
巻頭言 災害の予知と防災対策 東京大学社会情報研究所 廣井 脩 1

小特集 災害の予知と防災

GEONET がとらえた日本列島の地殻変動 今給黎哲郎 2

富士山の噴火予知と防災対策 荒牧重雄 7

洪水ハザードマップの現状と今後 赤桐毅一 13

近づく東海地震の監視体制の現状と
前兆検知手法 溝上 恵 20

災害の予知と防災対策

東京大学社会情報研究所 廣井 脩

筆者が、自然災害の調査研究をはじめた1970年代中頃は、ちょうど大規模地震対策特別措置法が施行された時期と重なっている。東海地域に一定規模を超える異常現象が観測されたとき、気象庁内に判定会が招集され、その異常が東海地震の前兆と判断されれば、所定の手続きを経て、内閣総理大臣によって警戒宣言が発令されることになった。地震予知が法制化された唯一のケースであるが、警戒宣言がもし適切に発令され、その情報が迅速に自治体や住民に伝達されるなら、津波危険地域や山崩れ・がけ崩れ危険地域の住民を事前避難させることが可能になるため、絶大な防災効果が期待される。一方、警戒宣言は人々の生命にかかわる重大な情報であるから、場合によっては大きな社会的混乱を招く事態も考えられる。防災効果を高めつつ社会的混乱を極小にするには、いったいどのような対策が必要なのか。筆者が災害予知と防災対策について関心をもったきっかけである。

その後、1998年には、判定会招集や警戒宣言にいたる前に発表する「東海地震関連情報」として、解説情報と観測情報が新設され、2002年には東海地震の地震防災強化地域も大きく拡大したため、現在では、一定レベルの地殻変動に基づいて発表されるタイプの観測情報を、自治体や住民の防災対策にいかんにか活用するかが課題になっている。東海地震の予知・予測情報を防災対策に関連づけようという試みが、新しい局面に入ったといえよう。

風水害については、1982年7月23日に起こった長崎水害が印象深い。

長崎水害が発生した当日午後5時前、長崎海洋気象台は大雨・洪水警報を発表した。しかし、その10日前あたりから警報が4回も発表され、しかも被害はほとんどなかったことから、自治体も住民も警報慣れの心理が働き、その数時間後に大災害が発生するとは夢にも思わなかった。このとき警報を発表した予報官は、ひょっとしたら記録的な豪雨になるかもしれないと予想していたということだが、その予報官の危機意識が受け手に伝わらず、たいした事態にならないと考えてしまったのである。その後、気象警報について、警報の対象地域が広すぎて予想どおりに大雨が降らない地域が多いから、結果として狼少年になってしまうという指摘があり、気象庁は気象警報の地域細分化に着手することになった。しかし、津波警報には津波と大津波と

いう二つの呼称があるように、気象災害でも、予報担当者が特大の災害が発生するのではないかと懸念するとき、通常の警報でなく、スーパー警報を出したらどうかという指摘はいまだに実現していない。長崎水害後、気象庁は記録的短時間大雨情報を新設したり、警報の切り替えを多用したり、同様の気象現象で過去にどんな災害が起こったかという過去事例についての情報を加えたり、土壌雨量指数を導入したりして対応しているが、自治体や市民の危機意識と防災行動を誘発するにはいま一步の感があり、スーパー警報の導入は今後の大きな課題である。

最後に、津波警報について。長崎水害の翌年、1983年5月、日本海中部地震が発生した。このとき、仙台管区気象台は地震の14分後に津波警報を発表したが、津波はもっとも早いところで地震の7分後に沿岸地帯に襲撃した。その後、気象庁は、津波警報の迅速な伝達に努力を傾け、10年後の93年7月の北海道南西沖地震では、地震の5分後に津波警報を出せるまでになった。しかし皮肉なことに、同じ地震5分後に北海道奥尻町に大津波が押し寄せたため、甚大な被害が生じてしまった。北海道南西沖地震は、津波のように分秒を争って避難しなければならない災害は、警報の発表を待ってから対応したのでは間に合わないこともある、という辛い教訓を残した。その後も、気象庁は津波警報の迅速化に努力し、現在では地震の3分後に発表できる状況になっている。また、1999年4月から、津波予報区を従来の18から66に細分化し、また津波予報文に加えて、たとえば大津波の場合、3m、4m、6m、8m、10m以上などと、予想される津波の高さを発表する「量的津波予報」業務を開始した。

おそらく、今後も災害の予知は急速に進むであろう。しかし、災害の予知を防災対策に結びつけるのは、予知の正確性だけでなく、予知情報の適切性も必要である。予知の正確性は主に理学の問題であるが、適切性とは、いかに迅速に多くの人にその情報を伝えるかとか、情報を受け取った自治体や住民が内容を理解し、適切な行動をとってくれるかに関わっており、情報システムや情報のわかりやすさと大きな関係がある。その意味で、工学や社会学の問題といえよう。予知を防災に結びつけるためには、学際的な連携が必要だということである。

GEONET がとらえた日本列島の地殻変動

いまきいれ てつろろ
今給黎哲郎*

はじめに

国土地理院では、現在全国に 1200 点の電子基準点(GPS 連続観測点)を配置した GEONET (GPS Earth Observing NETwork) を運用し、GPS 観測データを常時収集している。電子基準点はその名のとおりに「基準点」として測定の基準となる役割も果たしているが、本稿ではもう一つの重要な役割である地殻変動監視と、2000 年度に発生した噴火・地震等の際の地殻変動観測、そして最近注目をあつめている非定常的な地殻変動である東海地方におけるスロースリップイベントについて紹介する。

1. GEONET の概要

GEONET は全国に展開された観測点である電子基準点と国土地理院(つくば)にありデータの解析を行う中央局、そしてこれを結ぶ通信設備・回線から構成されている。

現在全国に展開されている電子基準点は 1200 点で、地域ごとに多少のばらつきはあるものの平均約 20 km 間隔で配置されている。現在の配置状況については図 1 に示すようなものである。右側に挿入されている部分図は、小笠原諸島の父島、母島、硫黄島(上)と南鳥島(下)を表示している。左上の部分図で示している南西諸島では最西端の与那国島、最南端の波照間島にも設置されている。また、富士山頂にも電子基準点が昨年新設された。

国土地理院の電子基準点は、当初から地殻変動を監視するために設置されたものであったため、かなり堅牢な構造をしている。深さ 2 m のコンクリート基礎に高さ 5 m のステンレススチール製ピラーを立て、頂部にアンテナ、ピラー内部に受信機と通信用機器を組み込んでいる。また、GPS 以外の測定の際にも基準点として使うことができる

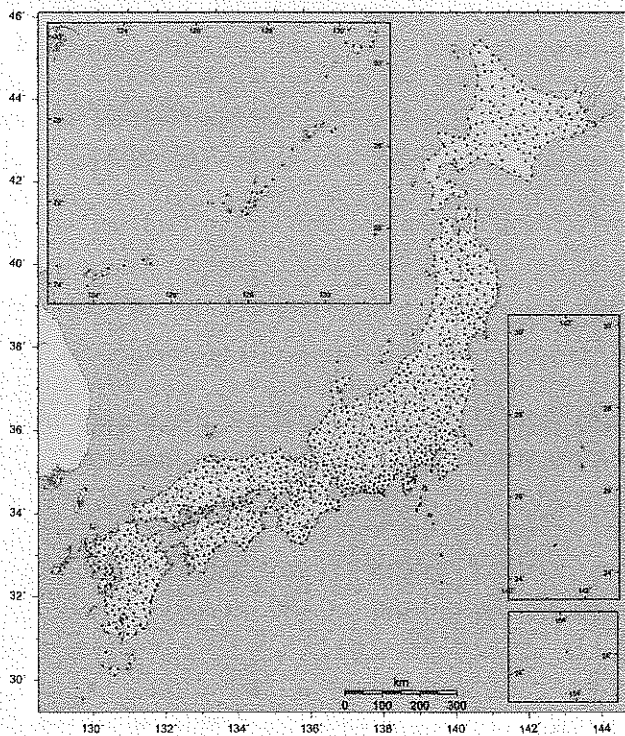


図 1 電子基準点の配置図

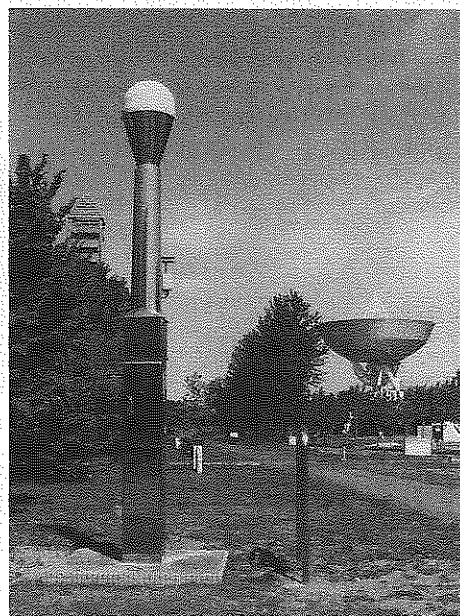


写真 1 国土地理院構内(つくば市)にある電子基準点

* 国土交通省 国土地理院 地理地殻活動研究センター 地殻変動研究室長

ように、基礎部分に金属標が設置されている(写真1参照)。

電子基準点に設置された受信機は、毎秒GPS衛星からの信号を受信している。これらのデータはリアルタイムでIP/VPN (Internet Protocol Virtual Personal Network) 回線による常時接続で国土地理院本院に設置されている中央局に転送される。なお、1200点の内、富士山頂や南鳥島、硫黄島など回線が引けず衛星電話によるデータ転送を行う11観測点ではリアルタイムにデータを転送することができないため、3時間ごとにデータの回収が行われる。

中央局ではデータのアーカイブと解析を行う。通常の運用では1) 6時間分のデータを3時間おきに解析、2) 24時間分のデータを毎日解析することを行う。従来はネットワーク全体に対しては1日1回の解析で、地震や噴火などに関連して30点程度の小さなネットワークについて6時間あるいは3時間ごとの「緊急解析」を行ってきたが、この新しいシステムによって地殻の変動をより短い時間で検出できることが期待される。また、最終的な結果として精密衛星情報 (IGS 精密暦) による位置計算をデータ取得後2週間程度までに行う。これにも24時間分のデータが用いられる。

このような解析により、各電子基準点の座標値が毎日定められる。このデータは、地殻変動の監視のために見やすい形でモニタ上に表示あるいはプリンタから出力することができる。たとえば、地震活動が起きている地域周辺における基準点間の距離を時系列表示したり、全国の電子基準点の1年間における水平変動の様子を表示することもできる。このように出力された資料は、政府の地震調査委員会に提出されて日本列島の地殻活動を評価するうえで基礎的データとして扱われているほか、地震予知連絡会、火山噴火予知連絡会などの専門家の会合でもイベント等に関連し

て地殻の活動を検討するうえで重要視されている。

2. GEONET による地殻変動観測成果

GEONETによる観測成果の代表的なものとして、日本列島の定常的な水平変動があげられる。国土地理院では明治以来、三角点で繰り返し測量を行うことにより、その座標の変動を追跡し、日本列島の長期的な水平変動を明らかにしてきた。この成果は、「日本の地殻水平歪」として報告され、プレート運動に伴う地殻変動の基礎的な情報と見なされていた(国土地理院, 1997)。しかし、これらのデータは100年間のデータの積み重ねによるものであり、近年、光波測距儀やGPSの観測が行われるようになって、せいぜいその繰り返し周期である5~10年の間隔で変動の全体的な傾向を見るだけの時間分解能しかなかった。一方GEONETの観測では、各電子基準点について毎日の座標が与えられるため、1日の観測値の精度は1~2cmとしても、数日~十数日分のデータを集計することで、より信頼性の高い変動ベクトルを出すことが可能となり、わずか1年の観測でも、日本列島全体の水平変動パターンがきわめて明瞭に見て取れるようになった。この観測結果から定常的な日本列島の地殻変動として、太平洋プレートの沈み込みによる東北日本の東西圧縮やフィリピン海プレートの沈み込みによる駿河湾から四国にかけての海岸沿いの北西方向への変動、アムールプレートの運動と見られる中国・近畿北部の東向きの変動、そして新潟から神戸にかけての圧縮歪みの集中帯などが明瞭に確認された。図2は、定常的な状態を示すと考えられる1999年4月から2000年4月の中部日本の水平地殻変動パターンである。

この定常的な変動から、東海地域におけるプレートの固

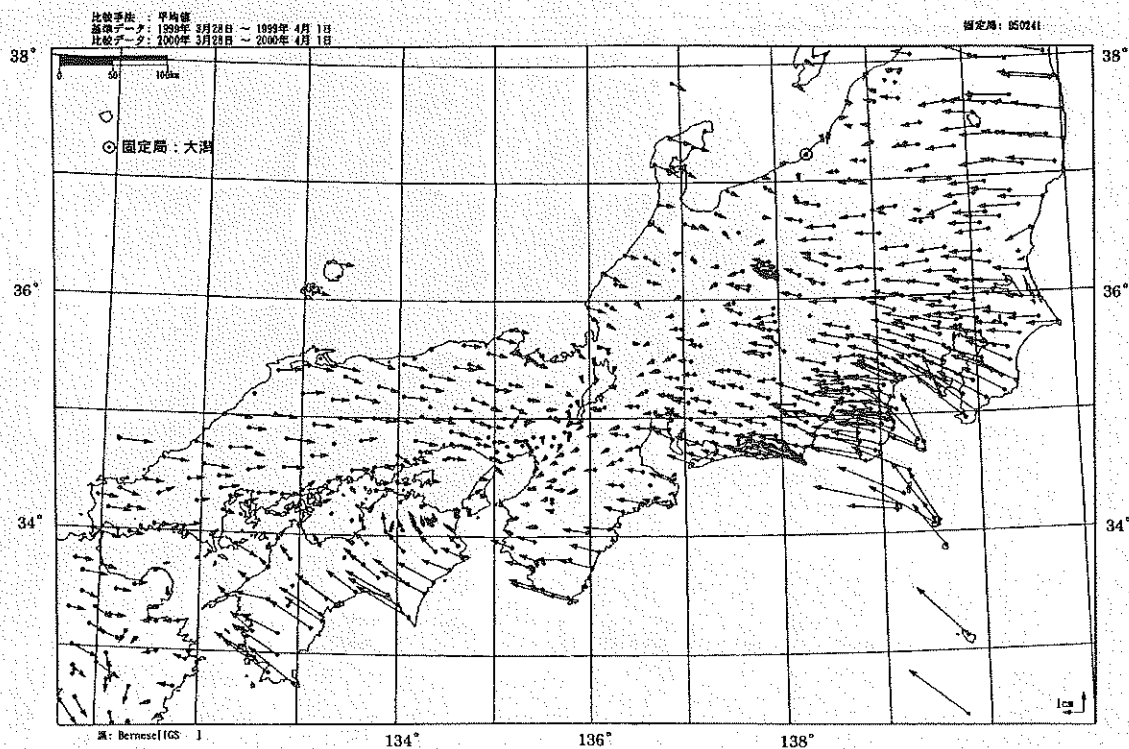


図2 日本列島の定常的な地殻変動 (固定点: 新潟県大潟)

着状態を推定したものが、図3である。沈み込むフィリピン海プレートの上面は、陸側のプレートの下面と固着して陸側プレートを北西方向に引きずっているが、それが地表面でGPS観測点の変位として観測されていると考えて、プレート境界の固着状況を推定することができる。

図3において、色の濃いところがプレートの固着度が高い領域で、このような領域が大地震の際に破壊するアスペリティであると考えられている。この図から、固着域が従来想定されていた駿河湾内のアスペリティよりさらに西側にも広がっていることが推定され、これは中央防災会議が2001年に行った東海地震の想定震源域を西側へ拡大するという決定に影響している(図4)。

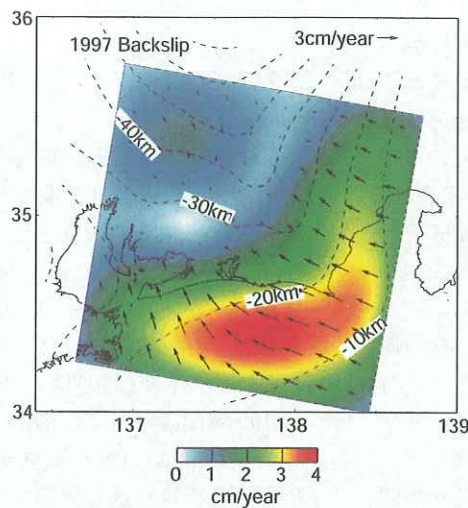


図3 東海地方におけるプレート固着状況の推定図

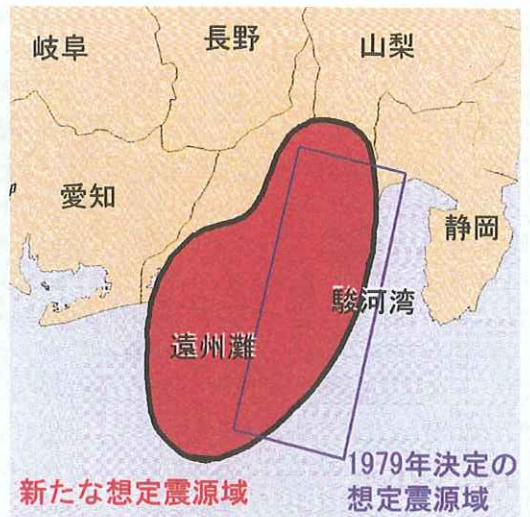


図4 東海地震想定震源域(新旧)

3. 2000年度に多発したイベントについて

西暦2000年は、世紀末にふさわしく日本列島を次々と地変が襲った。まず、3月末から有珠山が23年ぶりに噴火した。火山性の地震が活発化したため、国土院でも緊急解析体制に入り、有珠山を取り囲む虹田・壮警・伊達の3観測点のデータから、山体が膨張していることが確認され、

緊急火山情報が出されるに至る一つの理由となった。また、噴火の直前には、膨張がわずかに収縮に転じたが、これはマグマが浅いところまで移動したことを意味すると考えられた。さらに噴火後の観測では山体が収縮していく様子も追跡することができた。

有珠山の活動が小康状態になったのも束の間、6月末には三宅島で噴火が始まった。こちらでも火山性の地震が活発化し始めたため、緊急観測体制に入り、やはり島内4点の観測結果から山体の膨張を確認した。そして膨張が収縮に転じた直後、島の西方沖で海底噴火が発生した。この時期には島の西側にある阿古の観測点で大きな沈降が観測されマグマの貫入に伴う開口割れ目の形成が推測された。その後、地震活動の中心は三宅島から北西方向に移動し、神

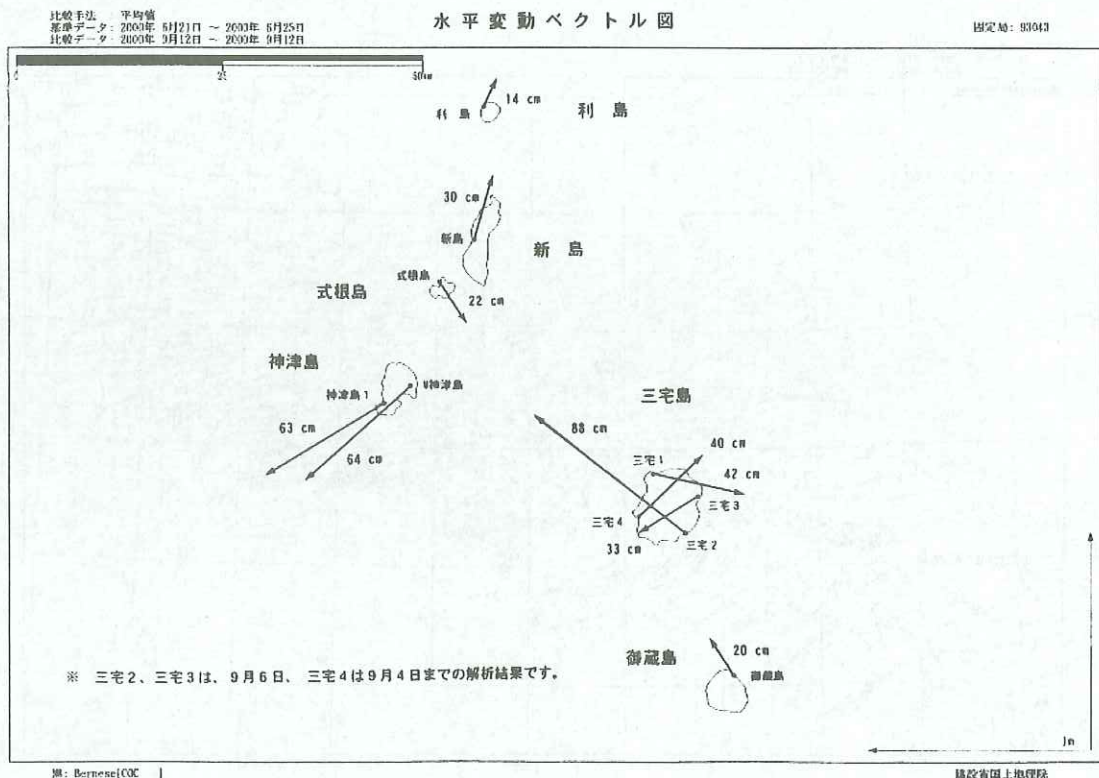


図5 2000年三宅島活動開始以降約2カ月間の水平変動

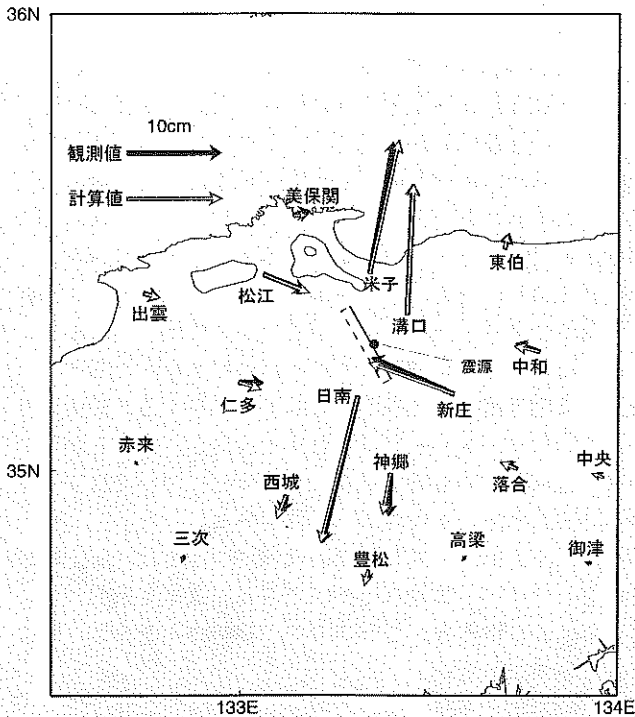


図6 鳥取県西部地震(2000.10.06)に伴う地殻変動と断層モデル

津島東方沖で7月1日に発生したM6.4の地震を皮切りとして、新島・神津島・三宅島の周辺でM6.0以上の地震が2カ月の間に5回も発生した。三宅島と神津島の間には、北西-南東方向の活発な地震活動の帯が形成され、地殻変動の観測からこの海域の地下でも開口割れ目が形成されていることが推定された。このイベントに伴う地殻変動は大規模で東海や南関東などかなりの遠方まで影響が及んだ。三宅島での活動開始から約2カ月間で、三宅島を南北に挟む基線で約1mの短縮が起き、一方神津島は南西に、式根島は南東に、新島は北北東に動いて、新島-神津島の間は1m近く広がった。また、神津島は20cm程度隆起したことが観測された。GPS観測が始まって以来最大級の地殻変動がここで観測されたのである(図5)。

三宅島の収縮・新島-神津島間の拡大は、次第に鈍化しながらも1年以上継続し、ようやく最近では活動開始以前の状態にほぼ戻っている。

火山に関連するこれらの活動の後、2000年10月6日には中国地方において鳥取県西部地震(M7.3)が発生した。この地震は内陸の浅い地震であり、左横ずれの断層が動いたものと推定されている。震央に近い鳥取県の溝口、日南の観測点では約15cmの水平変動が確認された。GPSによる地殻変動観測から推定されるモデルは、周辺の観測点における変動を非常によい一致で再現している(図6)。この断層モデルは、地震観測の結果ともよく整合している。この地震については、地震後余効的な変動が数日間続いたことが観測されている。

2000年度最後の大きな地学的イベントとして、2001年3月24日に発生した芸予地震(M6.7)があげられる。震源が深さ約50kmと深かったために地殻変動としてはそれほど大きな変化は捉えられなかったが、それでも震央周辺では2cm程度の水平変動が確認された。

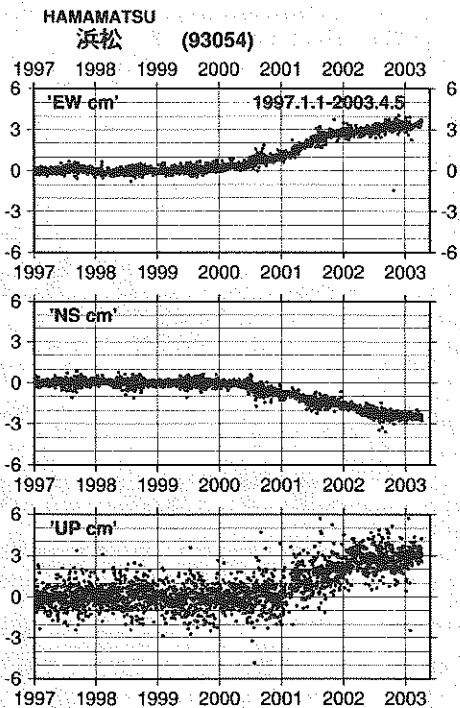


図7 浜松観測点の非定常地殻変動時系列

4. 東海スロースリップ

東海地方においては、三宅島・神津島周辺の活動の影響により、2000年7月以降定常的な変動パターンとは異なる地殻変動が観測されていたが、伊豆諸島における活動が次第に沈静化していったにもかかわらず、東海地方西部において定常状態と異なる地殻変動が進行していることが判明した。そしてGPSデータを詳細に解析することにより、2001年初頭頃から東海地方において通常の変動と異なる異常地殻変動が進行していることが確認された。

この変動は、定常状態で見られた駿河湾から遠州灘沿いの西北西向きの水平変動が、西南西方向に振れたまま継続していることがまず地殻変動監視の担当者の注意を引き、定常的な状態からのずれを図化することで、非定常的な変動を取り出すことに成功したものである。

定常的な状態の観測データとしては、1998~1999年の2年間分のデータを用い、各観測点が固定点(この解析では新潟県大潟)に対してどのように変動したかの時系列データを用いた。この2年間における変動を、時間に比例する直線成分(トレンド)と、1年周期の年周変動に分けて推定した。このトレンドと年周成分を2000年以降の変動から差し引くことで、定常的な状態からの外れ、すなわち非定常的な地殻変動を抽出した。時系列データでこの非定常成分の推移を示したものが図7である。

この時系列では、定常的な変動が続いていればグラフは水平になるが、2000年半ばから東西・南北・上下の全ての成分で定常的な状態からのずれが確認できる。このグラフから非定常的な成分は東、南、上方向であることがわかる。この水平変動の方向はフィリピン海プレートの沈み込む方向とちょうど反対向きであり、プレート間の固着状態がゆるんでいる状況を示していると考えられる。この非定

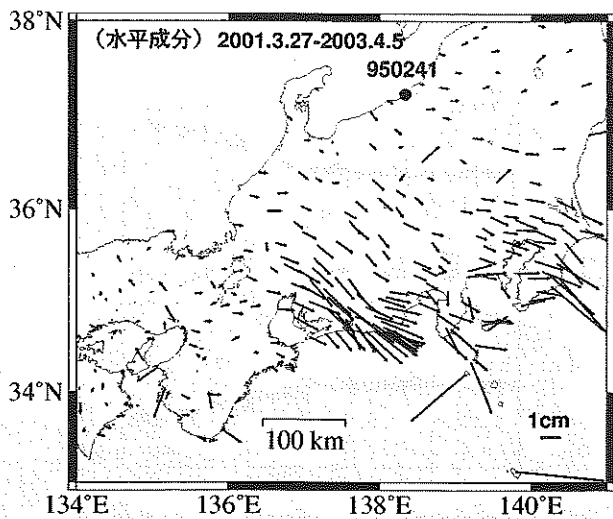


図8 非正常水平地殻変動の分布 (約2年分の総量)

常変動が空間的にどのように分布しているかを示したものが図8である。非正常地殻変動の総量は、2年間で最大3 cm程度である。

この時期、この領域では特に目立った地震活動もなく、この非正常的地殻変動は、地震動を伴わないプレート間のすべり、スロースリップであることが推定された。なお、スロースリップは「ぬるぬる地震」「Silent Earthquake」などと表現されることもある現象で、顕著な地震動を伴わずにゆっくりとプレート境界などが滑るものである。理論的にはそのような現象が存在することが推定されていたが、1996年5月にGPS連続観測で確認されたのが実際の観測にかかった最初の例である。1997年には豊後水道で数カ月～1年かけて2 cm程度変動した事例は継続時間がより長かったが、今回の東海スロースリップは開始以来2年が経過し、観測史上最も長いスロースリップとなっている。

この2年を超えるスロースリップの経過においては、変

動の中心が初期の浜名湖周辺から北東方向の袋井周辺に移ったことが確認されている。上下変動で見ても、隆起の中心が浜名湖周辺から北東方向に移動したことが見られる。

これらの観測結果から、プレート境界におけるすべりを推定できるが、すべりの中心は東海地震の想定震源域の西側にとどまっており、スロースリップが次第に発展して東海地震のアスペリティの破壊に至るという懸念は遠ざかったと言えよう。一方、想定震源域の外側とは言っても隣接する領域でスロースリップによるひずみの解放が起きたことは、それだけ想定震源域にひずみの集中をもたらすことから、東海地震の発生を促す方向の寄与をすると想像される。このスロースリップはそれまで観測されたことがない規模・継続時間のものであり、その意味についてはいろいろな角度から検討する必要がある。

なお、東海スロースリップの現況については、国土地理院のウェブサイトで見ることができる。ほぼ1週間ごとに新しい情報に更新されているので、興味のある方はご覧になっていただきたい。

5. リアルタイム監視への道

2003年度から、1200点の電子基準点の大部分がリアルタイムデータを取得できるようになるため、これまで「緊急解析」としてごく一部で行ってきた3時間ごとの解析がほぼ全点で行えるようになる。数cmの精度でよいなら、リアルタイムキネマティック解析により、時々刻々の変動も監視可能となり、たとえば火山活動に関連した急速な変化などを追跡できることが期待される。国土地理院では、電子基準点による地殻変動監視をより充実させることで、地震・火山に関連した防災・減災のために有効な情報をこれからも発信していきたいと考えている。

富士山の噴火予知と防災対策

あら まき しげ お
荒 牧 重 雄*

編集部から、表記のような題をいただいたが、噴火予知については私自身これまであまり専門としてこなかった分野であり、大して参考になる意見を申し上げることはできない。しかし、「火山噴火の予知はかなりの程度にまで近い将来可能になるのではないか……」というのが業界でのコンセンサスになりつつある現在、きわめて興味ある問題であるので、私見を述べさせていただく。防災対策については、現在私自身が関与している、富士山の防災マップ作りを中心としてご説明したい。

1. 火山噴火は予知できるか？

ふた昔前までは、「地震や火山噴火を予報することはできない」というのが、常識で健全(?)な意見であったと思う。だからといって、予知に関する研究が無意味だということでは無論ない。多くの先輩たちが営々として地道な研究をつづけてきたのを横目で見ながら、自分自身は予知学以外の火山研究をしてきた一人である。

最近では、この傾向が明らかに変わってきた。火山噴火以前に、何らかの前兆現象がとらえられるケースが少なくないのである。伊豆大島(1986年)、手石海丘(伊東沖)(1989年)、雲仙普賢岳(1990年)、そして有珠、三宅島(ともに2000年)の噴火はいずれも数カ月~2、3日前から前兆が観測された。1977年の有珠噴火の前兆地震はわずか32時間前から始まった。前兆の多くは各種の火山性地震の多発であり、時には山体膨張・隆起、地電磁気異常、地熱・地下水異常などが認められた。現在、火山研究者間でのコンセンサスは、「前兆が見られることが圧倒的に多い。しかし、確実な噴火予報は未だできない」というようなものである。

私が学生として火山学の研究を志した半世紀前とは、格段の差違である。最近の兵庫県南部地震の予知不成功と有珠噴火の予知成功の事例などから、一般市民の認識も、「地震は予知が困難。火山噴火の予知は可能」という認識が生まれてきそうな気配を感じる。

しかし、ことはそう簡単ではない。伊豆大島1986年の噴

火では、カルデラ壁を横切った大噴火は全く予測できなかったし、三宅島1983年の噴火はほとんど不意打ちであり、同じ火山の2000年の噴火の推移を火山研究者は予測できず、不満足な避難対策が顕著であった。1998年に始まった岩手火山の火山性地震群発、山体膨張、地熱異常は極めて顕著であり、ほとんどの火山研究者は何時噴火が起きても不思議ではないと考えた。防災担当者は、気象庁や火山研究者の助言を受け入れて、迅速に防災対策を実施したが、噴火は起きなかった。以後4年間経過した現在、活動は徐々に収まりつつあり、恐らく噴火は起きずに、異変は終息するであろう。典型的な「空振り予報」といわれても反論できない。

現状は次のように要約できるのかも知れない。「市民の日常生活に役立つような具合に(正確に、場所も限定して)火山の噴火を予報することは未だできない。しかし、種々の前兆現象をとらえて、不確実な、あいまいな予報ができることがある」。天気予報のように、「明日の正午から午後6時までに間に、〇〇地域で1mm以上の雨が降る確率は30%である」というような予報はできない。しかし、「2、3カ月前から異常現象が起きつつあり、もしかしたら噴火につながるのかも知れない…」というような情報を提供することは、少なからぬ事例で可能のように見えるのである。このようなあいまい予報でも、たとえば、防災担当者(とくに意思決定者)にとっては、有用な情報となりうる。だめで元々…という認識のもとで、災害への準備を強化するのは十分に意味があることである。

火山の噴火予知の現状は、このようなものであると私は考える。手前味噌だが、このことは大変な進歩である。過去数十年にわたる、地道な基礎研究の積み重ねと、近年の技術躍進(地震計、GPSなど測器の精度や信頼性の向上、単価の下落、テレメータ技術、コンピュータ・ネットワークの進歩など)が複合して、一つの山を越えつつあると感じる。これからの楽しみである。

2. 富士山ハザードマップ検討委員会

2000年10月から11月と2001年5月の2回、富士山直下で「低周波地震」が群発した。火山性の低周波地震の実

* 富士山ハザードマップ検討委員会委員長

体はまだ解明されていないのだが、経験的には、マグマの活動に関係が深いらしいというのが、火山研究者の間のコンセンサスである。これがマスコミの知るところとなって、騒ぎが大きくなった。このころはまだ、有珠山と三宅島の噴火が進行中であり、雲仙普賢岳の災害などの記憶も新しく、富士山周辺の自治体の関係者各位も、この際前向きに富士山噴火の防災他作を考えるべきであるとの意見を持たれるようになった。

国(担当は内閣府)もこれを受けて、県知事、市町村長、国務大臣レベルの「富士山火山防災協議会」を2000年7月に発足させ、同時に作られた「富士山ハザードマップ検討委員会」に諮問を行った。「ハザードマップ」を作ることが委員会の主要な仕事であることはたしかであるが、さらに自治体が策定すべき「地域防災計画」の内容についての実質的な検討をも含んでいる。

なお、「ハザード」という語は、火山活動によって発生する物理的な破壊作用に限られ、人命の喪失や、経済的な損害まで含める「リスク」という語とは、厳密には区別される。そこで、検討委員会の最終報告書では、「ハザードマップ」の代わりに「防災マップ」と表記することにしている。

検討委員会は現在も作業中であり、予定より遅れているが、今年(2003年)秋をめどの最終報告書を「富士山火山防災協議会」へ提出する予定である。

3. 富士火山災害の特性

富士山は日本国を象徴するような火山であることは一般に認められているが、それは必ずしも日本の代表的、平均的な火山を意味するものではない。富士山は数ある日本の火山の中で最も標高が高く、最も体積が大きい火山である。これは富士山が決して平均的な規模でなく、突出して大きな火山であることを意味する。噴出するマグマは、いわゆる玄武岩質の組成を持ち、安山岩質のマグマが圧倒的に多い日本の火山の中では異色である。さらに過去の噴出物を調べると、火山灰の生産量が顕著に多いが、これは玄武岩質のマグマには通常見られない特徴である。このように、火山学的に言えば富士山は、日本列島ではむしろ特殊な、際だって大型の火山であると言うことになる。

なぜ、そのような特徴を富士山が示すのかは、火山学的に見ても重要で興味ある問題であるが、実際のところあまり明快な説明がなされていないのが現状である。富士山はユーラシア、北米、フィリピン海、太平洋の各プレートが角を接しあってひしめいている会合点の近くに位置しているのが特徴であり、火山の特異性もプレートテクトニクス上の特異性と密接に関係していると思われる。事実としてはっきりしているのは、古富士・新富士の活動期10万年間を通じて、マグマの噴出率がきわめて大きかった(>2 km³/千年)…すなわち噴火活動度が抜群に高かったと言うことである。このことは、将来も富士山で噴火災害が頻繁に起きることが予想されることを意味する。

最近1万年間は、新富士火山の活動期であるが、さらに5期に分けられる。第1期(10000~8000年前)は特にマグ

マ噴出率が高く、大規模な溶岩流を多く流出した。富士山の最近6000年間の山体成長曲線を調べると、その内最近約2200年間は、それより前と比べて異なった傾斜を示すのがわかる。ちょうどこの時期は山頂噴火が起きていない時期に相当し、第5期と呼ばれる。富士山の将来の噴火を予測するには、最も近い過去の実績を重視するのが合理的であるから、最近約2200年間の実績を最も重要視し、次に過去3200年までさかのぼった実績を考慮することとした。

最近2200年間の噴火活動は、山腹割れ目火口群からの小規模のスコリア・火山灰噴出と溶岩流出のケースが最も多い。約1500年前頃、北側斜面から火砕流が発生し、高度1100m地点まで到達した。最も新しい噴火は、西暦1707年(宝永4年)に発生した、南東斜面5合目付近に生じた大火口から大量のスコリアを空高く放出する噴火であった。成層圏まで達したスコリアは偏西風に乘せられて江戸まで達し、須走村で2mくらい、横浜で20cm、江戸でも南部は最大5cmの厚さに積もった。火口に近いところでは建物が潰れ、遠いところでも灰砂の除去に手間取って、多くの亡村、飢餓難民、さらに土石流・洪水の大災害が発生した。

もう少しさかのぼって、富士山の第4活動期、約3200年前までに注目すると、山頂火口からの大規模な溶岩噴泉を伴う火砕噴火や火砕流発生、山体崩壊による大規模な土石なだれなどの特徴的な活動が追加される。3200年前までの実績を考慮に入れれば、富士山で発現する火山災害のほとんどすべてのタイプを網羅することができると考えられる。

最近2200年間には少なくとも75回の噴火が知られているが、そのうちの87%は小規模噴火(噴出マグマの量が0.02 km³以下)である。単純計算では27年に1回噴火する頻度となり、しばしば噴火すると言われる有珠や三宅島火山の噴火頻度とほぼ同等である。すなわち富士山の将来の噴火はかなり頻度が高い確率で予想されねばならない。

4. 将来の宝永噴火は予知できるか?

ところが、ここで問題になるのが、1707年(宝永4年)の大規模噴火である。この噴火は新富士火山過去3200年間の内で知られている大規模噴火3例のうちの一つであり、巨大なプリニー式噴火をした点でも特異なケースである。しかもこの噴火の後には、300年もの間噴火が起らず、現在に至っている。言い換えれば、過去3200年間の活動史の中でも、無噴火という特異な300年間の状態が現在まで続いているのである。ある研究者は、宝永噴火以後は火山全体のシステムに大きな変化が起きたため、今後はそれ以前2900年間の活動とは異なった推移をたどるかも知れないと考え、別の研究者は今後も過去2900年間と同じような活動を続けるだろうと考える。とにかく両方の説ともに、具体的な証拠を欠いているので、確実な予想はできない。

いずれにせよ、宝永の噴火は史料や野外の地質学的な証拠も豊富に残存していて、噴火の条件や経緯を検証するのに適していることと、一般市民にも身近な記憶として残っていることなどから、将来の大規模噴火のシナリオとして

は適当であると考えられる。委員会の活動の一部として、史料や野外調査を補足的に行い、降下スコリア・火山灰の数値シミュレーションも数多く試してみた。

また、現在の高度に発達した都市環境で、宝永噴火と同様な噴火が起きたらどのような被害が想定されるかという、算定をも試みた。最も条件の悪い、梅雨期のケースでは、経済的な損失は2兆5千億円にもものぼることがわかった。阪神・淡路大震災の場合の経済損失は約11兆円であるとの記述をどこかで読んだ記憶があるが、死者は1名も想定されなかった、宝永相当の富士山噴火でこの程度の額の被害が出るということは、やはり現代の日本社会に与えるショックは相当に大きなものであるといえるだろう。

富士山のこのような大規模噴火を予測することは可能であろうか？ 検討委員会に協力して、気象庁噴火予知連絡会内に設置された「富士山ワーキンググループ」が主体となって、予測の可能性が検討された。その結果、「可能である」との結論が出た。宝永噴火の際には、1カ月以上も前から火山性と思われる地震が発生しており、十数日前からは有感地震の数が急増した。地震の強度と頻度は噴火の前日からさらに増大した。結局0.7 km³のマグマが噴出したわ

けで、地下にはその何倍ものマグマが急速に岩脈として貫入したはずである。適当なモデルを想定すると、噴火の前日までは、傾斜変動などの地殻変動も確実にキャッチされ、緊急火山情報の発令が可能であるとの結論に達したのである。

将来の仮想的な噴火について、緊急火山情報の発令が定量的に予想されたのは画期的なことであった。もちろん、それより緊急度の低い臨時火山情報の発令も、適時行われるわけである。

5. 将来の噴火の可能性マップ

検討委員会は、新富士火山の過去3200年間の噴火活動に基づいて、将来起きる噴火の可能性について評価を行った。図1は既存の火口の位置を示したもので、噴火の規模を小規模(噴出したマグマの量が0.02 km³以下、黄色で示す)、中規模(同0.2~0.02 km³以下、緑色で示す)、大規模(同0.2 km³以上、赤色で示す)に分けて示した。火口の分布は明らかに北西-南東方向に偏っており、地殻上部に加わったこの方向の圧縮応力に応じて割れ目火口が生じやすいこ

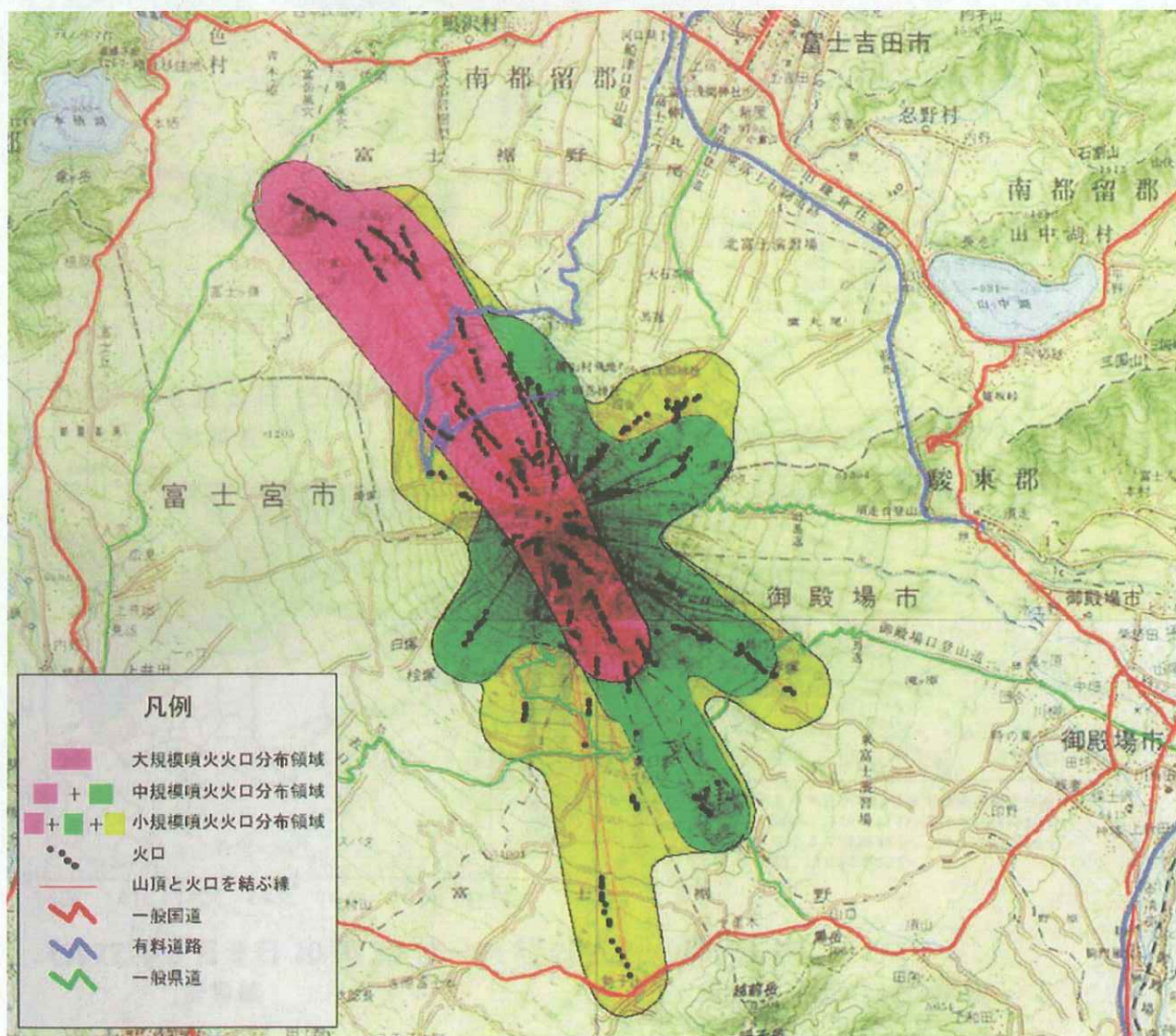


図1 過去3200年間の実績に基づいた火口形成の可能領域を示す図

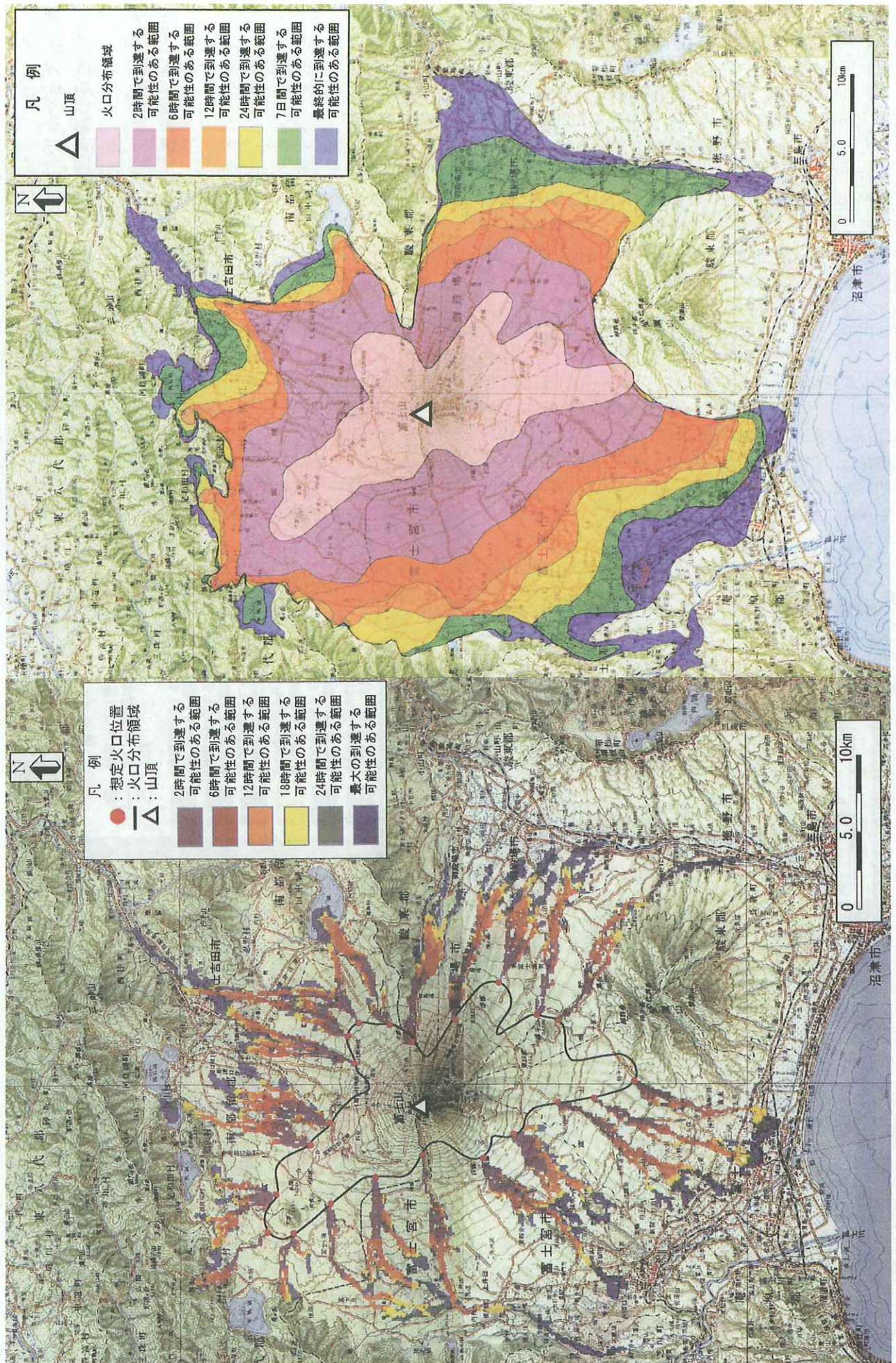


図3 小規模噴火による溶岩流のシミュレーションの例

図2 溶岩流の到達時間を示す可能性マップ。説明は本文を参照

とを示している。

一般論として、ハザードマップには、

- (1) 個々の特定された条件の下に起きる事象に限定して記述するマップ (例えば特定の地点から特定の噴出率、温度、マグマの種類、継続時間などで流出する溶岩流の予想マップ)
- (2) 当該地域で特定の期間内に発現するすべての事例を累積的に表現するマップ (例えば特定の期間内に任意の地点が溶岩流によって覆われる確率を示すマップ)

の2種類を想定することができる。

(1)のケースは、現象の物理モデルが知れていれば、数値シミュレーションにより決定論的に予想することが可能となる。現時点で数値シミュレーションが試みられている火山現象としては、溶岩流、噴石(投出岩塊)、プリニー式噴火による火砕物降下、土石流、火砕流、ガス拡散などがある。個々のシミュレーションによって描かれた分布図は、検討委員会では「ドリルマップ」と呼んでいる。

(2)のケースは確率論的なアプローチが必要であるが、火山活動のように過去の事例数が多くない場合は極めて困難な作業となる。本委員会では「可能性マップ」とも呼ばれている。

図2は(1)と(2)を折衷した様なマップであるが、溶岩流が流出してからどのくらいの時間で現地に到達するかを、危険度の高い側(安全度を大きくとった側)に限って表現した図である。この図を作成する手順は次のとおりである。

まず、小規模噴火の場合に限って考察すると、図3のように、小規模噴火の場合の火口分布範囲(黄色の範囲)の最外側の任意の地点から溶岩が流出したと仮定し、数値シミュレーションを行う。任意の噴出地点は図3では赤点で示してある。全部で22個の例について計算した。それぞれのシミュレーションについて溶岩の到達時間を色分けで示した。

同様なシミュレーションを中規模噴火の火口範囲の最外側に複数の火口を設定して計算する。さらに大規模噴火についても同様の計算を行う。こうして全体で52個の例について計算した。これらを全部重ねて到達時間が最も外側に来る地点をつなげて線を引いたのが図2である。この図は、富士山で噴火が始まると、任意の地点に最短で何時間以内に溶岩流が到達する可能性があるかを示している。注意すべき点は、過去3200年間の実績を参考にはしているが、最悪の最も早く溶岩流が到達する場合だけを示したものであって、確率的な表現はなされていないという点である。しかし、防災・減災の観点からは、最も悪い条件のケースに注目し、最も安全度が高い対策を考えるという哲学は、ある意味では肯定されるべきであろう。

図2のような方法を使って、様々な噴火の加害現象について、危険な領域の範囲を設定することが原理的には可能である。図4はその例であり、火砕流の到達範囲、火口から投出される噴石の到達範囲、融雪時に発生する泥流の到達範囲および溶岩流が2時間以内に到達する範囲(図2から引用)が示されている。大ざっぱな表現をすれば、これらの範囲を示す図は住民などの避難をあらかじめ計画する場合に基準となりうるものである。

図2のような方法を使って、様々な噴火の加害現象について、危険な領域の範囲を設定することが原理的には可能である。図4はその例であり、火砕流の到達範囲、火口から投出される噴石の到達範囲、融雪時に発生する泥流の到達範囲および溶岩流が2時間以内に到達する範囲(図2から引用)が示されている。大ざっぱな表現をすれば、これらの範囲を示す図は住民などの避難をあらかじめ計画する場合に基準となりうるものである。

6. 富士山の火山防災マップ

最終的な富士山の防災マップの形態については未だ確定していないが、おおよその内容は議論がすすんでいる。本委員会が総力を挙げて作成する噴火による被害予測図は、総括的な範囲を示す図(上に述べたタイプ(2)の図、可能性マップ)の何枚かによって総括される。成果物として予定されるマップは次の3種類が

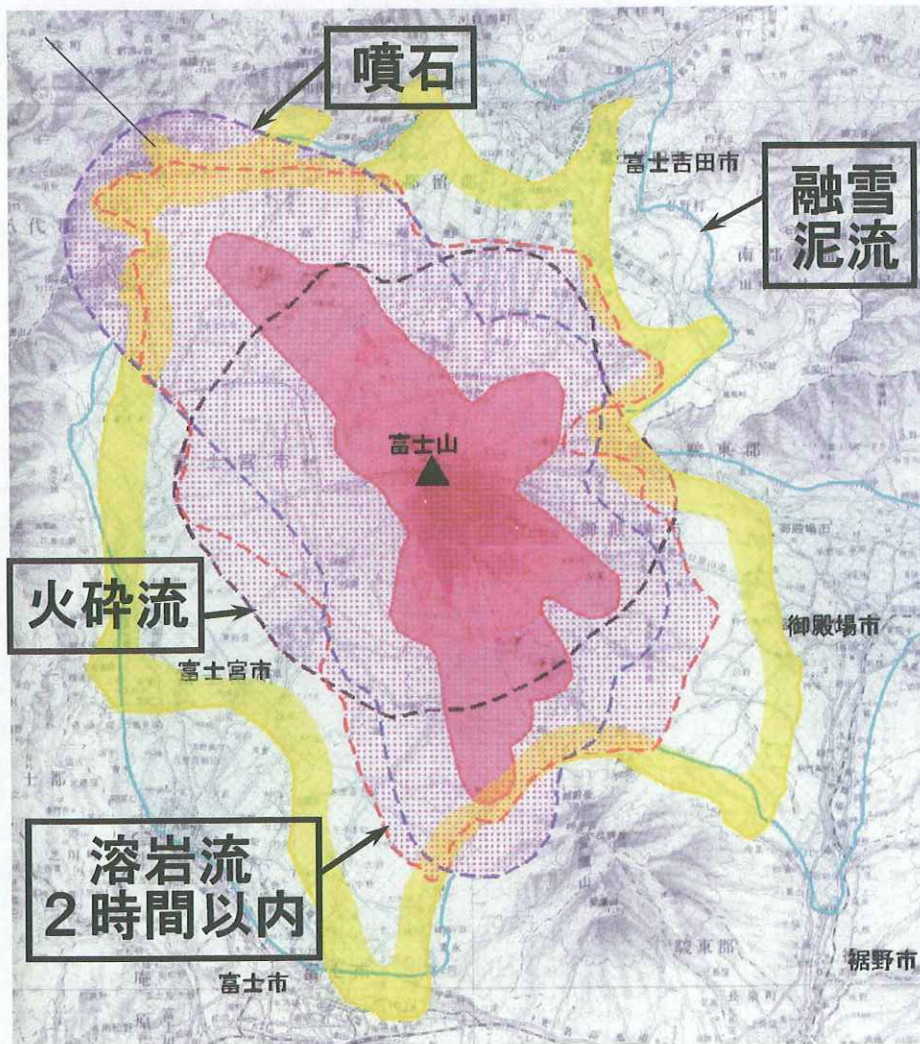


図4 溶岩流、火砕流、噴石、融雪時泥流などの危険区域を示す図

ある。

1. 一般配布用マップ：主に富士山の全域を1枚にまとめたものが多い。原案ではA1版サイズの表面をこれに当て、裏面には各地方自治体ごとに関連する地域を拡大してマップを示し、避難行動などに参考となる情報を示した図を掲げる。したがって、裏面の大部分は各市町村の防災担当が主体となって図を作成することになる。これに加えて、火山災害の種類や特徴、富士火山の活動史、火山情報の種類、防災上のヒントなどの囲み記事がちりばめられる。

2. 観光客用マップ：ハンドブックタイプを予定。

3. 防災業務用マップ：防災担当者が対策業務を遂行する際に役立つようなマップ。各火山現象などの可能性マップ各種、防災ドリルマップ各種、地域ごとに個別に、避難所、避難経路、医療機関、交通規制計画など、関連する多種類の情報を記載したマップ。

7. 富士山の火山防災対策

富士山ハザードマップ検討委員会の作業の中で相当の部分が、噴火災害の防止・減災対策を立案する努力に向けられている。この点では、これまで作られてきた他の火山のハザードマップとは顕著に異なっている。前に述べたとおり、富士山の噴火災害は、多都県にまたがる、広範囲で大規模なものになる可能性があり、市町村レベルにとどまらず、都道府県レベル、さらに国レベルでの視野をもって、高度の知識・技術の資産を動員して、基本に立ち戻って防災対策を策定する必要があるとの認識に基づいているからである。

委員会の終盤では、活用部会を中心として、富士山の火山防災対策の概要を研究議論して、広域防災計画や地域防災計画を立案する際にガイドラインとなりうるような資料、提言をまとめる作業が行われている。当然、既存の「防災基本計画・火山災害対策編」などに準拠して議論を進めるべきであるが、火山災害に特有の事情や状況をふまえて、かなり抜本的な案を作ろうという意欲を当事者は持って作業を進めておられるように強く感じられる。

8. 富士山火山防災対策策定の意義と今後の問題

富士火山はその高い活動度と巨大な山体のため、過去の噴火活動履歴も極めて多様な現象を網羅してきた。したがって、火山防災全般を展望するにも好都合な調査研究対象である。それと同時に、地政学的に重要な位置にあるため、規模の大きな災害が起きれば、現代の日本社会に深刻な影響を与え得る点でも重要な火山である。さらに、繰り返した述べたように、日本における火山ハザードマップ作成の動きが一巡した現時点において、火山防災の観点からハザードマップ作成の方法論を総括し、見直す時期に来ている点でも重要なケースとなっている。

幸い、関係者の深い理解と情熱に支えられて、きわめて質のよい富士山ハザードマップが作成される見通しが立っている。日本におけるハザードマップ作成史の際立ったベンチマークとなるであろう。しかし、防災対策そのものについての指針の作成ははじめての経験でもあり、未だ最終段階に達していないので、どの程度満足な成果が得られるかわからない。

最後に私個人の強い印象を申し述べたい。これまでに作成された日本の火山ハザードマップの大部分は、作成者がはっきりと意識していたかどうかは別として、結果的には一般住民（観光客を含めて）へ配布するためのマップであった。多くの専門家が努力を傾注して作成したため、学術的にはきわめて正しく、程度の高いマップが多いと思う。世界的に見てもそう思われる。

一方、災害現場を経験すると、本当に大切なのは現地の防災担当者が、適切な情報を適当な時期に受けることができるということがわかる。そのためには、防災業務用の各種マップおよびそれともなう参考資料、解説資料の充実が緊急課題である。この問題についてはまだまだ不満足な状態が現況であると思う。富士山防災マップの作成は、この問題へ大きく切り込んだ最初の試みである。今後の発展のために、礎の一つとなることを祈っている。

用語解説と地形図・読図法で綴る 新しい「図解 日本地形用語事典」

豊富な日本の地形を再認識できる

地形図のすべてがわかる項目設定/独学で「読図」できるように内容解説/断面図も併用し「頁読図」を援助/微地形や地下構造は写真で紹介/外来語は原語とスペルを加筆表記/地形形成の基礎なる地質現象も言及

B5判 250頁
定価3,200円+税
東洋書店
TEL. 03(3269)2961
FAX. 03(3269)2110

洪水ハザードマップの現状と今後

あか ぎり たけ かず
赤 桐 毅 一*

はじめに

毎年のように水害の発生する我が国では、多くの治水施策が講じられている。治水対策には、堤防等治水施設をつくるハード面の対策と人々の水防意識を培うなどのソフト面のものであり、洪水ハザードマップは、ソフト面の方法である。

洪水ハザードマップは、水害による人命の損害をなくすために、洪水が予想される区域から避難することを主な目的として、避難するために必要な浸水情報、避難情報等の各種情報を地図に表示したもので、市町村が作成主体であり、公表を前提とし、1) 平常時には水害に関する事柄を学習し、防災意識を高め、2) 水害時には安全かつ確かな避難行動の支援を行うために使用する。

平成13年7月に改正水防法(昭和24年法律第193号)が施行され、洪水ハザードマップの作成環境が整備され、すでに平成15年3月現在で213市町村で作成公表済みであり、他に数十市町村が公表準備中である。しかし、まだ直轄補助あわせて約1,600以上残っている。

ITおよび測量技術の発展に伴い、詳細かつ数値化されたデータを使えるようになり、作成作業へGISの導入がすみ、破堤点別の情報の行政機関への提供や動くハザードマップの作成が始まった。ITを利用したリアルタイム洪水ハザードマップに進むのも時間の問題である。また、近い将来、地方自治体のGISに洪水ハザードマップの情報を組み込むことにより多様な活用、容易な改訂が可能になる。ここでは洪水ハザードマップの現状と今後について述べる。

1. 洪水ハザードマップまで

現在の洪水ハザードマップの作成される前にも、洪水関連の地図は多様なものが作成された。洪水ハザードマップへ発展する過程でみると、次のようになる。カスリン台風洪水状況図¹⁾、伊勢湾台風による高潮の侵入範囲を予測していた濃尾平野水害地形分類図²⁾、これを検証した伊勢湾台風水害状況図^{3,4)}、土地の水害性を読みとれる土地条件

図⁵⁾、治水地形分類図⁶⁾、土地利用図の整備、写真測量による地形図の全国整備(国土地理院:1978?)、河道や土地利用の変遷を読みとれる明治以来の旧版地形図等の蓄積があり、洪水氾濫危険地域を定性的に解明できるようになり、定量的な氾濫解析のための情報の蓄積が進んでいた⁸⁾。

やがて、国土基本図、都市計画図が整備され、詳細な地盤高⁹⁾および詳細な土地利用データ(細密数値情報、都市計画図など)を得られるようになり、氾濫源モデルを作成するための環境が整った。現在では、地上標高データとしてもっとも高密度なレーザー測量の成果を利用できるようになってきている。この間、氾濫シミュレーションが進歩し、解析結果を基本資料として洪水ハザードマップを作成するようになってきた。これらの多くの地図のなかで現在の定義による洪水ハザードマップ(浸水情報および避難情報の双方を載せた地図)に該当するものは土地条件図の旧版と現在の洪水ハザードマップの2種類である。他の図は、洪水の特徴を情報の読替により読みとることのできる地図である。

2. 現在の洪水ハザードマップの作成経緯

浸水実績の公表から現在の洪水ハザードマップになるまでの経緯は次のとおりである。水害のあった約500河川について1975年頃から、浸水実績図¹⁰⁾が公表され、やがて、洪水氾濫危険区域図¹¹⁾が、500m(250mないし1km)のメッシュで、1993~1994年度に一級河川について公表された。やがて、洪水ハザードマップの作成が始まり、1994年に「洪水ハザードマップ作成要領」(河川局)が公表され、作成自体は、河川局治水課長名(1993)の通達に基づき、実施された。その後1998年の郡山市における洪水で洪水ハザードマップの有効性が判明し^{12,13)}、全国的に数が増大した。2001年7月に改正水防法が施行され、洪水ハザードマップが全国的に整備される環境が整った。

洪水ハザードマップの作成方法、工程の標準を示して品質の確保を行うため、「洪水ハザードマップ作成要領および解説書」(建設省治水課:1997)¹⁴⁾、「洪水ハザードマップ作成要領解説と運用(改訂版)」¹⁵⁾、「洪水ハザードマップ作成要領解説と作成手順例」¹⁶⁾が出された。

* (財)河川情報センター河川情報研究所研究第三部

3. 水防法

2000年12月、河川審議会、水災防止小委員会答申があり、2001年(平成13年)6月13日に水防法(昭和24年法律第193号)が改正され、7月3日から施行された。

- (1) 10条の2の規定において、都道府県知事が行う洪水予報河川が追加された。
- (2) 浸水想定区域の公表(水防法第10条の4関連)において、国土交通大臣または、都道府県知事は、洪水時の円滑かつ迅速な避難を確保するため、洪水予報河川について、河川整備の計画降雨により、河川が氾濫した場合に浸水が予想される区域を浸水想定区域として指定する。この結果、浸水想定区域、および浸水した場合に想定される水深を公表するとともに、関係市町村長に通知することが定められた。
- (3) 円滑かつ迅速な避難を確保する措置(水防法第10条の5関連)：市町村防災会議は、浸水想定区域の指定があったときには、水防法の市町村地域防災計画において、浸水想定区域ごとに、洪水予報の伝達方法、避難場所その他円滑かつ迅速な避難の確保を図るために必要な事項を定める。また、浸水想定区域内に地下街等の不特定かつ多数の者が利用する地下施設がある場合には、利用者の円滑かつ迅速な避難の確保が図られるよう洪水予報の伝達方法を定める。

このようにして、市町村長は、市町村地域防災計画に定めた洪水予報の伝達方法、避難場所等について住民に周知させるように努める。また、市町村地域防災会議の協議会が設置されている場合には、同協議会が市町村相互間地域防災計画において、浸水想定区域ごとに洪水予報の伝達方法、避難場所等を定める。

4. 洪水ハザードマップの位置づけ

水防法の改正以前、洪水ハザードマップは、その重要性と必要性に基づき、平成6年の河川局治水課長通達により作成されていたが、

水防法の改正により、

- ① 10条2で指定された洪水予報河川について、10条4で、国および都道府県の河川管理者は氾濫解析を実施し、浸水想定区域を指定し市町村長へ通知する。
- ② 10条5で、市町村防災会議は、市町村地域防災計画に洪水予報の伝達方法および避難情報等を定める。地域防災計画において浸水想定区域ごとに洪水予報の伝達方法、避難場所その他洪水時の円滑かつ迅速な避難の確保を図るために必要な事項について定める。さらに、市町村長は、住民への避難場所等の情報の周知に努める。
- ③ 10条の4,5を実行すると、周知すべき情報は地図で提供される。河川局長通達(国河政第47号)により、周知は洪水ハザードマップ等によることが望ましい

と規定されている。

作成主体は、地域の防災の責任者である市町村長であり、地方整備局等、都道府県の積極的な協力を得ながら作成する。また、浸水が複数の市区町村に及ぶ時、また、広域的に住民の避難場所の確保を要する時には広域洪水ハザードマップを作成する。

- ④ 住民への普及とその継続：市町村は、洪水ハザードマップを住民に十分活用してもらうため、マップを各世帯に配布するとともに、説明会、広報、掲示板、学校教育などを通じて地域住民へ浸透させる工夫を繰り返し行う。

5. 洪水ハザードマップの内容

洪水ハザードマップは、破堤、氾濫等による洪水流による人命の損害等を最小限に止めることを目的として、浸水情報、避難情報等の各種情報を地図に表示した地図で、市町村単位に作成し、公表を前提としている。洪水ハザードマップは基本的には浸水想定区域図で示される浸水想定区域から要避難地域を検討し、要避難人数を算出し、市町村地域防災計画で定められた避難所のうち、水害時に使用できる避難所を選択したうえで、避難計画を検討した結果を地図上に表現したものである。

洪水ハザードマップを作成する目的は、1) 住民サイドでは、① 平常時からの防災意識の向上と自発的な避難の心構えを養う。② 警戒時、避難時に住民が円滑かつ迅速に避難し被害を軽減することであり、2) 行政サイドでは、③ 作成を通して普段から行政が防災対策を推進する。④ 洪水ハザードマップを用いて警戒時、災害時の対応を円滑に行うことである。

5.1 避難活用情報

避難活用情報とは、水害時における住民の安全かつ確かな避難行動に役立つ項目を中心とする情報であり、住民を安全に避難させることに活用するものである。記載項目：浸水予想(浸水深、洪水到達時間、浸水実績)、避難の必要な地域、避難場所、避難ルート上の危険箇所、避難時の心得、避難情報の伝達手段、避難勧告などの説明。このほか最近では、別版で破堤点別の情報がある。地図にして配布されるのは、最大包絡線で示された浸水想定区域図を基本資料として、その上に避難情報をのせた結果である。

5.2 災害学習情報

災害学習情報とは、平常時において住民が水害に関するさまざまなことがらを学習し、意識を高めるのに役立つ情報である。記載項目：水害のメカニズム、地形と氾濫の形態、洪水の危険性、被害の内容、気象情報に関する事項、既往洪水の情報(降雨状況、浸水状況、被害状況)、水害時の心得、洪水ハザードマップの使い方と解説、水害に対する普段からの理解を深めておくことにより、実際の洪水に対応しやすくなる。

6. 洪水ハザードマップの作成

① 基本資料としての浸水想定区域図が、浸水想定区域図作成マニュアル(国河治第57号)¹⁷⁾に基づき作成され市町村に提供される。浸水想定区域図については、想定する洪水規模は、河川ごとに定められた計画高水流量を基本とし、浸水深は、十分多数の想定破堤地点(最近の事例では、間隔は200ないし250mも多い)からの最大浸水深を包絡した深さとする。この工程は、氾濫解析として河川管理者により行われ、浸水想定区域図として公表され、ホームページや事務所で閲覧できる。洪水ハザードマップ作成にはこの結果を用いる。

② 洪水ハザードマップは、その作成要領(国河治第60号)に基づき作成される。改正により、市町村地域防災計画の避難計画に反映するように作成される。また、浸水想定区域内の地下空間に関する情報の記載が加えられ、さらに作成に当たり、住民等からの意見を聴取することが規定された。実務上、河川の情報は、河川管理者が圧倒的に多

く持っていることから、河川局長の通知により、河川管理者が積極的に作成を支援する。

③ 洪水ハザードマップの作成は、氾濫シミュレーションの結果から作成される浸水想定区域図、必要項目の資料の収集、浸水情報の整理解析、洪水流の到達時間、避難場所の可否の検討、避難場所までの危険箇所等の検討、住民の避難場所への振分け、情報伝達の検討、避難計画、水防上の課題の検討、災害学習情報などを検討して進められる^{14)~16)}。

④ 避難計画を作成時、避難場所については浸水の恐れのないところに指定する。避難路については土砂災害の危険区域を横切らないこと、橋を渡らないことを前提とする。避難勧告や避難指示(命令)が確実にしかも迅速に住民に伝達できるように、できるだけ複数の伝達方法を設定するなど細部まで詳細な検討を行う^{14)~16)}。



図2 破堤30分後

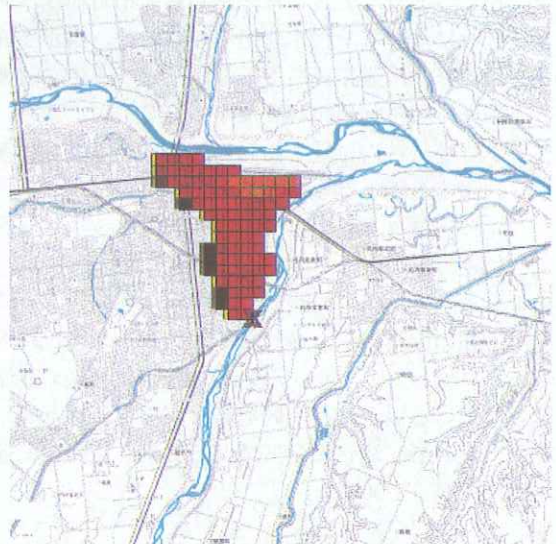


図4 破堤2時間後

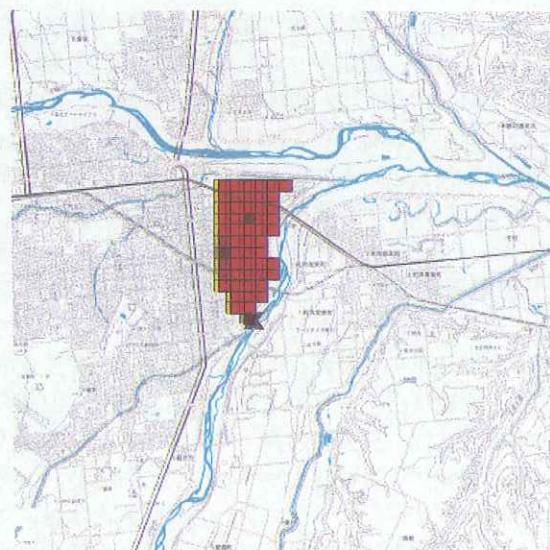


図3 破堤1時間後

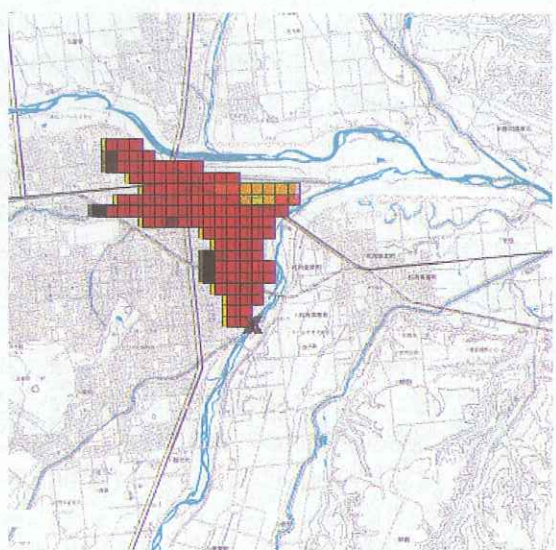


図5 破堤3時間後

図2~図5は、破堤点別時系列浸水想定区域図である。浸水ハザードマップでは、これに避難場所情報を加えている。

7. 洪水ハザードマップの効果

(1) 期待される効果

洪水ハザードマップを作成し、配布する効果として、期待されることは、住民にとっては、たとえば、① 実際の水害時に人命の損害がなく、安全に避難できることである。

② 平時においては、この地図を使って、避難訓練を実施し、実際の避難路を歩いて避難場所まで行ってみたり、いざというときにどうすればよいかを家族や周囲と話しあったりして、住民自身の水防意識の向上を図ることであり、また、③ このようなことを知っていれば、自宅の新築改築等にはこのことを考慮することになり、適切な土地利用につながる。行政にとっては、⑤ この地図を作成すること自体が担当者の訓練であり、自市町村における水害の発生および水防に関する課題の認識に直結し、水防計画や避難計画などに反映させることができる。⑥ 多様な視点で水害に関する危機管理についての見直しを行うことができる等々である。

(2) 効果例

洪水ハザードマップの実際の効果例については、いくつかの地区で確認されているが、現時点では郡山の例が最もわかりやすい。

① 1998年8月洪水

1998年8月に、阿武隈川流域の郡山市は大きな洪水に遭い、浸水被害は床上浸水391世帯、床下浸水520世帯にのぼった。河川水位が上昇し、54町会11,448世帯に避難指示(命令)が2回出された。この避難指示を支えたのが、同年春に各世帯に配布されていた「郡山市洪水ハザードマップ」であった。

② 洪水ハザードマップの効果¹²⁾

・郡山市では氾濫の数ヶ月前に洪水ハザードマップが住民に配布されていた。事前にこの地図を見ていた人のグループと見ていなかった人のグループで避難勧告、避難指示に基く行動開始が60分程度ずれた。この差は緊急時には非常に大きい。あらかじめ配布されていた効果である。

・行政は、避難勧告や避難指示の発令時には避難対象区域の設定や要避難世帯、要避難人口の把握、避難施設の収容能力等を検討済みであり、迅速に避難指示を発令できた。

・住民にとっては住んでいる地域の浸水危険度の程度、また避難所の位置、避難行動、避難時の注意事項等について、洪水ハザードマップから把握できた。

③ 郡山市における問題点

・丁寧な説明会を実施していたが、それでも住民の三分の一が洪水ハザードマップの存在を知らなかった。住民への繰り返しの説明が非常に重要である。

・避難者のうち5,199人が指定避難場所に避難し、他は親戚、知人、その他に避難したため、状況を把握できなかった。

・一度目の避難指示では90%が車で避難し、大渋滞となり、避難路の冠水情報がなく、広報・救援活動に支障が生じた。

・浸水区域外の指定避難場所が行政界や学区界を越えて

設置され、その周知が十分でなかった。

・要介護者の避難対策が十分でなく、高齢者の独居老人の避難率が低かった。

8. 洪水ハザードマップの今後の方向

(1) 概要

今後の洪水ハザードマップに求められる条件は、① 洪水関連の多様な局面で状況判断に利用でき、流速、危険度、内水などに配慮した情報を提供できるシステムとなっていること、② 情報を、動的に多様に示すことができ、洪水到達時間等時間的要素も示せること、③ 内容が、見たときに理解しやすいこと、④ デジタル化、ネットワーク化ができること、⑤ 廉価であり、容易に改訂できることなどが必要である^{18)~22)}。

(2) 多様化

洪水ハザードマップは用途により多様化する。すなわち、① 紙の洪水ハザードマップ(現行)、② 簡便型の動くハザードマップ(破堤点別時系列浸水想定区域および避難場所表示誘導システム)、③ 条件設定のできる動く洪水ハザードマップ、④ リアルタイム氾濫流解析によるリアルタイム洪水ハザードマップの順に発展していき、現在は③までの段階であり、④は基礎的に必要な事項が揃った段階である。

(3) 作成方法

① 廉価で容易に作成するためにGIS化が進み、改訂を市町村が直営で容易に行えるようにする、さらに、② 市町村内の各種の情報を市町村がGISに蓄えておき、その情報と組み合わせる。現在は、①を進めている段階であり、市町村でGIS化を進めているところでは技術的には②も可能になりつつある。

(4) 情報の伝達

伝達については、紙の地図上に掲載している。現在の河川流域情報総合システム2002は、市町村までは、リアルタイムに情報が到達するようになっている。このシステムは、国、都道府県、市町村を対象に稼働し、10分前までの河川の水位、レーダー雨量、洪水情報、警報等河川関連の必要情報を多数項目について提供している。緊急情報は、強制的に利用者に伝達されるシステムにより提供されている。

氾濫流(想定浸水深や到達時間)など洪水ハザードマップに掲載している情報項目のリアルタイム化については、すでに基本技術が揃い、近い将来、完成する見込みである。

(5) 情報の利活用

徐々に市町村のデータのGIS化が進むことにより市町村が保有する詳細な避難場所、避難経路、要援護者などの情報を用いて具体的な避難行動のための詳細(場合により個別の計画を含む)かつ即時的な計画を立てる方向で進むと想定している。

(6) 多様な洪水ハザードマップ

① 紙の洪水ハザードマップ

洪水ハザードマップは、現在、紙の地図で作成されている。現在の洪水ハザードマップは、前述のように、浸水想定区域の表現については、個別破堤点ごとの最大浸水深、

および範囲を全点重ねて包絡した全包絡図を基礎にして作成している。この場合、避難場所の選定は、想定している浸水の最も激しい状態でも安全な地点を選んでいる。基本は、紙の洪水ハザードマップである。

② 簡便型動くハザードマップ（破堤点別時系列浸水想定区域および避難場所表示誘導システム）（16頁の図2～図5）

河川管理者が実施した洪水氾濫解析結果のデータを用いて、破堤点別の想定浸水区域および浸水深を時系列で動的に表示し、避難計画の検討をできる簡易型のシステムである。詳細な地点別検討に使用できるが、利用者が、データを変えたり、地点を全くの任意にすることはできない。

公表されている浸水想定区域図は全包絡図であるが、現実には全ての想定破堤点と同時に破堤するわけではない。市町村全域が浸水想定区域に入ってしまう、浸水想定区域外に避難所を設定できない場合や、破堤箇所によって、浸水状況が大きく異なる場合など、破堤点別、時系列別の浸水想定区域を表示するシステムが必要である。どの地点で氾濫が始まると洪水流はどのようにうごくのか、どのくらいの時間で、どのような経路で集落に迫り、流下するかなどを知ることができ、詳細な避難計画の立案に利用できる。また、洪水ハザードマップ検討業務の中で、市町村の担当者から、破堤点別の浸水想定区域を見たいという要望が増えている。

③ 動く洪水ハザードマップ

このシステムは、パソコン画面上で、対象降雨、洪水の規模や破堤箇所等を任意に設定し、氾濫流の広がり方を動的に表示するとともに、氾濫流の到達時間や避難経路の浸水状況、避難場所などを分析、表示するシステムである。これにより災害状況の分析や防災対策の立案、効果的な避難行動シミュレーションなどを行うことができる。防災関係者はパソコン上で自ら氾濫シミュレーションを行い擬似的に洪水を体験できるとともに、災害状況の分析、防災対策や避難計画の立案、防災訓練など多目的に活用することができる。利用者は国、都道府県等の河川管理者を想定している。

以上の3種類は、すでにできている方法である。次のリアルタイム氾濫流解析システムは今後開発される。

④ リアルタイム氾濫流解析システム

この名称のシステムについてはいくつかのイメージがある。すでに雨量水位等河川情報は、国土交通省河川局のホームページの水情報国土データセンターの項目から10分前の情報を誰でも何処でも入手できるようになっている。このシステムは、データの収集提供をリアルタイムに行っている。このシステムからのデータを利用して、数分で氾濫解析および避難場所の解析を行い、直ちに避難行動および水防活動に使えるようにしようとするものである。そう遠くない将来にできる見込みである。

⑤ GIS化

上記の洪水ハザードマップを作成するためのデータを効率的に整備するために使用される。洪水ハザードマップの作成をGISを利用して、廉価、容易、迅速に作ろうという

方向の技術開発が行われている。すでに、洪水ハザードマップ作成の内、各工程ごとの作業については、ほぼ自動化されているが、工程間の判断は人間の仕事である。

数年前に、それまで手作業で進められていた工程が工程ごとにデジタル化された。それだけでも非常に効率が向上し、検討を十分に行えるようになり、修正を迅速に行えるようになった。基図のベクター化が進めば、洪水ハザードマップの作成効率が飛躍的によくなり、質も向上する。

9. 都市河川の浸水対策について

平成11年6月の福岡水害や12年9月の東海豪雨を契機に都市河川の水害について大幅に見直し検討が行われた。

都市河川の氾濫については、① 外水を対象にした従来の洪水ハザードマップでは、都市の中小河川、内水、下水の氾濫までは対応していない。② 都市型の河川の氾濫については、外水、内水、下水の3点について同時に氾濫解析することが必要であり、さらに避難情報を必要とする。③ 都市では、市街地が非常に密に河川の際まで形成されているため、ひとたび、氾濫すると被害は大きくなる。特に地下街では外の状況が全く判らないことから被害が激しくなりやすく、十分な準備がなければ立ち上がりの早い都市型洪水に組織的に対応するのは困難である。

このような特徴のある都市型河川の洪水について、平成12年11月に都市型水害緊急検討委員会は、都市型水害を未然に防止し、被害の軽減を図るために以下の内容の緊急提言を行った。① 水害対策の基礎調査、影響予測、② 水災危機管理、被害軽減、③ 水災時の情報提供等、④ 河川、下水道の整備、⑤ 治水システムの新たな展開、ステップアップ、⑥ 提言の推進に向けて。この提言を受けて、洪水ハザードマップの作成、公表の推進、情報収集提供体制、光ファイバー網の整備、ホームページやiモード等による情報提供が進められている。このようにハード面の整備に加えて、ソフト面の対策が明確に打ち出されていることが特徴である。

また、特定都市河川浸水被害対策法案がすでに国会に上程されている。

この法案の概要は、著しい浸水被害の発生するおそれがある都市部を流れる河川およびその流域について、総合的な浸水被害対策を講じるため、流域水害対策計画の策定、河川管理者による雨水貯留浸透施設の整備、雨水の流出の抑制のための規制、都市洪水想定区域等の指定・公表等の新たな法制度を講じるものである。これにより、河川管理者は、流域水害対策計画に基づき、特定都市河川流域に雨水貯留浸透施設を整備でき、各戸の下水道の排水設備の貯留浸透化を義務付け、また、特定都市河川流域における雨水の流出の抑制のための規制等を行えるというものである。

このように、都市型河川の水害の未然防止および被害の軽減を目的としてこれらの提言および法律を受けて多様な対策が実施されつつある。

洪水ハザードマップも、従前のタイプのものに加えて、

都市の洪水の現状にあうタイプの洪水ハザードマップが必要になり、迅速的確な情報と避難誘導のための判断に直結することが必要である。

10. 課題

(1) 住民への周知

洪水ハザードマップの住民への浸透は大きな課題である。繰り返し説明会、インターネット、電話帳のレッドページ等、あらゆる機会を通じて周知策を繰り返し講じることが必要である。

(2) 作成および普及技術の高度化

洪水ハザードマップの作成技術を一層高度化し、内容の高度化および作成経費の軽減が必要である。また、ITおよびGISの著しい進歩により多様な要素技術や異なるデータの組合せが非常に容易になっているので、今後ごく短期間にインターネット、ブロードバンドなども利用して洪水ハザードマップの作成および普及を行っていくことが必要である。

(3) 情報の伝達

河川の水位、雨量等の情報はすでにリアルタイムで情報を収集して、提供できている。次は、この情報と避難関連情報を組み合わせて即時に避難に直結する段階および総合的に水害に関する平時からの危機管理に進むことが必要である。

(4) 都市河川の浸水への対応

都市河川に対応した洪水ハザードマップを作成することが必要である。

おわりに

水害は、降雨の状況、雨を受ける土地の状況、水防体制の三点の均衡がとれていない時に発生しやすくなる。

堤防整備が進み、雨、水位等の情報収集の仕組みも年々進歩している。しかし、世代交代、激しい人の移動などにより、住んでいる土地の水害の特性を知らない人の増加、さまざまな雨の降り方、都市化の進展等により、水害の発生を完全に抑えることはできない。

水害を軽減するには、現在の社会状況に合わせた対応が求められている。そのために、水防法が改正され、洪水予報河川に指定された区域では、洪水ハザードマップ等によ

り住民に浸水想定区域および避難情報等を周知することになっている。

人々の水防意識を高めることは水害の軽減に重要であり、洪水ハザードマップはこのために利用される。洪水ハザードマップを作成する時、最も重要なことは、市町村の熱意である。

参考文献

- 1) 地理調査所：利根川および荒川の洪水調査報告，地理調査書時報，1947.
- 2) 大矢雅彦：濃尾平野水害地形分類図，科学技術庁資源調査会，1956.
- 3) 大矢雅彦：平野地形と洪水型 I, II, III, 測量, 10 巻, 3 号, 5 号, 11 巻 3 号, 1960.
- 4) 国土地理院：水害予防土地条件調査. 洪水地形分類図および地盤高および水防要図, 1960.
- 5) 大矢雅彦：阿賀野川水害地形分類図および説明書. 他に小川原湖, 霞ヶ浦, 庄内平野, 淀川, 等々, 1984.
- 6) 国土地理院：土地条件図, 1960～.
- 7) 各地方建設局および国土地理院：治水地形分類図及び説明書, 1976～78. 見野部・堀野・赤桐：2 万 5 千分の 1 治水地形分類図の作成とその利用法について, 第 33 回建設省技術研究会報告, 97～102, 1979.
- 8) 赤桐毅一：水害を地図から知る, 地質と調査, No. 2, 1992.
- 9) 国土地理院：1：50,000 地盤高図「東京」「大阪」「濃尾」, 1990.
- 10) 河川協会：浸水実績図, 1991.
- 11) 建設省治水課：洪水氾濫危険区域図, 1993.
- 12) 片田研究室：平成 10 年 8 月末集中豪雨災害における郡山市民の対応行動に関する調査報告書, 1999.
- 13) 中尾忠彦・三村清志：洪水ハザードマップ, 災害の研究, 第 32 巻, pp. 115～123, 2000.
- 14) (財)河川情報センター：洪水ハザードマップ作成要領 解説と運用, 1997.
- 15) 建設省河川局治水課：洪水ハザードマップ作成要領 解説と運用 (改訂版), 2001.
- 16) (財)河川情報センター：洪水ハザードマップ作成要領 解説と作成例, 2002.
- 17) 国土交通省治水課：浸水想定区域作成マニュアル, 2001.
- 18) 赤桐毅一：洪水ハザードマップについて, 地理, 11 号, 古今書院, 2001.
- 19) 赤桐・三村・岩井：洪水ハザードマップ (現況と今後の方向) 地図調製業協会, No. 133 号および 134 号, 2001.
- 20) 三村・赤桐・松井：洪水ハザードマップの今後の展開について, 2000.
- 21) 赤桐・高野・田中・高橋・小野：IT と洪水ハザードマップ, 平成 13 年度河川情報シンポジウム, (財)河川情報センター, 2001.
- 22) 島田・赤桐・高橋：最新の洪水ハザードマップ, 平成 14 年度河川情報シンポジウム, (財)河川情報センター, 2002.

近づく東海地震の監視体制の現状と前兆検知手法

みぞ うえ めぐみ
溝上 恵*

1. はじめに

駿河トラフおよび南海トラフに沿うプレート境界では、フィリピン海プレートが一年間に3ないし4 cmの割合で北西に移動し、陸のプレートである本州の下に沈み込んでいる(図1)。このフィリピン海プレート(下盤)の沈み込みにより、陸のプレートの先端部(上盤)は北西方向へ押し込まれながら下方に引きずり込まれ歪が蓄積される。この歪は100~150年で限界に達し、マグニチュード(M)8クラスの巨大地震が発生する。こうして、駿河トラフ・南海トラフのプレート境界では巨大地震が繰り返し発生する。1944年東南海地震(M7.9)の時、浜名湖付近から駿河湾にかけての東海地方のプレート境界では、断層破壊が起こらず、未破壊領域として取り残された。そのため、東海地方は地震空白域となり、1854年安政東海地震(M8.4)から約150年間にわたり歪の蓄積が続き、歪の累積量はすでに限界に達している。このような状況を考えて、東海地方ではプレート境界を震源域とする巨大地震である東海地震はいつ発生しても不思議ではない(図2-a, b, c)。

陸のプレートの先端部の沈み込みは、フィリピン海プレ

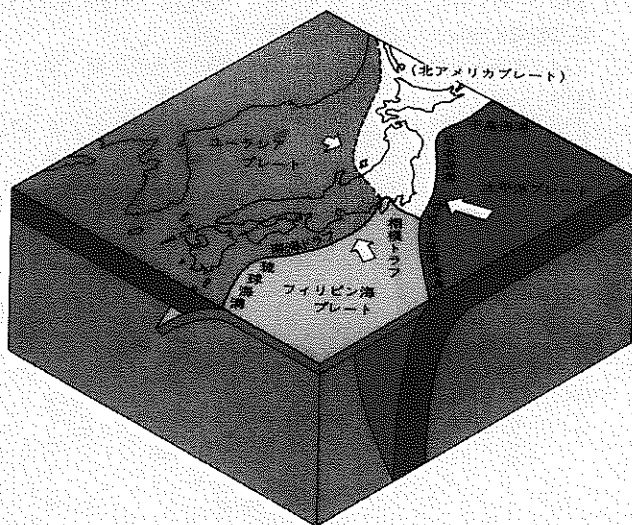
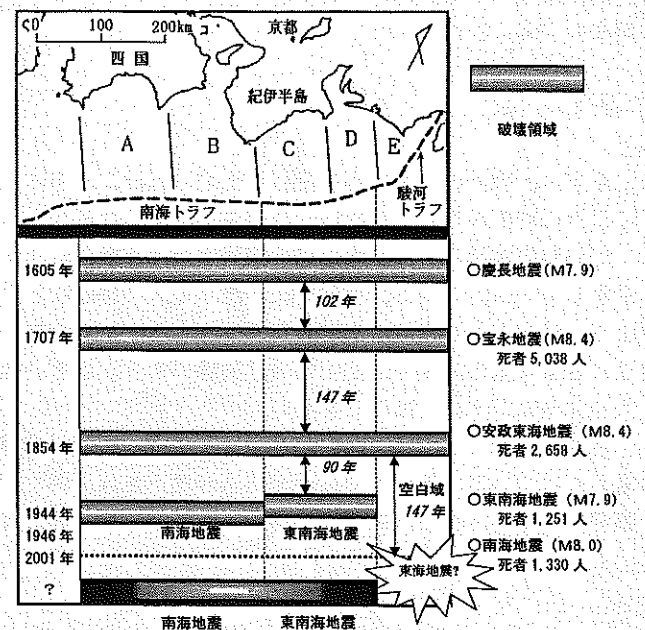


図1 日本列島周辺のプレートとその運動

ートの沈み込みとプレート境界に作用する摩擦力とによって生じる。東海地震のようなプレート境界の巨大地震を引き起こす震源断層では、プレート境界に作用する摩擦力によって陸のプレート(上盤)とフィリピン海プレート(下盤)が強くカップリング(coupling)している。この強いカップリング状態にある領域を固着域という。この固着域では、上盤が引き摺り込まれとその跳ね返る力(反発力)は次第に増加する。この反発力がプレート境界の摩擦力よりも小さい段階では、歪の蓄積がさらに進行する。しかし、反発力が増大しそれが摩擦力に近づいてくると、固着域のカップリング状態に緩みが生じ、プレート境界が部分的に



○東海地震

東南海地震(1944)で歪みが解放されず、安政東海地震(1854)から約150年間大地震が発生していないため、相当な歪みが蓄積されていることから、いつ大地震が発生してもおかしくないとみられている。

○東南海・南海地震

おおむね100~150年の間隔で発生しており、今世紀前半での発生が懸念されており、中部圏、近畿圏などの防災対策を早急に確立していく必要がある。

図2-(a) 駿河トラフおよび南海トラフに沿ったプレート境界を震源域とする巨大地震発生の一連の繰り返し(中央防災会議資料)

* 地震防災対策強化地域判定会会長

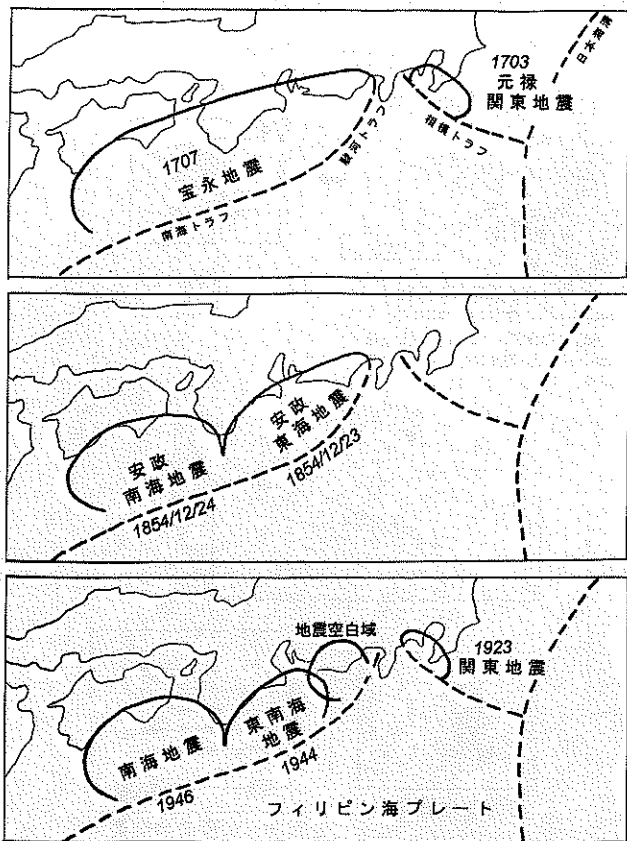


図2-(b) フィリピン海プレートのプレート境界における巨大地震発生の繰り返しと東海地方の地震空白域

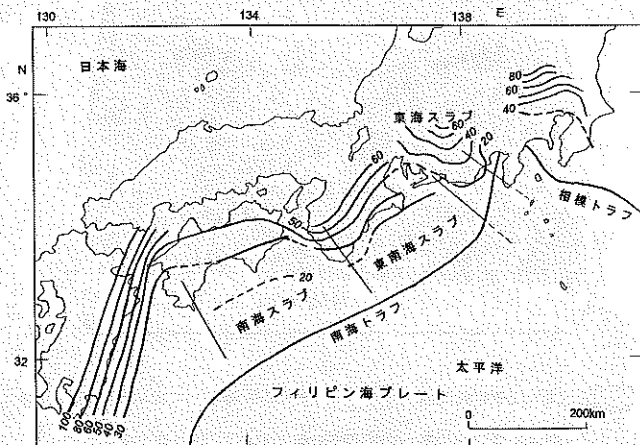


図2-(c) フィリピン海プレートの形状 (プレート・スラブの上面の等深度線)

剥がれ始める。固着域の摩擦力の時間・空間分布は、局所的な物理・化学的条件に大きく依存するため一様ではない。摩擦力が特段に大きい部分は、震源断層全体（固着域と同義）にわたる最終的破壊にいたるまで反発力に対してもちこたえる。一方、摩擦力の比較的小さい部分では、最終破壊にいたる前の段階で局所的でゆっくりしたすべりが生じる。これをプレスリップ (preslip) あるいは前兆すべりという。プレスリップの発生に伴い固着域の摩擦係数が減少する。この摩擦力の減少は固着域のすべりによる応力降下よりも大きいため、固着域の全域にわたる急激なすべりが起こって地震が発生する (図3)。プレスリップから地震発

東海地震の発生のしくみ

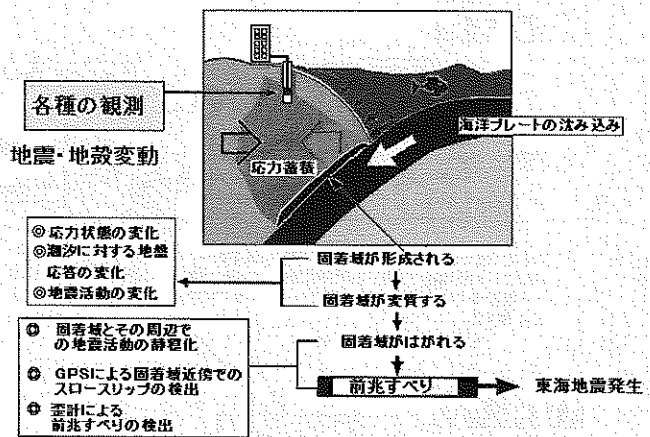


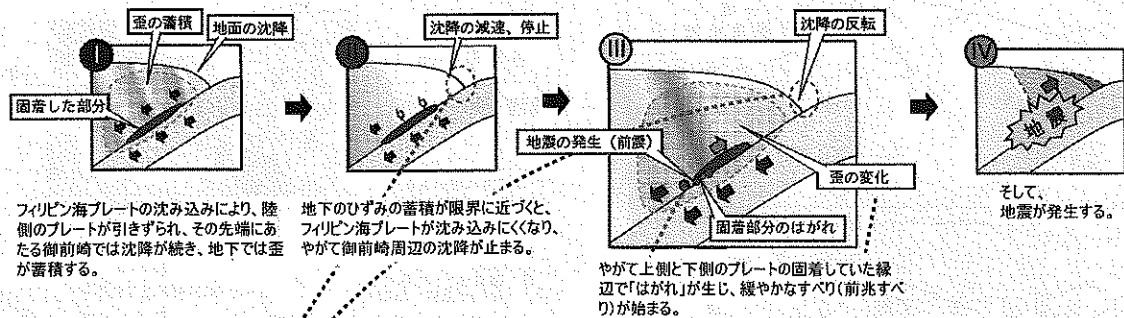
図3 東海地震発生の仕組み (気象庁資料に加筆)

生にいたるまでの過程については、過去の海溝型巨大地震に先駆けた地殻変動の事例解析、室内実験からえられた摩擦構成則に基づく数値シミュレーションなどから考察が進められている。

東海地震の直前予知とは、高感度・連続の地殻変動観測によりプレスリップの発生を検知することにより、地震発生をその直前に察知しようというものである。プレスリップが発生した時点では、東海地震の震源域の断層はきわめて局所的ながらすでに地震発生に向かってすべり始めている。そのため、プレスリップを地震発生の初期状態と考えるならば、プレスリップの検知による東海地震の直前予知は、「予知」ではなく地震発生の「早期検知」である (図4)。プレスリップの発生から地震発生 (断層全体の最終的破壊) にいたるまでの時間間隔は、プレスリップの規模および時間変化とそれをとらえる歪計観測網の検知能力すなわち密度による。1944年東南海地震 (M7.9) についての事例と数値シミュレーションから、この時間間隔は一日か半日程度と考えられる。

東海地震の早期検知に関わる防災体制とは、このように短い時間の間に緊急的な警戒態勢を敷き、災害を極力軽減しようというものである。そのため、監視観測、プレスリップの検知に関わる情報伝達から防災行動の立ち上げにいたるまでの手順をあらかじめ作成しておく必要がある。災害対策基本法では、地震は突発的に発生することを前提として、日頃からの予防対策と発災直後の救急救援活動を地震防災対策の2本柱としており、東海地震もその例外ではない。しかし東海地震については、プレスリップ検知の可能性が高いことから、大規模地震対策特別措置法 (以下大震法と記す) によってプレスリップの早期検知 (一般には直前予知とよばれている) という3本目の対策の柱を加えた。したがって、東海地震対策はこれら予防対策、救急救援活動および直前予知の対策を三位一体とした構成となっている。2003年5月、中央防災会議の「東海地震対策専門調査会」の報告によると、東海地震が突発的に発生した場合の被害は、最悪の場合死者約1万人、経済的損失37兆円にのぼると推定される。しかし、プレスリップの検知によって直前に予知情報が発信され、事前に警戒態勢をとるこ

シナリオ



前兆検出

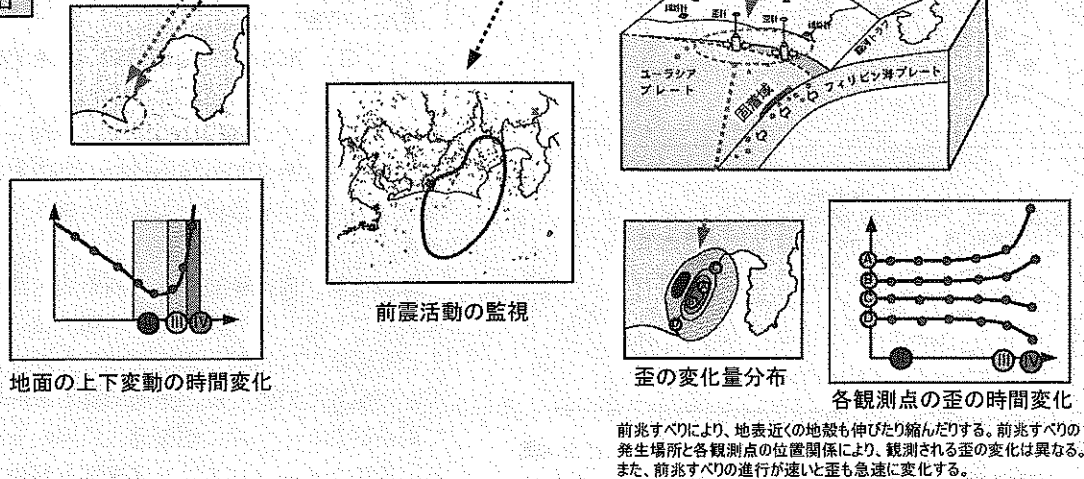


図4 東海地震発生シナリオとプレスリップ(前兆すべり)等の早期検知体制(気象庁資料)

とができ、東海地震の突発的な発生が避けられた場合の死者数は突発的発生の場合の約4分の1に激減するものと推定されている。

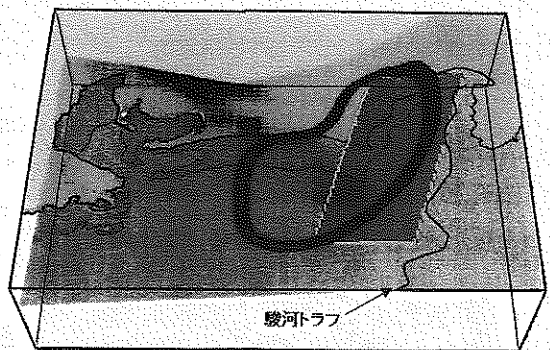
2. 想定震源域の見直し

2.1 想定震源域の輪郭

東海地震の想定震源域と断層モデルの見直しが、最近約二十数年間の観測・研究成果に基づき2002年に国の中央防災会議によって約20年ぶりに行われた。従来の想定震源域は、駿河トラフに沿って西北西に20~30度で傾き下がる長さ100~120 km、幅約50 kmの長方形の平面であった。新たに見直された想定震源域は、東海地方の内陸から海域一帯を取り囲んだ「なす形」の輪郭をもち、断層面はプレート境界に沿って3次元的に複雑に起伏した形状をしている^{1),2),3),4)}。この新たに見直された想定震源域(図5)は、従来のものと比較すると40 kmほど西方へ移動し、面積は約60%増加したが、それは以下に述べるような根拠に基づいている。

南西側の境界: 1854年安政東海地震の震源域のうち、1944年東南海地震で未破壊領域として取り残された部分(陸域では浜名湖の東側以東)の西縁を南西側の境界とする。

北側の境界: 沈み込むフィリピン海プレート(下盤)と陸のプレート(上盤)のカップリングが不明瞭になる境界。



○: 新たな想定震源域 □: 中央防災会議(1979)による想定震源域

図5 東海地震の想定震源域(中央防災会議資料)

この北側の境界付近、つまり駿河湾奥から内陸部にかけての地域では、微小地震の震源が高い精度で決められている。しかし、この地域からさらに北側では、地震活動が不活発であるためプレートの形状が不明瞭である。そこで、微小地震の震源分布から見て、フィリピン海プレートの存在が不明瞭になる所を北側の境界とする。

北西側の境界: 沈み込むフィリピン海プレートが陸のプレートとカップリングしている最深部、すなわちフィリピン海プレートの上面の深さが30 kmの等深度線をもって北西側の境界とする。この境界線が「なす形」の想定震源域のくびれの部分に当たる。この北西側の境界付近の直下、深さ30 km程度のプレート境界面近傍では、温度が

350~450度と推定される。地下の温度が約400度となる深さよりも浅い所でカップリング状態になると考えられることから、北西側の境界の直下のプレート境界は、不安定すべり（巨大地震の発生時に起きる急激で不安定なすべり）から安定すべり（定常的、連続的で緩慢なすべり）への遷移帯になっていると考えられる。

東側（駿河湾）の浅部境界：フィリピン海プレートの沈み込み口付近の浅所では安定すべりが起こっており、深くなるにつれてプレート間のカップリングが強まり、不安定すべりが起こるようになる。このカップリングが始まる深さは、約10km、温度が100~150度と推定される。そこで、この陸のプレートとフィリピン海プレートとのプレート境界の深さが10kmとなる等深度線を東側の境界とする。

南東側（御前崎沖から西側の海域）の浅部境界：海底活断層調査で見つかった東海断層系（プレート境界から枝分かれして海底面に現われた逆断層型の活断層系）⁹⁾より陸側では、プレート間のカップリングが始まると推定される。プレート境界のカップリングが始まる位置（深さ10km）は、東海断層系の傾きを考慮すると、東海断層系が海底面に現われた位置よりもさらに10~20km陸側に近い位置となり、そこを南東側の浅部境界とすべきである。しかし、東海断層系の深い部分の形状が明瞭でないことから、暫定的に東海断層系をもって南東側の境界とする。なお、震源域を取り囲むこれらの境界線は、なめらかな曲線を連ねたものとし、震源域内部におけるプレート境界面の形状は、微小地震の震源分布から求めた沈み込むフィリピン海プレートの上面の形状に一致したものとする。

2.2 震源域のセグメント構造とアスペリティ

東海地方の直下に沈み込むフィリピン海プレートの形状や海底地殻構造などから東海地震の想定震源域を見ると、想定震源域は単一の領域として見るよりも、三つの領域（セグメント）に区分して見る方が適当だと考えられる。そのセグメントの境界は次のように設定された。

御前崎付近のセグメント境界：フィリピン海プレートの形状は、御前崎付近を通る北西-南東走向の線を境界として大きく変化している。この境界線は、御前崎海脚~牧の原台地よりも南の領域を区分する。この境界で区分された西側のセグメントを「セグメント1」とする。

日本平付近のセグメント境界：石花海北堆~日本平を通る北西-南東走向のセグメント境界は、御前崎と日本平の間の境界と、富士川河口断層帯につながる方向の逆断層の領域とを区分する。このセグメント境界で区分される西側のセグメントを「セグメント2」、東側を「セグメント3」とよぶ。想定震源域から放出される地震波のシミュレーションには、これら各セグメントについて断層パラメータ（断層の走向、傾斜およびすべり角、すべり量など）を与えたモデルを立てて数値計算を行った。さらに、各セグメントにそれぞれ二つのアスペリティ（Asperity）震源域から放出される地震波エネルギーの密度は、震源域の全体にわたって一様ではなく、震源域の部分によって大きな差がある。断層運動によって大きなすべりが生じた部分からは、大き

い地震波エネルギーが放出され、プレート境界が特段に強くカップリングしているアスペリティに相当する領域からは特段に大きな地震波エネルギーが放出されることになる。また、プレート境界面を3次元的に見ると、複雑な曲面構造をもっている。そのため、震源断層については、その曲面の形状に合わせて0.05度の間隔で配置した約350個の小断層で近似する。震源断層の破壊については、これらの小断層の破壊がドミノ倒して震源断層の全域にわたり急激に拡大する過程を想定している（図6）。

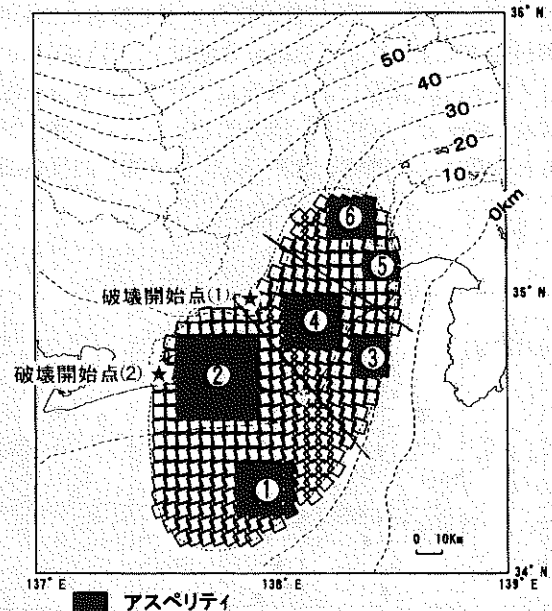


図6 想定震源断層モデルのセグメント（3分割）とアスペリティ（①~⑥の6領域）および断層破壊の開始点

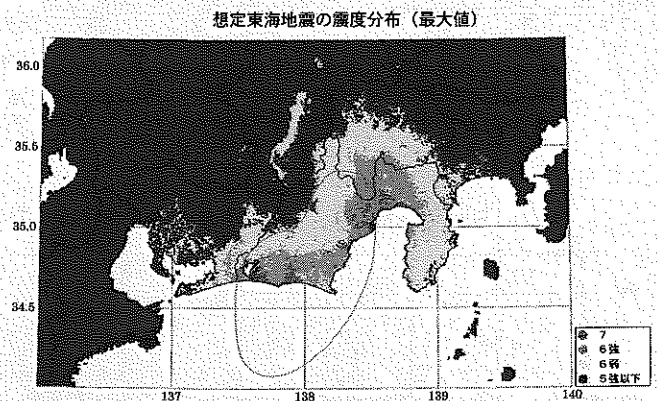


図7 東海地震による予測震度の分布

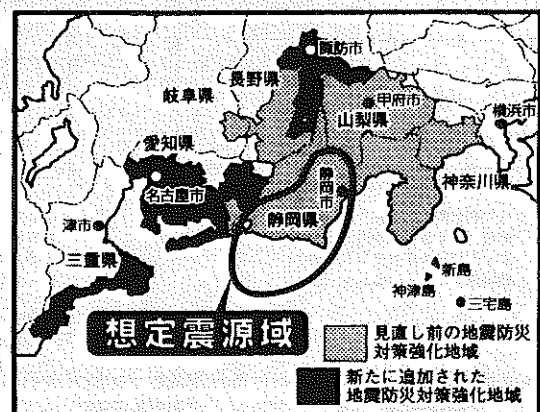


図8 新たに指定された地震対策強化地域

2.3 新たな強化地域の指定

東海地震の新たな想定震源域および震源モデルに基づいて震度分布の予測が行われた。その結果、震度6弱以上の強い地震動が想定される区域の分布(図7)は、従来の想定に比べ西側に拡がり、津波についても広域にわたり高い波が来襲することがわかった。昭和53年に制定された大震法により、「著しい地震災害が生じるおそれがあるため、地震防災に関する対策を強化する必要がある地域」は地震防災対策強化地域(以下「強化地域」という)に指定される。新たな強化地域は、①地震の揺れによる被害については、被害が顕著に現われ始める震度6弱以上の強い揺れが予測される地域、②津波による被害については、20分以内に高い津波(沿岸で3m以上、地上で2m以上)の津波が来襲すると予測される地域を含めて、③一体的な防災体制の確

保等の観点配慮して指定された。その結果、従前の強化地域に東京都伊豆諸島および三重県等の96市町村を加えた8都県263市町村が新たな強化地域として指定され、名古屋市もその中に含まれることとなった(図8)。

3. 東海地震に対する監視観測

3.1 監視観測体制

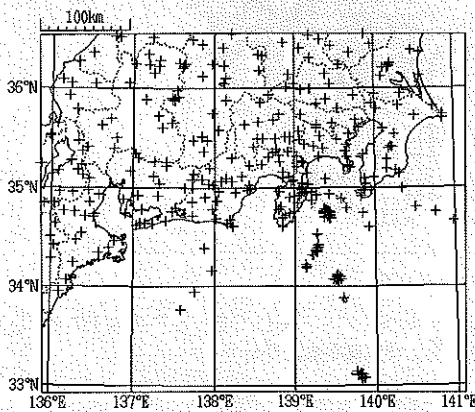
気象庁は、東海地方およびその周辺のデータを気象庁本庁にオンライン伝送し、24時間体制で地殻変動・地震活動状況を監視している。一定以上の異常な現象が検知された場合には、その観測結果と評価について発表する。またプレスリップ発生の兆候がある等の場合には、ただちに地震防災強化地域判定会(以下、「判定会」)は異常が東海地震の発生につながるものであるか否かの判定を行うものとしている。この判定は、歪変化の異常からプレスリップの発生を可能な限り早期に検知することであるが、地震活動など各種のデータも比較、参照して行われる。

以下文献6)ののっとり観測体制の説明を記す。東海地震に対する監視観測は、東海地震の想定震源域とその近傍の周辺地域の地震・地殻変動を監視対象の中心におきつつも、フィリピン海プレートの広域的な動態を把握するため、東は南関東地方、西は紀伊半島の一部までをも含む広域にわたる地震活動・地殻変動の常時監視を行っている。観測は、地震、歪、GPSのほか水準、傾斜、伸縮、潮位、地下水等の多項目にわたる(図9(a), (b), (c), (d))。このうち地震、歪は気象庁が24時間連続体制で観測を行い、GPSおよび水準測量は国土院が行っている。その他の各種の観測項目を含め、関連機関は気象庁と連携・協力しつつ観測を行っている。

3.2 地殻変動観測

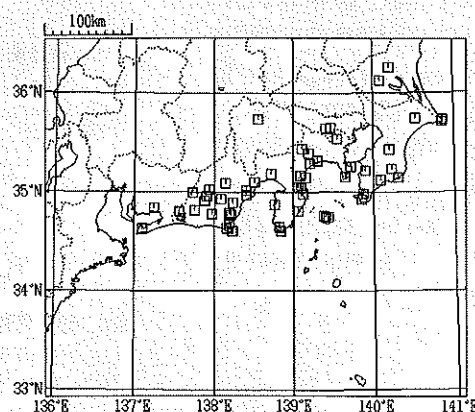
地殻変動観測の手法は多岐にわたるが、その主なも

(a) 地震観測網



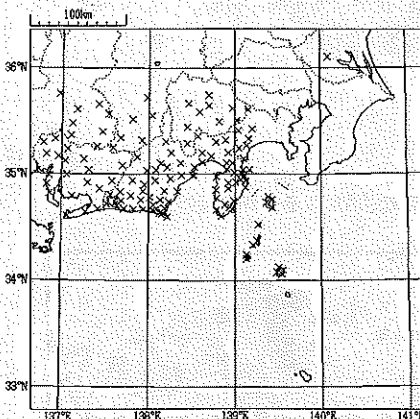
地震観測点の配置。気象庁観測点は約50箇所(伊豆大島火山監視用は除く)。他機関データは、東大、名大、防災科研、産総研、静岡県観測点のデータである。

(b) ボアホール式歪計観測網



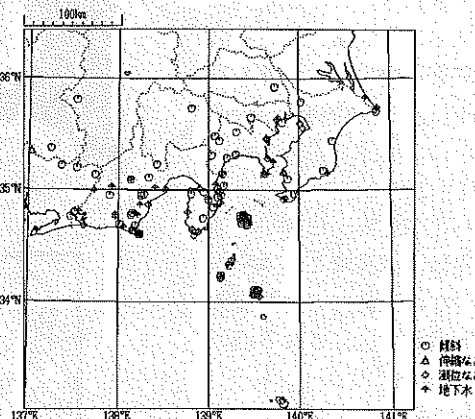
歪観測点の配置。この範囲内に46箇所、うち気象庁観測点は34箇所。その他は、東大3箇所、防災科研7箇所、地理院1箇所、静岡県2箇所。

(c) GPS観測網



GPS観測点の配置。この範囲内に132箇所、いずれも地理院。3時間毎にリアルタイムで気象庁へテレメータされている観測点を示している。

(d) その他の観測網



その他の種目の観測点の配置。この範囲内に98箇所、うち気象庁観測点は14箇所。1箇所でも多項目を観測している場合はそれぞれ数えている。観測項目は、傾斜51(1)、伸縮11(0)、潮位など26(13)、地下水など10(0)である(括弧内は気象庁、火山監視用は除く)。他機関データは、東大、名大、防災科研、産総研、地理院、海上保安庁の観測点のデータである。

図9 東海地方およびその周辺における地震活動・地殻変動等の監視観測網(平成14年4月1日現在)

(a) 地震観測網、(b) ボアホール式歪計観測網、(c) GPS観測網、(d) 伸縮計、傾斜計、検潮儀、地下水等の観測網

のはボアホール（縦坑）での歪計，傾斜計，精密水準測量，海水面を基準とした場合の地殻の鉛直変位を検出する検潮などである。さらに最近では，国土地理院により GPS 観測が全国的観測網により実施され，東海地方の観測データについては3時間ごとに気象庁に伝送されている。この他，従来から大学等を中心として行われてきた横坑での伸縮，傾斜（水管傾斜計）がある。また，歪変化に対応した地下水の移動等に関連すると考えられている地下水位，水温，化学成分濃度の測定などがある。それぞれの観測項目は，それぞれ対象とする地殻変動の成分（上下および水平変位，各方位に対する傾斜，伸縮，体積歪など），観測精度などが異なるとともに，年月といった長期的変動あるいは日時分といった短期的変動の検出に適したものなどさまざまである。そのため各観測項目の特徴を総合的に活用して地殻変動の動態を検出する。

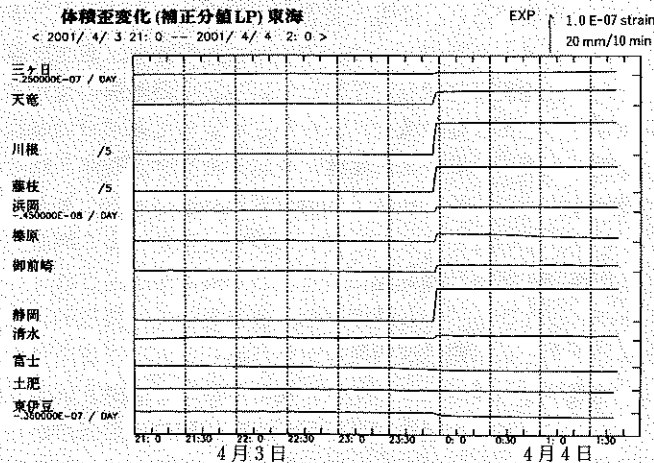
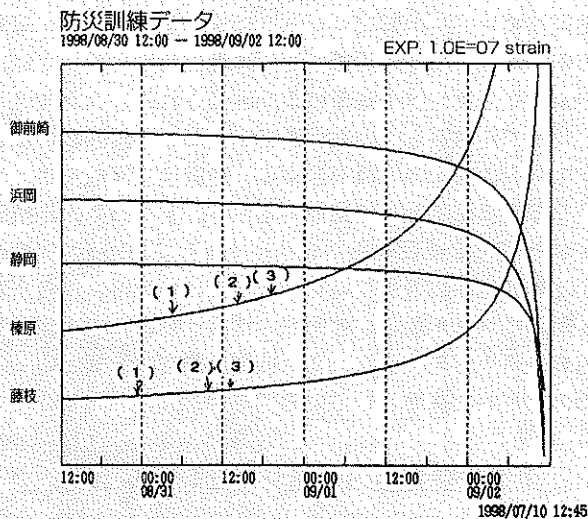


図 10-(a) 地殻変動監視用画面イメージの一例。観測点名右の数値は表示倍率，下の数値は表示する際に引き去った直線トレンド量 (strain/DAY) を表す。(気象庁資料)



(注) 防災訓練に用いられたシミュレーションによる記録 (気象庁資料)
①最大ノイズレベル値、②課長連絡基準値、③判定会招集要請基準値

図 10-(b) 東海地震発生直前の各観測点におけるプレスリップによる歪計記録 (98 年度防災訓練用のシミュレーション・データ) の時間的変化 (気象庁資料)

歪変化の監視観測 (図 9-(b)) は，各観測点，観測項目および成分に割り当てられた各観測チャンネルの時系列の変化を基本としている。すなわち各チャンネルの一定時間階差を，長期間の観測データに基づいてあらかじめ統計的に調査することにより，「通常」の変動レベルを把握し，観測データの一定時間階差が「通常」の変動レベルの何倍にあたるかにより，監視担当者に対する報知レベル，地震予知情報課長連絡レベル，判定会招集レベルといった複数段階の異常レベルとして自動検出するロジックが組み立てられている。異常が検出された場合には，時系列図を画面表示し，発生状況を確認する (図 10-(a), (b))。

一般に，地殻変動データは，本来監視対象とする地球内部現象に起因する変動のほか，潮汐や気象擾乱といった外部起源による変動も重なり合って記録される。監視上，こうした外部起源であることが明瞭な変動は極力除去する必要がある。気圧や降雨といった地表付近から地下に及ぼされる影響は，観測ポイントで測器を深く埋設し地表からできるだけ離すことによりある程度回避できる。しかし，完全に回避することは不可能であるので，因果関係が定量的に解明されている事象については，オンラインで影響を補正している。潮汐は，因果関係について最もよく調査されている現象である。気象庁では，歪計観測のデータに含まれる潮汐応答成分をあらかじめ BAYTAP-G により解析し，その応答係数から未来にわたって予測潮汐応答時系列を作成し，データから差し引くことにより，潮汐による変化についてオンラインでの補正を行っている。気圧応答については，いくつかの観測項目について気圧変化との間に比較的単純な線形関係が成り立つことが報告されている。特に体積歪については，分単位およびそれより遅いサンプリングのデータについて，直上の気圧データを用いた一次式による補正が有効であることが確かめられており，オンラインでの補正が実現されている。降雨応答については，影響が複雑でしかも長期に及ぶことからモデリングが困難であり，未だオンラインでの補正は実現していない。そのため，降雨の開始・終了時刻を降雨計データにより検出し，その間の異常判定レベルを降雨時のものに自動的に切り替えている。しかし，将来的に降雨時の異常検出能力を非降雨時と同等とするためのオフライン処理の導入を図っている。

なお，現行の判定会招集基準は，次のようである。歪計観測点（東海地方に 19 点地下埋設されている）のうち，3 カ所以上でそれぞれの検出可能レベルの変化が観測された場合。ただし，上の基準に達する変化が観測されても，火山噴火その他の要因によるものと判断される場合はこの限りではない。(参考) 検出可能レベルは各観測点のノイズレベルの 2 倍程度に設定する。東海地域におけるおよその検出可能レベル値 (19 点の平均値) は，3 時間当たり 0.4×10^{-7} ，1 日当たり 0.6×10^{-7} である。ただし，大雨時には，3 時間当たり最大 1.5×10^{-7} ，1 日当たり最大 2.6×10^{-7} である。この異常が基準に達すると判定会が自動的に招集される。地震活動に関する基準が含まれていない理由は，地震活動についての監視の比重が低いだけでなく，地震活

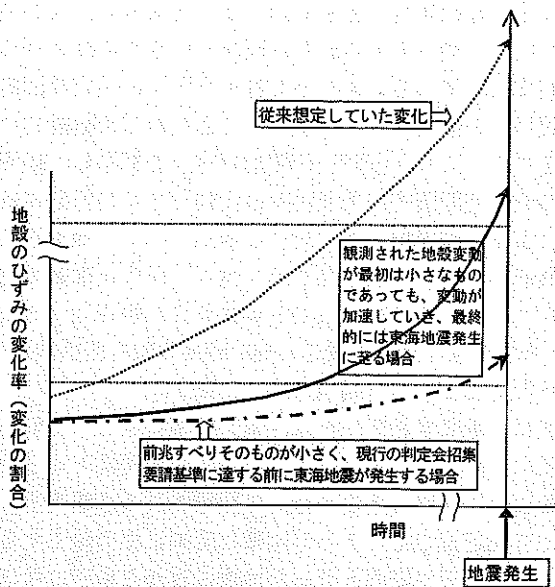


図11 プレスリップによる歪の変化率と判定会招集基準 (98年改定の前後の基準の比較)

動の発現様式の多様性を念頭に置いて監視する必要があることによる。従来の招集基準は、「ひずみ計観測点のうち1カ所で3時間以内に 0.5×10^{-6} 以上の変化が発生し、ほぼ同時間帯において少なくとも他の3点以上で明瞭な変化が発生した場合」というものであった。従来の基準と現行の基準を比較すると、基準値が従来の約1/10に引き下げられていることがわかる。その理由は、歪計観測のノイズレベル調査などから異常検知可能な最低レベルが $10^{-7} \sim 10^{-8}$ のオーダーであり、 0.5×10^{-6} の歪変化を十分に検知できることが明らかになったこと、さらにシミュレーションの結果や、東南海地震の際の傾斜変化の大きさ、断層すべりの室内実験などを考慮すると、従来の招集基準では判定会が招集されてからほとんど間をおかず東海地震が発生する場合があります。これまでに判定会が招集されるような異常事態が発生したことはない。気象庁は判定会委員と気象庁および関連各機関のメンバーによる「判定会委員打ち合わせ会」を毎月定期的で開催し、東海地方の地殻変動・地震活動の状況について総合的な検討を行っている。

GPS (全地球測位システム) は人工衛星を用いた測位システムであるが、その測定精度は1990年代に飛躍的に向上し、東海地震の監視にかかわる地殻変動観測としては歪計観測と並ぶ最も重要な観測項目である。GPS連続観測網 (図9-(c)) の実用化によって高精度の地殻変動観測、とりわけ水平変動を準リアルタイムで行うことが可能となった。現在、GPSは地殻変動・地震・火山などの研究にとって必要不可欠な観測手段となっている。国土地理院は1993年から1994年にかけて関東・東海地域に110カ所のGPS連続観測点を設置し、世界における稠密なGPS観測網の先駆けとなった。このGPS観測網は、その後日本全国の観測網 (GEONET) へと発展し、全国に約1000カ所の連続観測点を有するに至った^{8),9)}。GPS観測は、東海地震に関わる地殻変動の異常検知のための新しい観測手段として役立

つだけでなく、東海地震の地震像を明らかにするためにも大きく役立っている。GPS観測は地殻変動による変位を準リアルタイムで検知するのに対し、歪計観測は地殻変動による歪変化をリアルタイムで検知する。地震発生の直前の前兆現象であるプレスリップの検知は、微小な歪変化をリアルタイムでとらえることが必要であり、主に歪計観測 (あるいは傾斜計観測) に依存する。しかし、プレスリップ発生にいたるまでの広域的な地殻変動をやや長い時間スケールで把握するためにはGPS観測あるいは水準測量によるデータが不可欠である。つまり、GPS観測と歪計観測は、東海地震の監視観測の手段として最も重要な観測項目であり、両者は相補的な関係にある。

3.3 地震観測

東海地方では他地域に比べ高密度な地震観測網 (図9-(a)) が整備されており、ほぼ15~20 km 間隔での観測網密度が実現されている。現在気象庁でもれなく震源決定可能な下限は想定震源域 (固着域とほぼ同じ領域) 周辺でM1.5程度である。監視担当者は、自動的に生成されるトリガーリストを参照しつつ、速やかに波形検出、震源計算を行い、地震発生状況を監視している。東海地震の想定震源域を中心とした領域で、あらかじめ定めた基準 (領域別のマグニチュード、発生頻度) を越える活動が観測された場合には、ただちに地震予知情報課長に連絡することとしている。このほか、人が介入しない完全自動による地震波の相検出・震源計算処理により、自動震源も生産されているが、現在行っている精度評価、改良を経て、将来的にはリアルタイム処理、情報発信が行われることになる。

地震メカニズムについては、初動解およびCMT解が求められ、両者の比較検討が行われる。規模や地震回数から見て注目すべき地震活動、発生場所とりわけプレート境界あるいはそれに近接した場所で発生した地震などについては、特段に詳しい解析を行い、必要な場合には長期間にわたる過去に遡って地震活動の推移を調査する。

地震活動レベルの監視ロジックは次のようである。東海地方のプレート境界の固着域周辺の地震活動については、次のような活動レベル基準により評価される。クラスタとして発生する地震を除いたうえで (ただし地震回数には各クラスタ中の最大の地震を含める)、地震発生回数をポアソン分布の累積確率としてレベル化する。すなわち、累積確率が30~70%の範囲を平常レベル4として、0~100%の範囲を地震発生回数の少ないレベルから多いレベルへと0から8階層にレベル化し、各領域の地震活動のレベルが非常に活発、やや活発、通常、やや低調、非常に低調といった評価の定量的な基準としている¹⁰⁾。

4. 東海地震発生の数値シミュレーション

4.1 摩擦構成測とプレート境界のカップリングモデル

岩石すべり実験の結果から導かれた摩擦構成則と均質半無限弾性体の2次元準静的問題を利用した数値シミュレーションにより、東海地震に先行する地殻変動を予測する試

みが行われている。以下文献 11) にのっとり説明を記す。また最近では 3 次元問題にまで広げたシミュレーションも試みられている。岩石のすべり実験では、急激なすべり運動により地震波を放出する不安定すべりの発生に先行して、ゆっくりしたすべり運動で地震波を放出しない準安定すべりが発生することが知られている。このような準安定すべりは、岩石のすべり面にはたらく摩擦の性質から必然的に発生するものと考えられている。地球内部の断層やプレート境界にはたらく摩擦の性質は、実験室の人工断層面にはたらく摩擦と本質的には同じであると考えられるから、地震発生に先行して準安定すべりが発生すると考えてよい。

岩石すべりの実験結果から、すべり面にはたらく摩擦力はすべり量やすべり速度に依存することがわかってきた。このような実験結果を利用して、摩擦力をすべり速度の関数として記述する試みがなされている。こうして提案された摩擦構成則は、不安定すべりに先行する準安定すべりの発生過程を説明するために非常に有効であり、東海地震発生に先行すると予想されるプレート境界面での準安定すべり過程や、それに伴って地表で観測される地殻変動を予測する手がかりとなる。Ruina のすべり速度/状態依存摩擦法則²⁾は、摩擦のすべり速度依存性を表すパラメータである a 、 b とすべり量依存性を表すパラメータの L により記述される。すべり速度が一定のまま L よりも十分大きなすべり量が断層面に生じると、摩擦係数はすべり速度だけに依存する定常値に達する。摩擦構成則の一例を式で表わすと、次のようである。

$$\begin{aligned} \tau &= \mu \sigma_n^{eff}, \\ \mu &= \mu_0 + a \ln(V/V_*) + \theta, \\ d\theta/dt &= -(V/L)[\theta + b \ln(V/V_*)] \end{aligned}$$

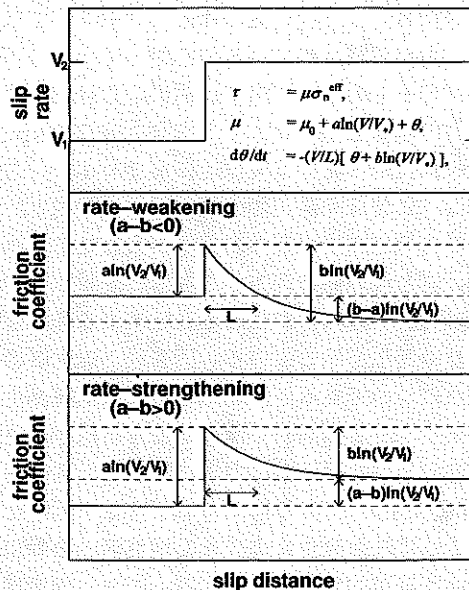


図 12 速度-状態依存摩擦構成則の例とすべり速度変化に対する摩擦の振る舞い
横軸はすべり量 (上段の図)、もしくは摩擦係数 μ (中・下段の図)。上段の図のように、一定のすべり速度 V_1 から V_2 に変化させた時、すべり量の関数としての摩擦係数の変化が $(a-b)$ の負、正に応じて中・下段の図に示されている¹⁾

ここで、摩擦力 τ は断層面に対する有効法線応力 σ_n^{eff} と摩擦係数 μ との積で表わされる。 μ は、第 2、第 3 式からわかるように、すべり速度 V と状態変数 θ に複雑に依存している。 V_* はレファレンスになる任意の微小速度であるが、その他の a 、 b 、 L などは、物質定数である。すべり速度を急激に変化させると、運動の変化を抑制するような摩擦力が瞬間的に働く。しかし、変化後のすべり量が L より十分に大きくなると、 $(a-b)$ が負であれば μ は変化前より小さくなり、正であれば大きくなる。すなわち、前者はすべり速度弱体化であって高速の不安定すべり (地震性すべり) が発生しうるのに対し、後者はすべり速度強化であり、非地震性の準安定すべりが発生し、高速不安定すべりの核とはなりえない。 L は不安定すべりを発生させるために必要なすべり量を規定しており、臨界すべり量ともよばれる。これらのことから、すべり様式を支配する最も重要なパラメータは、 $(a-b)$ と L であることがわかる (図 12)。東海地震の想定震源域に対応するプレート境界は、不安定すべりが起きやすい $a-b$ が負の領域にあたる深さ約 10~30 km の領域に位置している。これらのパラメータ、 a 、 b の温度などへの依存性については、岩石のすべり破壊実験によって調べられている。さらに、これらのパラメータの値を変えてプレート境界のすべりに関する数値シミュレーションを行うと、再現される巨大地震の再来周期やプレート間のカップリングの深さ分布などが変わってくる。このことを利用して、摩擦パラメータの深さ分布を試行錯誤的に推定することができる。深部における一定速度のプレート相対運動による荷重、プレート境界のすべりによる 2 次元媒質中の応力変化の解析解、さらに微分方程式で記述される Ruina のすべり速度/状態依存摩擦法則を組み合わせ、数値計算によりプレート境界のすべりの時間的发展が得られる。

4.2 数値シミュレーションによる前兆予測

東海地震の直前には監視観測のデータにどのような異常が現われるであろうか。上盤 (陸のプレート) および下盤 (フィリピン海プレートのスラブ) 内部での応力状態とその変化、それらがプレート境界の固着域に与える影響などをシミュレーションにより推定し、監視観測によるデータの解析結果と比較することは、東海地震が切迫性についての状況判断を行うための手法の一つと考えられる。GPS 観測データのインバージョン解析、内陸から海域にかけてのプレート境界の構造探査、地震発生メカニズム解析、地震波伝播、地震発生様式などについての総合的な研究から、プレート境界のカップリングの時間・空間的分布が間接的またはある程度直接的に把握される可能性が生まれつつあり、より詳細な情報がえられるであろう。しかし現在のところ、プレート境界のカップリング状態とその履歴について確実な情報をえる直接的な観測手段はない。この点を補うものとして、摩擦構成則に基づくシミュレーションが行われている。シミュレーションの制約条件であるパラメータの値の選択には、観測事実を考慮すべきであるが、パラメータ値に対応する実測値はある程度推定可能なものもある。

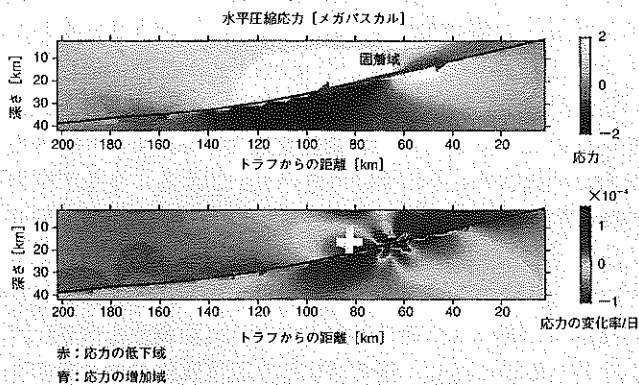


図13 プレート境界とその周辺における応力状態およびその変化に関するシミュレーション結果の一例(加藤尚之による計算結果をStefan Wiemerが図示化)。上図:地震発生1.3年前における、水平圧縮応力の空間分布。明るい部分は応力の高い領域、暗い部分は応力の低い領域を示す。下図:1日当たりの応力の変化¹³⁾。

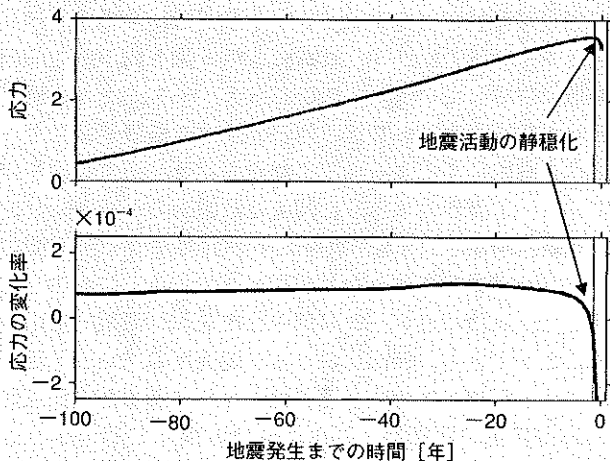


図14 固着域下端付近の上盤側地殻内の点(図13の下図中の+印の場所)における応力および応力増加率。地震発生直前に応力が顕著に低下する¹³⁾。

るが、確かな知識が得られていないものが多い。実測値または推定可能な値がえられているものとしては、プレートの相対速度や沈み込み角度、巨大地震の繰り返し周期、平均カップリング効率などがあげられる。将来、GPS観測データから年々のバックスリップ(プレート間がすべらず、固着して、上盤側の陸のプレートが引き摺り込まれる動きおよびその量)の蓄積が明らかになってくれば、シミュレーションに必要なパラメータの分布について、さらに詳しい情報が得られることになる。今の段階では、パラメータの推定に相当な自由度があるが、既知の制約条件を考慮しつつパラメータの値を変化させていったシミュレーションの結果では、非地震性の準安定すべりや地殻変動の現われ方に関して、おおよそ同じような傾向の変化が認められる。

以下シミュレーションから予想される前兆現象については、主として文献13)の論文に基づいて述べる。数値シミュレーションによる予測(図13)では、東海地震発生1.3~1.0年前になると、水平圧縮応力と応力の時間的変化率がプレート境界面を境にして、上盤(陸のプレート)と下盤(フィリピン海プレートのスラブ)で著しく対照的な

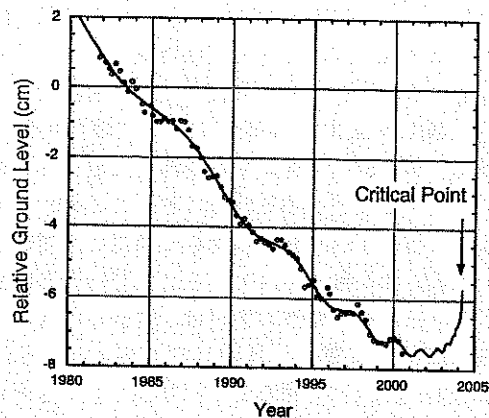


図15-(a) 掛川-御前崎間の相対的な水準の経年的な変化(観測値を○印で示す。曲線の当てはめは五十嵐¹⁴⁾による。)(国土地理院による)

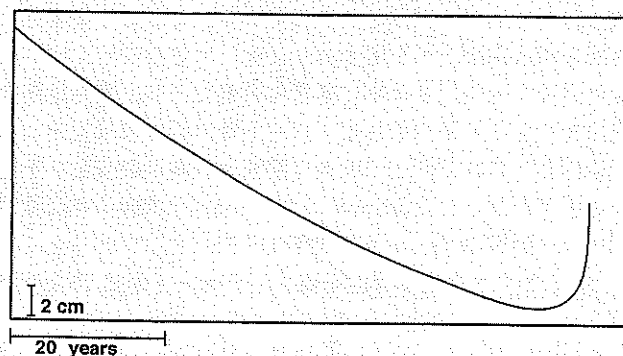


図15-(b) 掛川-御前崎間の相対的な水準の経年的な変化に関する変化曲線の当てはめシミュレーション結果の一例。御前崎の沈降は地震発生の数年前から停滞し、直前に上昇に転じている。

分布を示し始める。すなわち、プレート境界面の固着域(プレート境界面で大きな摩擦力が働き、プレート間のカップリングが強い領域)より深い側の陸のプレート内では、強い水平圧縮応力が蓄積されているのに対して、その下のフィリピン海プレートのスラブ内では逆に応力は減少する。上盤側の応力の顕著な増加は、トラフ軸から120 km以上内陸部に入った長野・愛知県境付近にまで及ぶ。一方、応力の変化率は、固着域の深い側の端付近の地殻内と、浅い側の端付近のスラブ内で、応力の低下が大きい。これは、固着域の深い側と浅い側の両方から次第に固着状態の緩み(プレート境界面のはがれ)が生じることによる非地震性の準安定すべりの発生を示している。固着域下端付近の上盤側地殻内の点について見ると、応力の増加は地震発生の数年前から止まり、1~2年前から減少に転じる様子が見られる(図14)。これは、水平圧縮応力場に関係した地殻内の地震活動が、地震発生の1~2年前から低下する可能性を示唆しており、これは地震発生に先立って地震活動の静穏化が見られるという経験的事実と符合する。また、固着状態の緩みの進行に伴って、それまでの圧縮応力場が伸張応力場に変わり、地震のメカニズムが変化することも考えられる。

バックスリップは、地震発生の70~80年前には、トラフからの水平距離が10~60 kmまでの広い範囲で増加・蓄積されていくが、5~25年前には30~40 kmの狭い範囲での

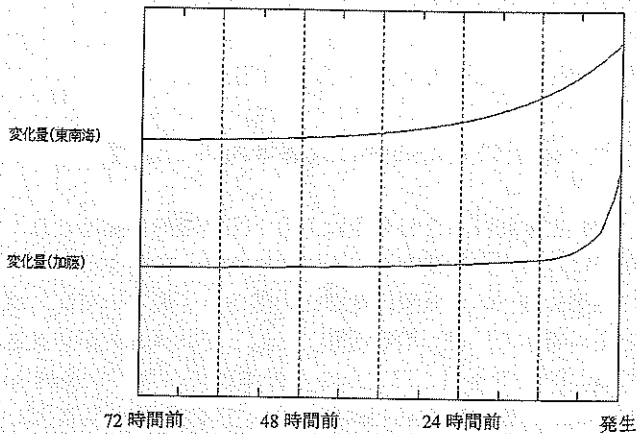


図16 上：東南海地震の直前に水準測量によってとらえられた傾斜変化の時間的推移をなめらかな関数で表現したもの。
下：数値シミュレーションから推定されるプレスリップに伴う歪変化の時間的推移。上図と最終的なすべりの規模が同じになるように規格化してある。(気象庁資料)

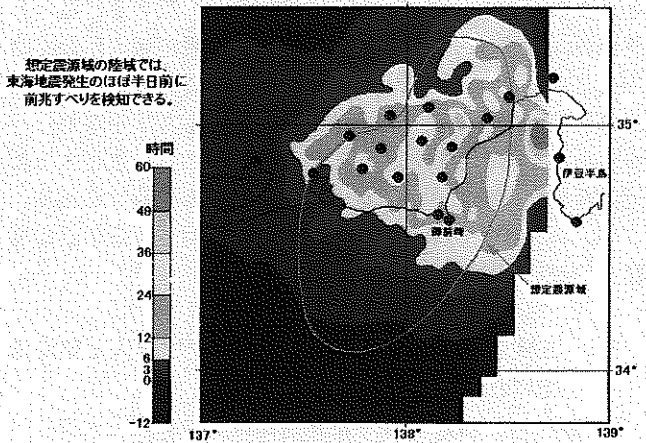


図17 M6.5相当の規模のプレスリップが任意の地点の直下で発生した場合、そのプレスリップを検知した時点から地震発生にいたるまでの時間の分布と歪計の設置点。歪計の設置点の密度が高い地点ほど、その直下で発生したプレスリップを早期に検知できる。想定震源域の陸域部分については、地震発生のほぼ半日前にはプレスリップの検知が可能であるが、海域直下でプレスリップが発生した場合には、プレスリップの検知は困難であり地震発生は突発的となる。(気象庁資料)

み大きな増加率を示している。これは強く固着している領域が、次第に限定されてきて、それ以外の領域では非地震性のすべりの割合が大きくなっていくことを示している。また数値シミュレーションによると、地震発生の数年前から掛川に対する御前崎の沈降が鈍り始め、地震発生の直前には、海側の御前崎が急激に隆起に転じることが示される(図15-a, -b)¹⁴⁾。歪変化は、内陸側で縮み、海岸付近で伸びという違いはあるが、いずれも地震発生の1日前ぐらいから加速的に変化が大きくなる。ただし、数値シミュレーションはきわめて単純なモデルに基づくものであり、その結果をそのまま受け入れて監視観測を行うことはできない。しかし、破壊直前のゆっくりとした準安定すべりは、種々の条件下の室内実験で検証・再現される現象であり、この準安定すべりが急激な不安定すべりに移行する寸前の段階に対応するプレスリップを可能な限り早期に検知し、

東南海地震の直前予知に結びつけることは、理論的な考察結果と過去の巨大地震についての経験的事実から見ても、きわめて合理的である。

歪計観測による異常変化が前兆すべりによるものであるとの判断の基準は、1) 歪の変化量が、プレート境界に沿った逆断層で説明可能なこと、2) 各観測点での異常変化が同期しており、時系列の関数系が互いに同一と見なせること、3) 2)に加えて、変化傾向が加速的であることの3点である。また、前兆すべりに伴う歪変化を検知する可能性は、1) 前兆すべりの規模、2) その発生場所、3) すべりの時間的な加速特性に加えて4) 歪計観測点の分布と5) 各観測点の歪変化検出可能レベルの5点の条件に依存する。

これら前兆すべりについての3点の判断基準と、5点の検知可能性の条件を組み合わせることにより、前兆すべり発生の検知確認から東南海地震発生にいたるまでの時間を予測することができる。その場合、歪計観測点の分布と各観測点の歪変化検出可能レベルは既知であるため、前兆すべりの規模と発生場所について様々なケースを想定し、さらにすべりの時間的な加速特性を与える。すべりの時間的な加速性については、東南海地震の直前に掛川付近で実施された水準測量によりとらえられた傾斜変化の時間的推移を

平均的な地殻変動からのずれ (精密暦)

○平均的な変動として、1998年1月~2000年1月までのデータから平均速度及び年周変化を推定し、時系列データから除去している。

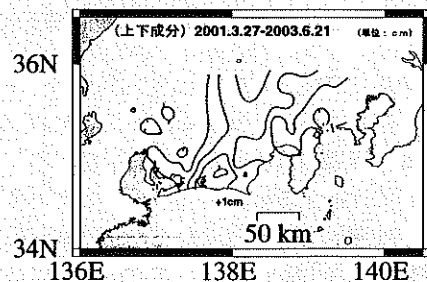
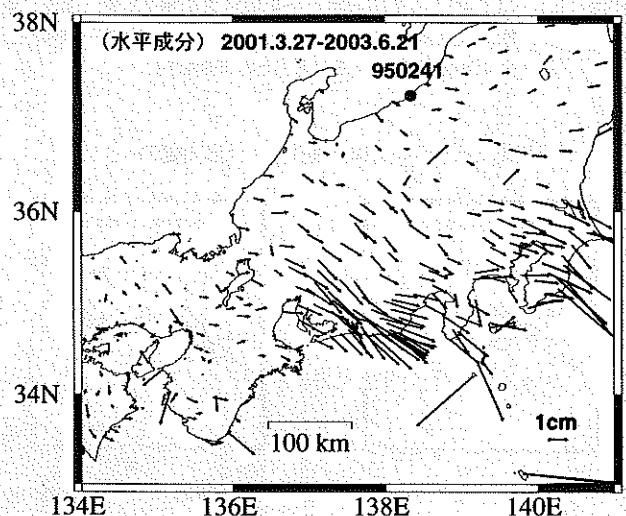


図18-(a) GPSによって観測された東海地方における異常な地殻の水平変動(平均的な変動からのずれ)。下の付図は、水平変動から推定されるプレート境界のスロースリップを基にして計算によって推定された上下変動を示す。(国土地理院資料)

2000年1月までのデータから平均速度及び年間変化を推定し、全体の期間から取り除いている。

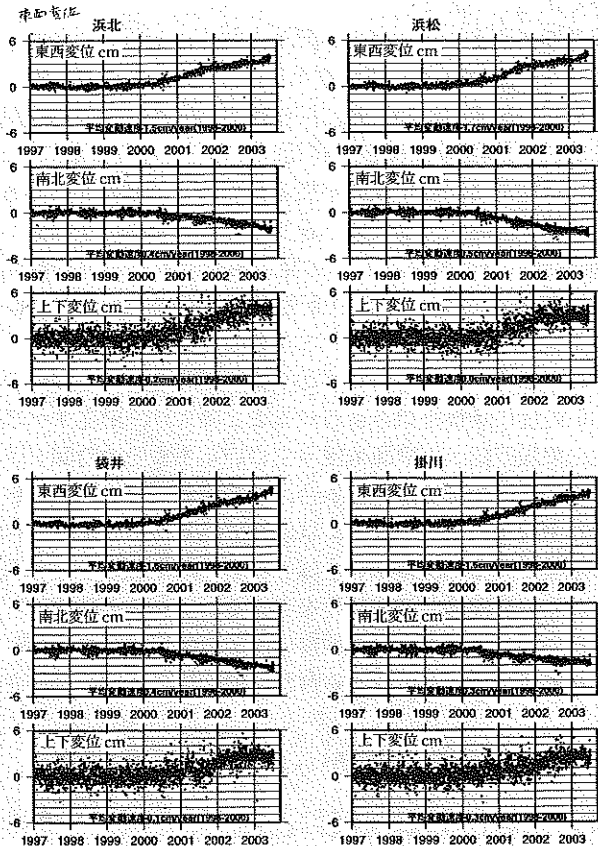


図 18-(b) GPS によって観測された東海地方の地殻変動 (浜北, 浜松, 袋井および掛川の各観測点における変動の時系列。大湊を固定点とする) (国土地理院資料)

推定すべり分布の時間変化 大湊固定データ

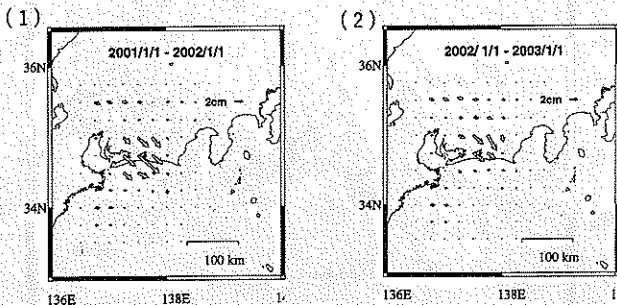


図 18-(c) GPS 観測データから推定されるスロースリップのすべり分布 [(1) 2001年1月1日~2002年1月1日および (2) 2002年1月1日~2003年1月1日の期間についてのすべり分布] (大湊を固定点とする)。(国土地理院資料)

なめらかな関数で表現したものと、シミュレーションモデルから推定されるプレスリップに伴う歪変化の時間的推移が用いられる。両者の最終的なすべり規模が等しくなるように規格化して比較すると、シミュレーションモデルの方が、地震発生直前になって歪変化が急速に加速することが分かる(図 16)。気象庁では、歪計の観測データに現われる変化を、1時間、3時間、1日といった各時間階差について、それぞれ異常と判断されるレベルを設定し、常時・連続で監視している。このような観測・解析の結果から、現在の気象庁の歪計観測網は、プレスリップが想定

震源域・陸域直下のどこで発生した場合についても、東海地震発生のおぼ数時間前にはプレスリップを検知できる能力を持っていると考えられている(図 17)。

5. 最近の異常活動と東海地震の切迫性

判定会委員打ち合わせ会は毎月1回定期的に開催され、新たに得られた観測データを中心に議論・検討を行い、その結果に基づいて気象庁地震火山部から「最近の東海地域とその周辺の地震・地殻活動」と題してコメントが発表される。2000年6月、三宅島から神津島にかけて全長約30kmにわたる開口割れ目に沿って大量のマグマが貫入した。それを契機に東海地方ではスロースリップ(ゆっくりすべり)という異常地殻変動が発生したが、その変動は2003年7月現在もまだ引き続けている(図 18-a, b, c)。この異常変動の原因は、東海地方のプレート境界が浜名湖付近直下を中心に年間2~3cmの速度ですべり出したことによる。このスロースリップの中心は、浜名湖付近から北東方向へ移動・拡大し東海地震の想定震源域の西縁で踏みとどまっている。しかし、その一方、このスロースリップの累積に伴い、想定震源域の西縁部で応力集中が進行しつつあると考えられる。この応力集中がさらに進行すると近い将来にプレスリップが引き起こされる可能性がある。このスロースリップとそれに関連して注目される最近の地震・地殻活動の事例について概観する。

5.1 三宅島の火山噴火活動に伴うマグマ貫入と東海地方におけるスロースリップの発生

2000年8月1日、気象庁地震火山部による判定会委員打ち合わせ会のコメント：「東海地域においては、地殻内および潜り込むスラブ内において目立つような地震活動はなく全般的に静かな状況が続いています。駿河湾およびその西岸の地震活動は、先月に引き続き回復の傾向が認められますが、全体としてはなお低い状態が継続していると考えられます。三宅島の火山活動、新島・神津島近海の地震活動等による僅かな量の体積歪変化が東海地域で観測されていますが、現時点では東海地域の地震・地殻活動に影響を与える可能性はありません。」

このコメントが発表された2000年8月の時点では、三宅島から神津島にいたる全長約30kmの開口割れ目とそれに組み合わせられた横ずれ断層の運動により、異常な水平地殻変動が、東海地方については浜名湖付近まで、南関東については霞ヶ浦にまで及んだことがGPSによって観測された。これに伴って東海地域ではわずかな量の体積歪変化が観測された。その後、2001年4月3日静岡県中部の地震(M5.1)が発生した。浜名湖周辺を中心にしてプレート境界のスロースリップが始まったのは、2000年の後半から2001年の前半にかけての時点である。このような観測事実から、三宅島噴火に伴う三宅島から神津島にかけてのマグマの貫入による開口割れ目の形成およびそれに伴う広域応力場の変化は、東海地域におけるスロースリップ発生のきっかけとなったと考えられる。

5.2 2001年4月3日静岡県中部の地震 (M5.1)

2001年4月27日、判定会委員打ち合わせ会のコメント：「東海地域においては、4月3日に静岡県中部の深さ33kmでM5.1の地震が発生し、静岡県内で最大震度5強のゆれを観測しました。静岡県中部でM5以上の地震が発生したのは、1965年4月21日 (M6.1) 以来でした。今回の地震は沈み込むスラブの上面付近で発生し、最大M4.0の余震を伴いましたが、余震活動は順調に減衰していることから、今回の地震がただちに東海地震に結びつく恐れはないと考えています。

一方この地震の発生をきっかけとしてスラブ内では余震域の周辺で地震活動の一時的な活発化が認められました。スラブ内の地震活動はその後減少に向かっていますが、今後の活動については、しばらく推移を見守る必要があります。駿河湾およびその西岸域の地殻内の地震活動については、今回の地震に伴う変化は観測されず、やや活動の低い状態が依然として継続しているように見えます。この地震に伴って震源の周辺で体積歪計に歪みのステップが観測され、一部の観測点では余効変化が観測されていますが、観測点周辺の局所的な変化と考えられ、異常な地殻活動に結びつくものとは考えられません。」

2001年4月3日、静岡県中部の地震はどのような背景の下に発生したのだろうか。この地震が発生する約9カ月前の2000年7月1日から8月18日にかけて、新島・神津島近海ではM6地震が5回発生した。新島・神津島近海の地震活動と静岡県中部の地震は数カ月～一年程度の期間以内で連動する傾向が知られている¹⁵⁾。この静岡県中部の地震もその一例に含まれる。また2000年7月以降には、静岡県中部一帯でフィリピン海プレート内部でのM3クラスの地震発生数が増加していた(塚越ら)。静岡県中部と新島付近の地震活動が連動する背景には、新島-石廊崎-静岡県中部を結ぶ右横ずれのスラブ内構造線の存在が考えられる。このように、静岡県中部の地震と浜名湖直下を中心としたスロースリップの発生という一連の広域的活動は、三宅島の噴火活動とそれに伴う開口割れ目の形成に起因する可能性が高い。しかし、このコメントが発表された2001年4月27日の時点では、スロースリップ発生の確認には至っていない。

5.3 東海地方のスロースリップ

2002年9月30日、判定会委員打ち合わせ会でのコメント：「東海地域および周辺の地殻変動には、国土地理院の観測によれば、昨年からの長期的な変化が認められ、現在でも依然として継続しているように見えます。この変動は、陸のプレートがフィリピン海プレートに対して、おおむね南東方向に、年間2~3cm程度かそれ以下のゆっくりとした速度ですべてていることに起因すると見られます。主なすべり領域は、当初、浜名湖付直下にありましたが、その後、北東方向にやや拡散しました。このすべりは東海地震の想定震源域の外の非地震性すべりと考えられ、そのすべりの総量はモーメントマグニチュードで6.8程度に相当すると考えられます。現在のところ、この変化はゆっくりと

したもので、他の東海地域の体積歪計などの観測項目を含め、東海地震に直ちに結びつくような変化は観測されていません。」

2003年7月現在も引き続けているスロースリップが、長期的には過去にも繰り返して発生していたかどうかという疑問が残る。このスロースリップが、「一過性の異常変動」、「定常的変動の一つ」あるいは「東海地震発生へ向かう前兆的過程」であるかを現時点で識別することは重要であるが、きわめて困難な課題である。現在スロースリップが発生している地域の周辺では、1944年東南海地震や1945年三河地震が発生しており、それらに伴う地殻変動はスロースリップの累積を大きく上回るであろう。そのため、たとえ過去にスロースリップが繰り返し発生していても、それを過去に発生した大地震に伴う変動と分離し定量的に評価することは容易ではない。スロースリップから推定される地殻の上下変動の分布パターンを見ると、その隆起域の中心が水準測量による永年的な変動の隆起域と東海地方についてはほぼ一致しているが、その意味を解明は今後の課題である。比較的最近の期間については、1980年代に東海地方でスロースリップが発生した可能性が指摘されているが、橋本¹⁶⁾は1980年代の三角測量データから異常な歪変化の発生の可能性と1970年代に遡ってデータを見直すことの重要性を指摘している。

すでに約3年間にわたりスロースリップによるすべり量が累積されつつあるが、歪計の記録にはそれに対応するような変化は現れていない。GPS観測によれば、現時点でプレート境界は年間2~3cm程度の速度ですべてっていると推定されるが、この速度が2カ月前後で2~3cm程度にまで加速すると、歪計によってすべりが検出されることになる。一方、数日間程度の短期間の歪変化については、GPSの分解能は0.1~1マイクロストレイン程度であるのに対し、歪計は気圧・潮汐補正などを施すことにより分解能は0.001マイクロストレイン以下となる¹⁷⁾。プレスリップの検出には、歪計の0.001マイクロストレイン以下という高分解能が不可欠である。東海地震の監視観測では、プレート境界のスロースリップをGPSにより数カ月程度以上の中・長期的な視点で追跡し、滑りが加速性を帯びてきた時点以後は主として歪計により数日間程度の短期的な視点でプレスリップの検出を行うことになる。また、GPS観測の結果には、年周的な季節変動のパターンが含まれており、それが2000年頃を境に変化している。その変化は、観測網全体で系統的であり、スロースリップの解析に影響を及ぼすことが指摘された¹⁸⁾。

現在続いているスロースリップから推定される地殻の隆起が、実際に生じていることが傾斜計による実測値から確認されている。すなわち、三ヶ日および豊橋には傾斜計が設置されているが、これらの2点では、スロースリップから推定される地殻の隆起ゾーンの北西縁にあたり、計算による推定結果が正しければ、地殻は0.1~0.2マイクロラジアン程度の傾斜で隆起の中心から西に向かって傾き下がっているはずである。三ヶ日および豊橋の傾斜計には、この推定に対応する傾斜変動が記録された。さらにスロースリップ

による隆起ゾーンが東ないし北東へ拡大していると推定されるが、この傾向は太平洋沿岸に沿う路線の水準測量によって確かめられた。このようにスロースリップの拡大状況は、GPSのみならず傾斜計および水準測量のデータによっても局所的にチェックすることができた。スロースリップのすべり量は、年間2~3 cm程度というきわめて小さな量であるが、その変化をある程度詳細に追跡できることがわかった。今後はGPSと歪計の組み合わせで、同一の地殻変動がどのように捉えられるか実測で確認する必要がある。

5.4 御前崎の沈降の停滞

2002年10月25日および12月24日、判定会委員打ち合わせ会のコメント：

「東海地域およびその周辺において、昨年からの長期的な地殻変動が依然継続しています。その原因となるプレート境界のゆっくりすべりの状況に特段の変化は見られません。なお、国土地理院による水準測量およびGPS観測により、御前崎付近で沈降不足と見られる微小な変化が観測されていますが、周辺の体積歪計ではこれに対応するような変化はみとめられません。現在のところ、東海地震にただちに結びつくような変化は観測されていません。」

御前崎の沈降の減速や加速は、東海地震の中長期的な前兆現象である可能性があるが、季節変動がノイズとなってその検出が難しくなっている。このため、季節変動を解明することが、真のテクトニックな現象を検知するためにも重要である。従来、水準測量結果に見られる年周変化は、おおむね大気屈折によるものと考えられていた。今給黎は、この年周変化は水準標尺が南から日射を受けることにより、前視と後視の標尺の温度差が生じ、標尺の膨張量が異なることに起因することをつきとめた。また1999年後半以降は、自動レベル化し、観測時間が短縮されたため、標尺が日射を受けて生じる温度差が大きくならず、それが最近数年の年周変化が小さくなっている原因であろうと指摘した。国土地理院は、御前崎地方で精密水準測量に加え、GPS連続観測を実施し、東海地震の前兆現象を検出するための地殻変動の高精度化を図っている。呉ら¹⁹⁾は、水準測量と併行したGPS高精度比高観測データの蓄積および観測手法の検討により、GPSによるmmレベル精度の上下変動観測を確立しつつある。

これら御前崎周辺における地殻変動観測の高精度化にかかわる研究は、地殻変動の「ゆらぎ」の原因の解明を通して、最近見えかくなれるようになってきた東海地震発生直前の御前崎の沈降の停滞、それに引き続き発生すると予想される反転隆起の過程の始まりの早期検出に大きく貢献するであろう。

5.5 浜名湖周辺の地震活動の静穏化

2003年5月23日、判定会委員打ち合わせ会のコメント：

「現在のところ、東海地震にただちに結びつくような変化は観測されていません。地震活動は、浜名湖直下で通常より低下した状態にあります。全体としては落ち着いてい

ます。プレート境界のゆっくりすべりに起因すると思われる東海地域およびその周辺に見られる長期的な地殻変動は、最近では2001年に比べてやや小さいように見えるものの、依然として継続しています。」

浜名湖直下スラブ内の地震活動が静穏化し始めたのは1996年末ないしは1997年初め頃と考えられる²⁰⁾。この静穏化は、浜名湖直下を中心にしてスロースリップが始まった2000年9月から10月頃から浜名湖の東側半分を含む地域でその程度が極端化し現在まで続いている。もし、浜名湖直下の地震活動の静穏化がスロースリップと関連づけられるとするならば、微弱なスリップが1997年頃から始まっていた可能性があるが²⁰⁾、GPS観測の開始時期が1997年頃であるためその検証は困難である。モデル・シミュレーションによると、東海地震発生1~2年前から想定震源域の縁辺部で応力低下が急速に進行し、それに伴い局所的な地震活動の低下が始まり、その領域が拡大していく可能性がある。こうした可能性を考えると、地震活動レベルの時間空間的な変化を定量的な手法で評価することは、地震活動の監視観測に不可欠な要素である。塚越・石垣¹⁰⁾は、クラスターをあらかじめ取り除いたうえで地震活動を統計的に評価する方法、およびETASモデルを用いてクラスターまで含めて地震活動を評価する方法の二つの方法により、地震活動レベルを客観的に評価した。コメントに述べられている最近での浜名湖直下の地震活動の静穏化の評価はこの手法によるものである。浜名湖周辺の地震活動の顕著な静穏化はすでに約3年間も継続しており、スロースリップとともに今後の推移が注目される。

6. おわりに—注意情報(仮称)による防災対応準備行動の立ち上げ

6.1 東海地震対策大綱の概要

去る5月29日の中央防災会議において、東海地震に対する防災対策の基本的指針である東海地震対策大綱(以下大綱)が承認された。東海地震については、災害対策基本法と大震法とによって、①事前の予防、②直前の警戒宣言発令、③災害発生後の救急・救援という三位一体の対策を基本としている。しかし、従来から大震法に基づく対策に過大な比重を置くあまり、強化地域外では被害が生じないという誤解が生まれ、警戒宣言時の警戒・避難体制の確立のみに防災対策の重点が置かれるなど、是正すべき課題が指摘されていた。今回の大綱とは、本来の三位一体の防災対策の基本に立ち帰り、抜本的な見直しを行って、予防対策から復旧・復興までを含み、強化地域外も含めた全体的なマスタープランを打ち出したものである。その主なポイントは、i)被害軽減のための緊急耐震化対策等の実施、ii)地域における災害対応力の強化、iii)警戒宣言時からの的確な対応、iv)災害発生時における広域的防災体制の確立である。

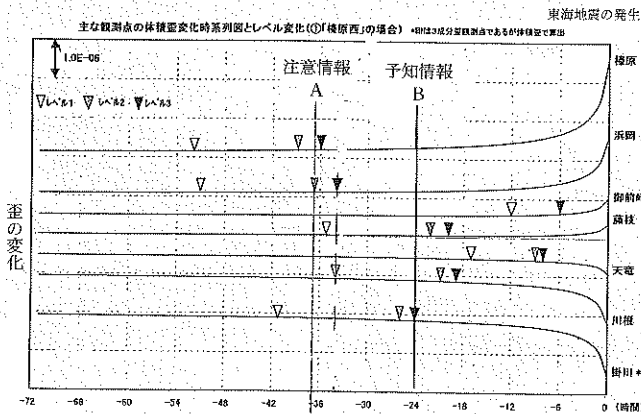
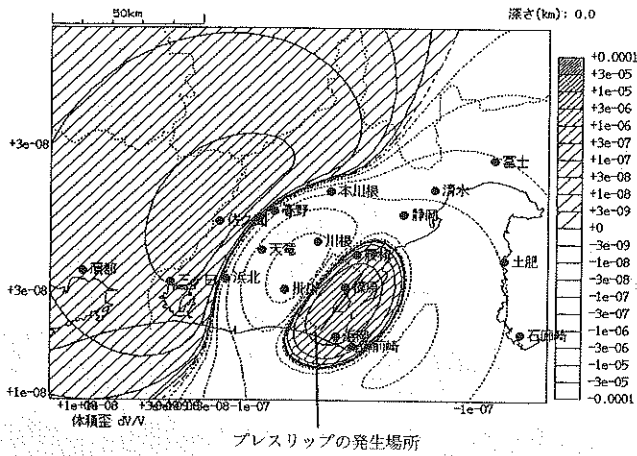


図19 主な歪計観測点の体積歪変化時系列図とレベル変化(プレスリップが榑原観測点の西側直下のプレート境界で発生した場合を想定)。縦線Aが注意情報(仮称)、Bが予知情報発信の時点に相当する。(気象庁資料)

6.2 歪変化の異状に基づく注意報の発信と準備行動の立ち上げ

警戒宣言は、東海地震を引き起こす断層運動のスタートを意味するプレスリップの検出・確認の直後に発信される。プレスリップは、東海地方の各点に埋設された超高感度歪計によって検出されるが、プレスリップ検出の限界レベルは、歪計の感度、ノイズレベル、観測点の密度およびプレスリップの加速性等に依存する。プレスリップが何時どの場所で発生するかは、プレート境界の応力状態の詳細がわからないので、事前に予測することは困難である。また、東海地震発生までの時間間隔は、概ね半日から数時間程度を目安とすべきであるが、さらに短い場合もありうる。そのため、気象庁はプレスリップの早期検知のための24時間連続の監視を行っている。常時連続の監視観測により、異

常な地震活動や歪変化が観測された場合、気象庁はその異常についての観測事実を「観測情報」として発表する。その後、観測された異常が、東海地震に直接つながらないと判断された場合には、その異常の原因、特徴、推移の状況および東海地震の発生につながらないと判断される理由などを「解説情報」として発表し、常時の監視体制に戻る。一方、「観測情報」の発表後、歪変化の異常が予め設定されたレベルを超え、プレスリップの可能性が否定できない場合には、「注意情報」(仮称)を発表し、防災対応の準備行動を立ち上げる。その準備行動とは、例えば学校の児童、弱者等の帰宅、旅行の自粛、救急救援のために実働部隊を拠点へ配備することなどがあげられる。警戒宣言の発令から地震発生までの時間が数時間あるいはさらに短い場合もありうる。それに先立って準備行動を立ち上げることは、警戒宣言が突然に発令された場合の地域住民の混乱防止や災害への迅速な対応等に大きな効果が期待できる。「注意情報」の発表後、歪変化が加速性を現わしてきた場合には、プレスリップが発生したと判断し、気象庁長官は「地震予知情報」を発表すると同時に、内閣総理大臣に対し東海地震発生へ向けて「警戒宣言の発令」を要請する。この要請を受けた内閣総理大臣は、閣議にはかり警戒宣言を発令し予め定められた手順に沿って警戒態勢が敷かれることとなる(図19)。

参考文献

- 1) 原田智史ほか：地震研究所彙報, 73, 291-304, 1998.
- 2) Ishida, M.: J. Geophys. Res., 97, 489-513, Japan, 1992.
- 3) 松村正三：月刊地球, 号外14, 81-92, 1996.
- 4) 野口伸一：1996, 地震2, 49, 295-325, 1996.
- 5) 東海沖海底活断層研究会編：東海沖の海底活断層, 1999.
- 6) 上垣内 修ほか：月刊地球, 号外33, 14-21, 2001.
- 7) 鷲谷 威：月刊地球, 号外33, 68-77, 2001.
- 8) 多田 堯ほか：科学, 67, 917-927, 1997.
- 9) 鷲谷 威：国土地理院時報, 88, 10-18, 1997.
- 10) 塚越ほか：月刊地球, 号外41, 101-109, 2003.
- 11) Kato, N. and Hirasawa, T.: Phys. Earth Planet. Inter., 102, 51-68, 1997.
- 12) Ruina, A. L.: J. Geophys. Res., 88, 10359-10370, 1983.
- 13) 吉田明夫：地震ジャーナル, 26, 11-24, 1998.
- 14) 五十嵐丈二：月刊地球, 号外33, 146-148, 2001.
- 15) 溝上 恵：月刊地球, 号外33, 44-66, 2001.
- 16) 橋本 学：月刊地球, 41, 20-26, 2003.
- 17) 吉川澄夫：月刊地球 41, 35-40, 2003.
- 18) 山本剛靖：月刊地球 41, 71-76, 2003.
- 19) 呉 新華：月刊地球 41, 63-70, 2003.
- 20) 松村正三：月刊地球 41, 78-87, 2003.