合は、その対象地域により、特定部会、強化地域部会及び臨時会を随時開催している。

討議の内容は連絡会後の記者説明会や地震予知連

絡会のホームページで一般に公開している。

<http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/ccephome.html>

関係機関や大学から地震予知連絡会に報告された観測成果は地震予知連絡会会報として年2回まとめられるほか、地震予知観測の成果が地域別にまとめられ、地震予知連絡会地域部会報告として随時発行されている。

(3) 火山噴火予知連絡会

火山噴火予知計画（文部省測地学審議会（現文部科学省科学技術・学術審議会測地学分科会）の建議）により、関係機関の研究及び業務に関する成果及び情報の交換、火山現象についての総合的判断を行うこと等を目的として、昭和49年に設置された。この連絡会は、学識経験者及び関係機関の専門家から構成され、気象庁が事務局を担当している。

連絡会は年3回（5、10、1月）定例会を開催し、全国の火山活動について総合的に検討を行うほか、火山噴火などの異常時には、臨時に幹事会や連絡会を開催し、火山活動について検討し、必要な場合は統一見解を発表するなどして防災対応に資する活動を行っている。また、特定の課題について検討するためのワーキンググループや部会が設置されることもある。

(4) 地震防災対策強化地域判定会委員打ち合わせ会

地震防災対策強化地域判定会は東海地震の発生の可能性を検討するために、昭和54年に大規模地震対策特別措置法に基づいて気象庁長官の諮問機関として発足し、事務局は気象庁が担当している。

地震防災対策強化地域判定会は6名の専門家で構成され、検討は結果がもたらす社会的な影響などに左右されず、純粋に科学的な立場で行い、判定結果を気象庁長官に報告する。また、気象庁は、毎月定例的に、判定会委員打ち合わせ会を開催している。この打ち合わせ会は、判定会委員、気象庁及び国土地理院等で構成され、東海地方及びその周辺の最近の観測データについて詳しい検討をしている。また、打ち合わせ会終了後には、気象庁から「最近の東海地域とその周辺の地震・地殻活動」が発表され、その時に判定会の立場から、委員が意見や見解を述べることになっている。

(5) その他

以上定期的に開催される委員会等を挙げたが、それ以外にも災害時に国土交通省及び国土地理院に設置される各種会議にも資料を提供している。また、国土地理院のホームページ（<http://www.gsi.go.jp/>）で一般に公開している。

3. 2. 2 委員会等のための資料作成

各種委員会等に提供する資料は、一部を除き院内の資料検討会を経て提供される。例として地震調査委員会の本会議までの流れを紹介する。

はじめに、地震調査委員会の共同庶務を担当している測地観測センターの事務局（地震調査官、専門調査官、地殻監視課長補佐及び地殻監視第二係長）で前月の地震情報、GEONETによる地殻変動情報等を基に提出資料の素案を作成し、それに基づいて資料を作成する。同資料は地震調査委員会会長及び事務局（文部科学省）、共同庶務（国土地理院、気象庁）の担当者で構成する庶務会議に提出され、ここで資料内容の検討が行われ、必要に応じて追加資料が決まる。この結果を受けて、院内資料検討会（表-8）を開催し、国土地理院が提出する資料の内容検討が行われ、最終的な提出資料が確定される。確定した提出資料に基づいて資料が作成され、地震調査委員会に提出される。

資料の作成は一部を除き最新のデータで行われるため、庶務会議及び地震調査委員会の前日に集中して行われる。また、大きな地震発生後に開催される臨時会では、緊急解析結果による資料を3時間毎に作成し提出している。

なお、データのグラフ化に使用しているプログラムは当院職員の山口和典が開発（文部科学大臣賞受賞 2003年4月）したプログラムをおもに使用している。

提出資料の例として12月10日に開催された第121回地震調査委員会の国土地理院資料の目次を表-9に、地震調査委員会に関する作業フローを図-44に示す。

表-8 地震調査委員会院内資料検討会のメンバー

- | |
|-------------------|
| ○企画部 |
| ①防災企画官 |
| ○地理地殻活動研究センター |
| ②センター長（地震調査委員会委員） |
| ③統括研究官、④研究管理課長 |
| ⑤地殻変動解析室長 |
| ○測地観測センター |
| ⑥センター長⑦衛星測地課長 |
| ⑧地殻監視課長、⑨電子基準点係長 |
| ⑩地震調査官（事務局） |
| ⑪専門調査官（事務局） |
| ⑫地殻監視課長補佐（事務局） |
| ⑬地殻監視第2係長（事務局） |