（5） 気象庁

1．はじめに

気象庁は長年にわたって全国の地震活動を観測・監視し，緊急地震速報，津波警報等の防災情報を社会へ発信するとともに，地震活動の評価や調査研究の基礎となる地震活動のデータベースを作成・提供してきた．

この 10 年の間に，平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（以下，東北地方太平洋沖地震という）や平成 28 年（2016 年）熊本地震（以下，熊本地震という）などの大きな被害をもたらす地震が発生し，地震や津波の防災情報に関する課題が生じた．一方で，科学の進歩や ICT 技術の進展，海域での地震津波観測網の充実などにより，気象庁が行う防災情報の発表や，地震活動の解析に関わる環境も大きく変わってきた．ここではこの 10 年の気象庁の取組みを概観する．

2．地震観測データの一元化処理の改善

気象庁では，平成 9 年 10 月以降，全国の関係機関の地震観測データをリアルタイムで収集し，震源決定等の処理を一元的に行っている（一元化処理）．その結果は「地震カタログ」として公表され，地震の活動評価や調査研究等に利用されている．

従来の作業では，トリガ方式で自動検知された全てのイベントを手動検測（地震波の到着時刻・振幅の読み取り）し，震源を決定してきた．そのため，地震が多発すると処理に時間を要し，地震活動の早期把握が困難となっていた．また，近年の日本海溝や南海トラフ等における海域観測網の整備によって，検知できる地震数の増加が見込まれた．そこで，従来のトリガ方式に加え，新たな地震検知・検測の自動処理手法として PF 法を導入し，その検測値及び震源を利用した新たな作業手順を平成 28 年 4 月に導入した．

PF 法とは，各観測点で多数の地震波の到着時刻と最大振幅を自動検測し，それらの最適な組み合わせを，過去震源分布等の先験的な情報を加味しベイズ推定を用いて探索する震源推定手法である（相組み合わせ探索，Phase combination Forward search）．

新たな一元化処理では，地域と深さに応じて設定した M のしきい値（例えば内陸の浅い地震は M1.7 など）を設けて，閾値以上の規模の地震は従来同様の手動検測を行う．一方，閾値より規模の小さい地震は自動処理結果を大幅に活用した検測処理を行い，地震カタログの精度維持と処理能力向上のバランスをとった処理としている．

また，西南日本の南海トラフ沿いの深部低周波地震については，従来のトリガ方式に加え，新たな地震検知手法として Matched Filter 法を用いた自動処理を平成 30 年 3 月に導入した．この処理では，過去の深部低周波地震の震源と波形をテンプレートとして，その震源近傍のイベント波形が類似することを利用して地震を検知し，処理対象地震とテンプレート震源との相対的な震源位置を求める．

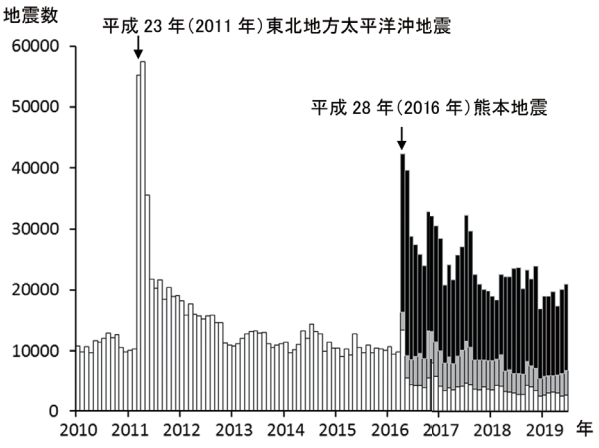

図 1　一元化震源カタログの月別地震数（2010 年 1 月～2019 年 6 月）．グラフの白色は精査検測震源，灰色は簡易検測震源，黒色は自動震源を示す．

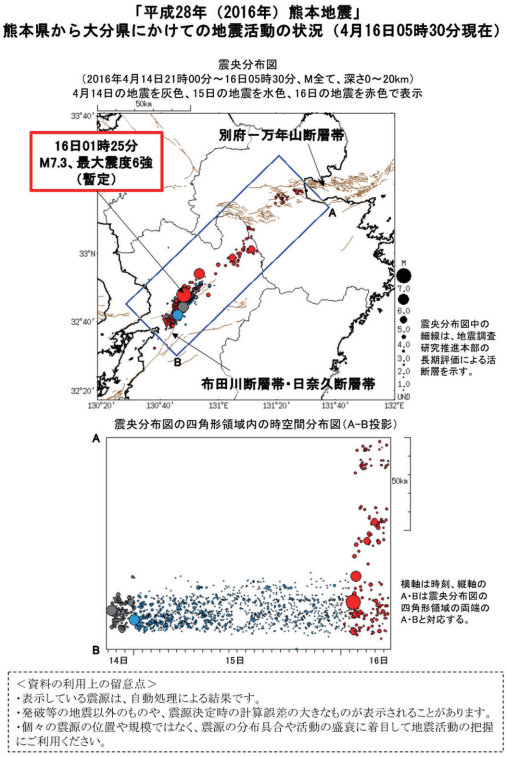

図 2　平成 28 年（2016 年）熊本地震の一連の活動のうち，2016 年 4 月 16 日 M7.3 の地震発生から約 6 時間後の気象庁報道発表第 8 報．

これにより，相の立ち上りが明瞭でなく一般の地震と同手法での自動検知が難しい多くの深部低周波地震を検知できるようになった．

これらの導入に伴い，地震カタログに登録された全国の地震数は，導入前の約 2 倍となり，自動震源が全体の約 6 割（導入前は全て手動検測による震源）となった（図 1）．また，大地震直後においても，精度の良い規模の小さな地震を含むより多くの自動処理震源データを迅速に提供できるようになり，大地震発生後の活発な地震活動の推移を迅速に把握できるようになった（図 2）．

3．地震活動に関する見通し情報の改善

被害を伴うような規模の大きな地震が発生すると，一般的にはその後も活発な地震活動が継続し，その地震活動によって被害が拡大する可能性もあることから，大地震後の地震活動の見通しを示すことは防災上重要である．

気象庁では，従前，地震調査委員会が平成 10 年にとりまとめた手法[1)]にもとづき，大地震後の防災上の呼びかけで，余震確率を用いた注意喚起を適宜行ってきた．

平成 28 年の熊本地震では，4 月 14 日 21 時 26 分に M6.5 の地震が発生し，熊本県益城町で震度 7 を観測し，その後，地震活動は活発に推移した．気象庁では，従来通り余震確率の評価手法にもとづき，M6.5 を本震として，余震発生確率を計算し，4 月 15 日に「今後の余震活動について，ところによって震度 6 弱以上の揺れとなる余震が発生する可能性は，2016 年 4 月 15 日 16 時から 3 日間で 20%，震度 5 強以上となる可能性は 40%」と発表した．しかし，M6.5 の地震発生から約 28 時間後の 4 月 16 日 1 時 25 分に，より規模の大きい M7.3 の地震が発生し，熊本県の西原村と益城町で再び震度 7 が観測された．

この事例により，従来の余震確率に基づく地震活動の見通しの発表に関して，本震―余震型の判定条件や「余震」という用語の用い方などの課題が明らかになった．

地震調査委員会は，この課題に対し，地震活動の予測的な評価手法検討小委員会で平成 28 年 6 月から 8 月にかけて検討を行い，同年 8 月に「大地震後の地震活動の見通しに関する情報の在り方」(報告書)[2)]をとりまとめた．

この報告書では，地震発生直後から 1 週間程度までは，一般に本震―余震型で地震活動が推移するかどうかの見極めが困難であるため，最初の大地震と同程度の規模の地震への注意を呼びかけることを基本とし，過去事例や地域特性にもとづいた見通しを呼びかけることとされた．地震発生から 1 週間程度経過した後，上記に加え，それまでの地震活動に本震―余震型の特徴が見られる場合には，余震確率にもとづいた数値的な見通しを付加して呼びかけることとされた．ただし，地震活動への注意を呼び掛ける際には，受け手側が理解しやすいように，確率の数値ではなく，最大震度〇以上となる地震の発生確率は，「当初の 1/〇程度」，「平常時の約△倍」等の表現を用いることが適切とされた．

また，「余震」という言葉は，最初の地震よりも規模の大きな地震は発生しないという印象を与えることから，大地震後の地震活動についての防災上の呼びかけにおいては，不用意に「余震」という言葉を使うのではなく，「地震」という言葉を使用することが望ましいとされた．

気象庁は，この新たな報告書の方針にもとづき，大地震後の地震活動の見通しに関する注意喚起を行っている．

4．南海トラフ地震に関連する情報

気象庁は，1979 年から約 40 年，地震防災対策強化地域判定会を運営し，東海地域を対象に地震予知に基づく情報を発表する体制をとってきた．しかし，東北地方太平洋沖地震の発生をきっかけとして，地震の予測可能性や南海トラフ地震に対する新たな防災対策の議論が行われ，その結果，南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会を新たに設置し，南海トラフ全域を対象に「南海トラフ地震に関連する情報」を発表する体制へと移行した．

この 10 年における，東海地震を対象とした情報の変遷及び新たな「南海トラフ地震に関連する情報」の詳細については，第 3 部 4. を参照いただきたい．

5．津波警報の改善

5.1　東北地方太平洋沖地震を踏まえた改善

東北地方太平洋沖地震による未曾有の災害，特に津波による甚大な被害は，気象庁の津波警報のあり方に大きな課題を提起するものであった．

気象庁は津波警報の改善を図るため，有識者等からなる検討会等を開催し，津波警報の初期段階に推定した地震の規模や，それにもとづき予想した津波が実際より過小となった要因，発表した津波警報の内容・タイミング等を検討・検証した上で，2012 年までに津波警報改善の方向性や発表基準，避難行動に資する情報文のあり方等をとりまとめた．これらの結果に基づき，2013 年 3 月から以下の点等について改善した津波警報や津波観測に関する情報の運用を開始した．

①津波警報の改善

津波警報は 3 分程度で発表する必要があるが，マグニチュード 8 を超えるような巨大地震では，正確な地震の規模を即時に推定できず，過小に評価してしまう危険性がある．そのため，地震の規模が過小評価されている可能性を速やかに判定し，その可能性が確認された場合は，地震が発生した海域で想定される最大級の津波高を

用い，安全サイドに立った津波警報の第一報を発表することとした．このような場合には，予想される津波の高さは「巨大」や「高い」という言葉で発表して非常事態であることを伝え，その後，正確な地震の規模が分かった時点で津波警報を更新し，予想される津波の高さを数値で発表することとした．

②津波観測に関する情報の改善

津波は後からやってくる波の方が大きい場合も多い．そのため，津波の観測状況を伝える津波観測に関する情報では，観測値が予想される津波の高さより大幅に低い間は，観測結果を数値では表さず「観測中」と発表し，安心情報と受け取られないようにすることとした．

5.2　沖合での津波観測の充実

気象庁では，沿岸に加え，沖合の津波観測データも監視している．この 10 年，沖合で津波や波浪の観測を行う海底津波計[3]や GPS 波浪計[4]の設置が進み，特に北海道から関東地方や三重県から高知県にかけての沖合には世界でも例を見ない高密度な沖合津波観測網が展開されている．これらのデータは，沿岸に到達する前に津波を観測できる可能性があり，防災上の効果が大きいことから，関係機関の協力も得てリアルタイムで入手し，津波警報・注意報の更新や「沖合の津波観測に関する情報（2013 年 3 月新設）」の発表に利用している．2019 年 11 月現在，情報で観測値を発表する沖合観測点は，海底津波計 214 地点及び GPS 波浪計 18 地点となっている．

また，複数の沖合観測点で観測される津波波形データから波源を推定し，その波源から津波が伝播する過程を，あらかじめ計算しておいた理論的な津波波形を合成することで把握し，沿岸への津波到達前に，沿岸での津波の高さを精度良く予想する手法（tFISH[5]）を開発し，2019 年 3 月より，津波警報の更新に活用している．

6．緊急地震速報の改善

気象庁は 2007 年 10 月に緊急地震速報の一般提供を開始し，同年 12 月には気象業務法を改正し同情報を地震動の予警報に位置付けた．以後 10 年余りが経過し，TV・ラジオのほか，緊急速報メール等により誰もがいつでも容易に同情報を受信できるようになった．

この間，2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では，大きな二つの課題が明らかになった．一つは，震源域が広範囲に及び，従前の推定震源に基づく手法では関東地方など震源から遠い地域に対して適切に警報を発表できなかったこと，もう一つは，活発な余震活動により，ほぼ同時に発生した複数の地震を一つの地震として処理し，震源および地震の規模を適切に推定できず，しばしば震度を過大に予測したことである．これらの課題に対応するため，IPF（Integrated Particle Filter）法および PLUM（Propagation of Local Undamped Motion）法という新たな手法を開発し技術的改善を図った．

IPF 法は，一つの地震か否かを判別する際，P 波の到達時刻に加えて揺れの大きさの情報も活用し，また従来別々に用いていたデータや手法を統合的に用いることで，同時に発生した地震を高い確度で識別し，より安定して精度の良い震源を推定する手法である．

PLUM 法は，震源や地震の規模の推定は行わず，観測された揺れの強さから近傍の予測地点の震度を直接求める手法であり，予測してから揺れがくるまでの時間的猶予は短くなるが，広い震源域を持つ巨大地震であっても精度良く震度を予測できる．

また，海底地震計では堆積層による地震波の増幅や地震時の強震動に伴う海底地震計の傾動・揺動によりマグニチュード推定が過大となることから，上下動のみの振幅の利用や震源近傍の観測データを除外するなどの対策を行って観測データを活用し，海域で発生する地震に対する震度の予測精度向上と情報発表の迅速化を図った．2009 年 8 月に東海・東南海沖のケーブル式常時海底地震観測システム，2015 年 3 月に地震・津波観測監視システム（DONET1）の一部観測点，2019 年 6 月には日本海溝海底地震津波観測網（S-net）および地震・津波観測監視システム（DONET2）の活用開始と，DONET1 の活用観測点の拡大を行った．

なお，これらの技術開発は公益財団法人鉄道総合技術研究所，国立研究開発法人防災科学技術研究所，国立大学法人京都大学防災研究所と気象庁との共同研究や技術協力の成果である．

7．長周期地震動に関連する情報

大地震に伴って発生する長周期地震動は，震源から遠く離れた地域で長大構造物等を大きく揺らし，被害を発生させる．東北地方太平洋沖地震では，大阪市内の高層建造物で，内装材の被害やエレベーター閉じ込めが発生した．

このため，気象庁では，2011 年度以降，有識者による検討会（2011 年度：長周期地震動に関する情報のあり方検討会，2012 ～ 2018 年度：長周期地震動に関する情報検討会．以下，検討会）を開催し，長周期地震動に関する情報のあり方について検討を進めた．

この検討結果を受け，2013 年 3 月に，高層建造物高層階等での揺れによる行動の困難さなどを表す指標として長周期地震動階級（階級 1 ～ 4）を定め，気象庁ホームページで同階級等の観測情報の試行提供を行い，必要な改善を行った上で，2019 年 3 月本運用を開始した．

長周期地震動の予測情報については，2013 年度から

検討を進め，気象庁が用いる同階級の予測式として，Dhakal et al.（2015）[6]の距離減衰式を用いることとした．

また，検討会では，同予測情報の発表方法として，国民に広く注意・警戒を呼びかけるため緊急地震速報に同階級 3 以上が予測される地域を追加すること，民間事業者による個々の高層建造物等への機械制御等も含めた利活用に資するきめ細かな「多様なニーズに対応する予測情報」を提供することが必要であるとされた．

後者については検討会の下に設置された「多様なニーズに対応する予測情報検討ワーキンググループ（以下，WG）」で利活用方法，予測技術，利活用にあたっての留意事項についてさらに検討・検証を行い，とりまとめた結果を報告書として 2019 年 3 月に発表した．

気象庁は，WG で整理した予測情報の社会実装に向け，防災科学技術研究所・民間事業者の協力の下，具体的な検討・検証を進めるため実証実験を実施している．

8．国際津波情報提供体制の強化

太平洋沿岸諸国が津波災害軽減の目的で組織した太平洋津波警戒・減災システム政府間調整グループ（ICG/PTWS）の枠組みの下，気象庁は，北西太平洋域で津波発生のおそれがある大きな地震が発生した際に，地震や津波に関する情報を速やかに周辺各国に提供する北西太平洋津波情報センター（NWPTAC: Northwest Pacific Tsunami Advisory Center）の業務を 2005 年 3 月から実施している．

NWPTAC は，北西太平洋域でマグニチュード 6.5 以上の地震が発生した際，震源及びマグニチュードに基づき，データベース上の津波数値シミュレーション結果から沿岸での津波の到達時刻及び高さを予測し，津波情報を発表していたが，2019 年 2 月からは，その後の地震観測データの解析から地震のメカニズムが判明した場合，それを用いた数値シミュレーションをリアルタイムで実施し，その予測結果に基づき，情報の更新を行うことで予測精度の向上を図っている．

また，2006 年 7 月から，南シナ海沿岸にも暫定的に津波情報を提供してきたが，2019 年 11 月 5 日，中国が南シナ海津波情報センターの運用を開始したことから，同情報の暫定提供を終了した．

さらに，2019 年 8 月から，ニカラグアでも中米津波警報センターが試験運用を開始した．ニカラグアでのセンターの運用開始にあたり，気象庁は，JICA「中米津波警報センター能力強化プロジェクト」に協力し，短期専門家の派遣及び気象庁での研修を通じ，同センター職員の技術力向上に貢献している．

現在運用中の太平洋域における津波情報を提供するセンターを図 3 に示す．この 10 年で，新たに 2 つの地域津波情報センターが運用を開始し，太平洋における津波情報の提供体制が強化されてきた．

インド洋沿岸諸国に多くの被害を与えた 2004 年 12 月のスマトラ島沖の地震で発生した大津波を契機に，気象庁は，2004 年 3 月から，インド洋に津波警報体制が構築されるまでの間，インド洋沿岸諸国にも暫定的に津波情報提供していた．2011 年 3 月から，太平洋と同様な目的で設立されたインド洋津波警戒・減災システムの政府間調整グループの枠組みにおいて，インド，インドネシア，オーストラリアが津波情報の提供を開始したため，2013 年 3 月に暫定情報の提供を終了した．

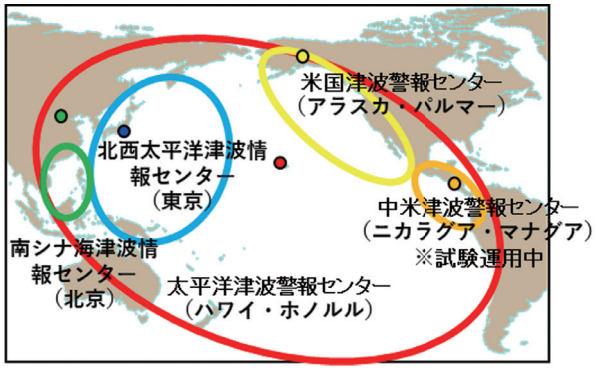

図 3　現在運用中の太平洋の津波情報センター

9．システム等の整備・強化

気象庁では，国内外の地震・津波や地殻変動等をリアルタイムに監視し，地震発生後の緊急地震速報，津波注・警報，南海トラフ地震に関連する情報及び地震・津波情報等を迅速かつ的確に発表するため，地震活動等総合監視システム（EPOS）を整備し，適切な業務運営に努めてきた．EPOS は，1987 年に初代を整備し現在運用中の EPOS は 5 代目となる．

2008 年～ 2009 年には，それまで各管区気象台・沖縄気象台に分散整備していた地震津波監視システム（ETOS），北西太平洋津波監視システム等の機能を統合するとともに，大規模災害時等においても確実に情報提供を継続できるよう，気象庁本庁及び大阪管区気象台を二中枢とし，両中枢間で冗長構成（地域冗長）を図り EPOS（4 代目）を更新・整備した．併せて，地域地震情報センターデータ処理システム（REDC）についても業務変更にあわせてシステム構成を見直し，二中枢にサーバを集約する等の整備をしている．なお，同 REDC は，1997 年に整備した初代に継ぐ 2 代目となる．（図 4）

更に，2010 年以降，防災科学技術研究所等データ（DONET 等）を活用した緊急地震速報の迅速化，津波シミュレーション技術を導入した津波警報等の精度向上と高度化等に伴い，順次 EPOS の処理機能を強化した．

また，東北地方太平洋沖地震で顕在化した巨大地震

に対するマグニチュードの過小評価や津波警報の内容等に係る課題を解決するため，地震津波観測網（広帯域強震計等整備）を強化するとともに，EPOS のハードウェア性能向上，処理機能を強化した．併せて長周期地震動分析装置を整備し，2013 年 3 月より長周期地震動に関する観測情報の試行（2019 年 3 月本運用に移行）にも対応してきている．

2015 年～ 2016 年には，更なる情報改善・高度化を図るため，現在運用中の 5 代目 EPOS を整備し，併せて 3 代目 REDC を整備した．

5 代目 EPOS は，津波評価解析装置等の統合，地震識別等自動処理の新規機能追加（同時多発地震対策（IPF 法），巨大地震・見逃し対策（リアルタイム震度の導入，PLUM 法等））及び津波警報等の更新に係る機能強化（CMT，W-phase 解析による Mw の活用，沖合津波計の高度利用（tFISH））のために必要な処理能力を確保するとともに，防災科学技術研究所が整備した S-net 等の観測データの大幅増に対応すべく処理能力を増強した．また，業務の信頼性確保，作業者の操作習熟及びソフトウェア変更時の評価・動作確認等のため，試験環境を新たに整備した．

3 代目 REDC は，地震多発時でもマグニチュード 2.0 以上の地震を確実に処理できるよう，サーバ機能を増強させ，地震識別等自動処理機能を強化した．これにより，地震登録数は倍以上に増え，かつ準リアルタイムで処理することが可能となった．一方で EPOS と REDC 間で機能（システム監視，データ収録等）を共通化し，サブシステムを集約・再配置することで経済性も確保した．

更に 2016 年以降には，2016 年 4 月の熊本地震の課題を受け，地震活動等の推移をリアルタイムで監視し迅速かつ的確に地震活動状況を把握するため，地震活動推移監視装置を整備した．その他，2017 年には，中央防災会議防災対策実行会議（南海トラフ沿いの地震観測・評価に基づく防災対応検討ワーキンググループ）の検討結果を受け，新たに「南海トラフ地震に関連する情報」の発表を開始するため EPOS の情報発表機能を強化した．

１０．気象研究所

気象研究所は，この 10 年間，海溝型の巨大地震，緊急地震速報，津波，地震活動・地殻変動に関する研究を継続的に取り組んできた．

東北地方太平洋沖地震は東北沖の日本海溝沿いの広

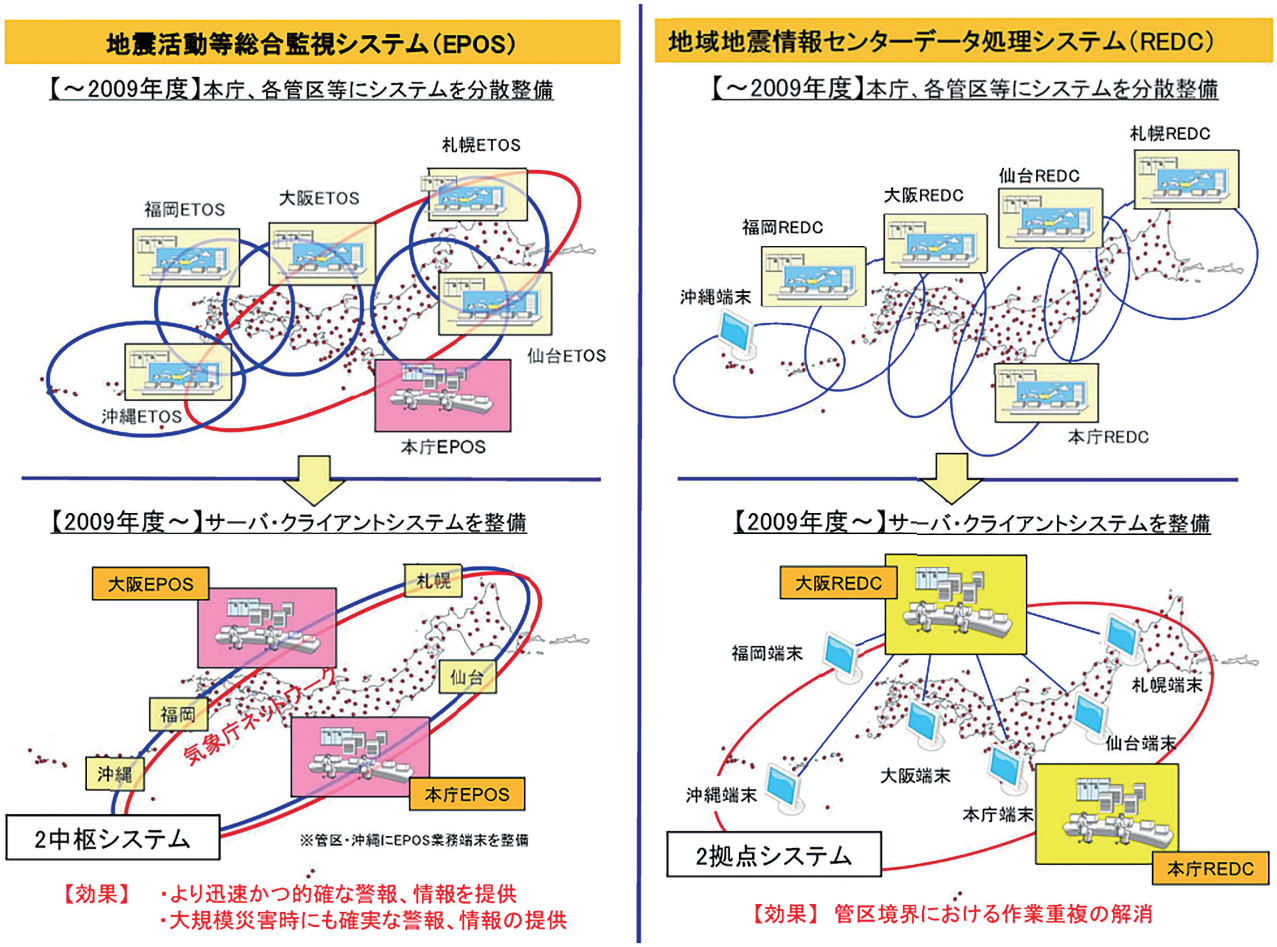

図４　４代目 EPOS ／２代目 REDC のシステム構成概要

い範囲で断層すべりが発生し[7]，東日本に未曾有の大災害を引き起こした．この地震に際し，地震の規模の過小評価，多発した余震による緊急地震速報の精度低下，津波警報の切り替えなどの課題が浮き彫りになった．規模の過小評価に対しては，巨大地震に対する早期で適切な規模推定手法の開発[8]を行い，平成 25 年に気象庁の津波警報の改善の手法として実用化された．多発した余震による緊急地震速報の精度低下を改善すべく，「揺れから揺れを予測する」研究[9]の一環の PLUM 法[10]を開発するに至り，平成 30 年に緊急地震速報の改善として実用化された．また，沖合津波観測点の計算波形と観測波形との比較で津波波源を推定し，同時に沿岸でも予測波形を算出する手法 tFISH[11]を開発し，平成 31 年に実用化された．

地震活動・地殻変動に関する研究として，前震に関する研究[12]や繰り返し地震の研究[13]など，また，GNSS データの定量的な視覚化により，南海トラフ沿いのスロースリップを検出する研究[14]，気象庁等のボアホール型のひずみ計の監視を高精度化する研究[15]がなされ，一部実用化されている．新たな地殻変動観測装置としてレーザー式変位計の開発や精密制御震源の研究に取り組み，単一の装置で短期的スロースリップと長期的スロースリップが観測可能であることやプレートからの反射波のミリ秒単位の地震波速度変化を確認した[16]．また，地震発生シミュレーションは，対象を東海地震から南海トラフや東北日本海溝沿いの領域と広域に展開し，地震発生の再現計算を行った．

ここで，地震活動のモニタリングにおいて，特記すべき研究として，自動震源処理について記述する．自動検測された P 波・S 波の到着時刻をパーティクルフィルターを用いて，最適なデータの組み合わせで震源計算を行う自動震源決定法を開発した[17]．この技術をもって，平成 28 年 4 月から一元化震源において自動処理された精度のよい震源をそのまま最終震源とする運用が気象庁業務として開始された．これにより，より微小な地震の震源決定も可能となり，地震決定数が大幅に増加することとなった（図 5）[18]．

１１．これまでの成果と今後の課題

この 10 年に発生した 2 つの大きな被害地震である，2011 年の東北地方太平洋沖地震と，2016 年の熊本地震の発生は，気象庁における地震津波業務に大きな変革を迫るものであった．その結果は先に述べた通り，緊急地震速報や津波警報の改善へと繋がっていった．また，広帯域強震計の整備や監視システムの更新，他機関による海底地震・津波計データ等の入手により，監視体制においてもより強固なものになった．

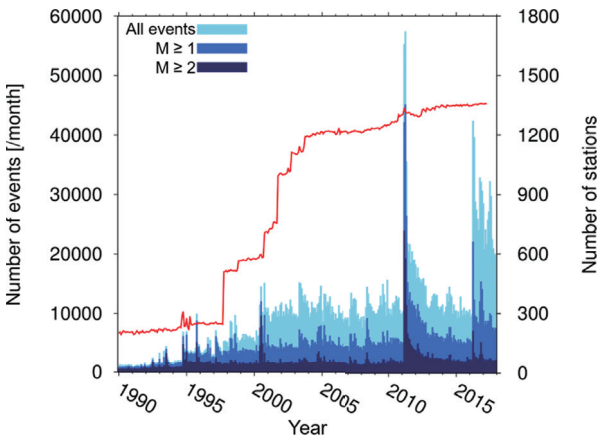

図５　気象庁における震源決定処理数の変遷．気象研で開発された自動処理技術が導入され，2016 年 4 月以降，飛躍的に処理数が増加している．

情報発表についても，長周期地震動に関する観測情報や南海トラフ地震に関連する情報の提供開始，大地震後の地震活動の見通しに関する情報の改善など，よりわかりやすく有益な情報提供にも努めているところである．一方で，既存の情報を含めた多岐にわたる情報が，住民の避難行動や防災対応に有効に生かされているかどうかについて，引き続き検証を進め改善に努めていく必要がある．

今後も気象庁は，関係機関の協力のもと，利用可能な観測データや解析結果を積極的に活用し，地震津波防災に対する国民のニーズを的確に捉えながら，これに応える迅速かつ的確な情報提供と成果の蓄積，情報が有効に活用されるための国民への普及啓発や自治体の防災対応の支援に努めていく．

参考文献および注

1）　地震調査研究推進本部地震調査委員会 ,1998,「余震の確率評価手法について」報告書.
2）　地震調査研究推進本部地震調査委員会 ,2016,［大地震後の地震活動の見通しに関する情報のあり方］報告書.
3）　防災科学技術研究所，海洋研究開発機構，東京大学地震研究所，気象庁により設置.
4）　国土交通省港湾局により設置.
5）　tFISH は tsunami Forecasting based on Inversion for initial sea-Surface Height の略．気象研究所で開発.
6）　Dhakal, Y. P.,W. Suzuki, T.Kunugi, and S. Aoi ,2015, Ground Motion Prediction Equations for Absolute Velocity Response Spectra（1 - 10s）in Japan for Earthquake Early Warning, 日本地震工学会論文集 , 15 巻 , 91 - 111.
7）Yoshida, Y., H. Ueno, D. Muto, and S. Aoki, 2011.

Source process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake with the combination of teleseismic and strong motion data, Earth, Planets and Space, 63, 565-569.

8) 気象研究所地震津波研究部，2017，海溝沿い巨大地震の地震像の即時的把握に関する研究，気象研究所技術報告，77.

9) Hoshiba, M., and S. Aoki, 2015. Numerical Shake Prediction for Earthquake Early Warning: Data assimilation, Real-Time Shake Mapping, and Simulation of Wave Propagation. Bull. of Seism. Soc. Am., 105, 1324-1338.

10) Kodera, Y., Y. Yamada, K. Hirano, K. Tamaribuchi, S. Adachi, N. Hayashimoto, M. Morimoto, M. Nakamura, and M. Hoshiba, 2018, The Propagation of Local Undamped Motion（PLUM）method: a simple and robust seismic wavefield estimation approach for earthquake early warning. Bulletin of Seismological Society of America, 108（2), 983-1003.

11) Tsushima, H., R. Hino, H. Fujimoto, Y. Tanioka, and F. Imamura, 2009. Near-field tsunami forecasting from cabled ocean bottom pressure data, J. Geophys. Res., 114, B06309.

12) Maeda, K., and F. Hirose, 2012. Prediction Performance of Empirically Defined Foreshocks and Its Application to the 2011 Off Tohoku Earthquake, Abstracts of international symposium on statistical modeling and real-time probability forecasting for earthquakes, 14.

13) 気象庁気象研究所地震火山研究部・地震火山部・気象大学校・札幌管区気象台・仙台管区気象台・大阪管区気象台・福岡管区気象台・沖縄気象台 ,2014. 日本各地域の繰り返し相似地震発生状況に関する研究，気象研究所技術報告，72.

14) Kobayashi, A.,2017. Objective detection of long-term slow slip events along the Nankai Trough using GNSS data（1996-2016), Earth, Planets and Space, 69:171.

15) 木村一洋 , 露木貴裕 , 菅沼一成 , 長谷川浩 , 見須裕美 , 藤田健一 , 2015: タンクモデルによる体積ひずみ計データの降水補正について . 験震時報 , 78, 93-158.

16) 気象研究所地震津波研究部，2011，東海地震の予知精度向上及び東南海・南海地震の発生準備過程の研究，気象研究所技術報告，63.

17) 溜渕 功史・森脇 健・上野 寛・束田 進也（2016）: ベイズ推定を用いた一元化震源のための自動震源推定手法 , 験震時報 , 79, 1-13.

18) Tamaribuchi, K., Y. Yagi, B. Enescu and S. Hirano, Characteristics of foreshock activity inferred from the JMA earthquake catalog, Earth, Planets and Space, 70:90.