

シリーズ「新・強震動地震学基礎講座」

(第3回) 強震観測

強震動委員会 青井 真 (防災科学技術研究所)

●はじめに

日本における強震観測はSMAC型強震計の開発とともに1950年代に始まり、1968年十勝沖地震や1978年宮城県沖地震などで貴重な強震動記録が取得され、デジタル方式への移行など多くの技術的發展にも支えられ、産官学により強震観測が行われてきた。強震観測データは理学、工学の関連学術研究や耐震性評価、ハザード評価などに欠かすことが出来ないだけでなく、近年の観測技術や通信環境の向上により、リアルタイムでデータが得られるようになり、緊急地震速報をはじめとする防災に関する即時情報として活用することで起こりつつある地震被害の軽減という新しい役割が期待されている。強震計は、民間によるものも含め様々な形態で設置されており、現在日本には一万点を遙かに超える強震観測点があると考えられるが必ずしもその全容は明らかではない。本稿では主に、公的機関により全国的に展開され、データが公開されている強震観測網について概観する。

●K-NET・KiK-net

1995年兵庫県南部地震では国内の地震として初めて震源断層近傍の強震動が記録され、その後の研究開発に大きな貢献を果たした一方、地震直後の初動への活用という観測点で様々な不備が浮き彫りになった。この教訓に基づき地震調査研究推進本部（以下、地震本部）が設置され、日本の地震調査観測は大きな転機を迎えた。防災科学技術研究所（以下、防災科研）は、かねてよりの強震観測事業推進連絡会議からの提言を受け、兵庫県南部地震後一年あまりで1000点の地表強震観測点からなる全国強震観測網K-NET (Kyoshin NETwork) を構築し、1996年6月より運用を開始した。また、防災科研では鉛直アレー方式を採用した基盤強震観測網KiK-net (Kiban-Kyoshin network) も運用している。これらの観測網（図1上）は構築当初よりオープンアクセスを前提としていたことが大きな特徴として挙げられ、インターネットによる地震直後のデータ公開に先鞭をつけた。

強震観測において最も重要なことは記録を確実に取ることであるが、それに加え近年では記録をより早く取得することの重要性が高まってきている。これらを実現するため防災科研では観測機器を独自に開発し、これまでに三代

にわたる機器を展開してきた。1996年から順次運用を開始した第一世代のK-NET95およびSMAC-MDKは、地震発生直後にデータセンター側からダイヤルアップすることによりデータを回収し、インターネット経由で公開した。2003年度から更新を開始した第二世代のK-NET02/02AおよびKiK-net06は、気象庁の震度計検定に合格し正式に震度計としての機能を備え、その一部は後述する震度情報ネットワークに組み込まれるとともに、現地の観測機器が地震を自動的に検知し観測点側からのダイヤルアウト機能を付加することでデータ取得に掛かる時間を格段に短縮することに成功した。また、リアルタイム震度などの強震動指標や長周期地震動に関する指標を現地機器で計算し送信する機能を具備している。2012年度から更新を開始した第三世代のK-NET11/11AおよびKiK-net11/11Aは2011年東北地方太平洋沖地震などで経験した大地震発生時の厳しい観測状況に鑑み、観測の信頼性をより高めるための取り組みが行われた。

大規模な観測網の展開により大震幅の強震動がしばしば取得されるようになったことから、第一世代では各成分2000galであった最大計測可能範囲が、第二・三代ではそれぞれ4000gal・8000galに拡張された。また、第二世代以降（除くK-NET02）では長周期まで良い特性を持ち、「トビ」が少ない水晶ヒンジを持つ加速度センサーJA40GAを採用し、第三世代では直交三成分に加え斜交成分を計測する加速度計を加えた四成分観測を採用するなど、高性能かつ信頼性の高い観測を実現している。

●気象庁による強震観測

気象庁による強震波形のデジタル収録は1988年の87型電磁式強震計から始まり、現在では大きく分けて、07型震度計によるものと多機能型地震観測装置によるもの2つがあり、島嶼部を含む全国に合計で約670観測点が設置されている（図1下）。多機能型地震観測装置は2003年10月より運用が開始され、全国に約270観測点が設置されており、加速度波形記録を収録するだけでなく、計測震度演算や緊急地震速報の解析に必要な情報であるB-Δ演算を現地の観測装置の内部で処理する機能を備えている。2007年12月から運用が開始された07型震度計は全国に約400観測点が設置されており、計測震度だけでなく、加

速度波形記録が有線の通信回線により気象庁に集約されている。これらの観測は、有線だけでなく衛星回線でバックアップされるとともに、非常用電源を備えるなど災害時にも観測を継続することが意識されたシステムとなっている。観測データは気象業務支援センターからDVD-ROMで提供されているほか、震度の大きな地震等の記録に関しては、気象庁のWebサイトで地震後にデータが公開される。

●震度情報ネットワークシステム

震度は防災対応の最も基本的な指標であり明治時代から体感により観測されてきた長い歴史があるが、客観性や迅速性を高めるため1980年代から機器計測による計測震度の導入が気象庁により検討され、1996年には体感による観測が廃止され震度計による計測に完全に移行された。1995年兵庫県南部地震を契機に、迅速に市町村別の震度分布状況の把握し応急対応に資する情報を得ることを目的に計測震度計を全市町村に広めるため、自治省消防庁（当時）による国庫補助事業として震度情報ネットワークシステムの整備事業が実施された。震度情報ネットワークシステムは、気象庁や防災科研が既に設置していた機器を活用するとともに、都道府県や政令市などの自治体が新たに震度計を設置し、これら三者の機器により構成されている。時期によって多少の増減はあるが、現在は、気象庁による07型震度計及び多機能型地震観測装置（約670点）と防災科研のK-NETの一部（約780点）に加え、自治体が設置している約2900点の震度計により、合計で4000台を超える震度計からなる大規模な全国ネットワークを構成している。これらの震度計から得られる計測震度は一元化され、防災関連機関や報道機関などに提供される。震度情報ネットワークシステムはすべての市町村最低一台の震度計を設置することを原則としており、多くは市町村役場や公的施設などに設置されていることから、空間的に等間隔ではなく人口が多い地域の観測点密度が高い傾向にある。

自治体が設置している震度計の機種は様々であるが基本性能は類似しており、2009年頃から多くの自治体に導入された第2世代の震度計ではほぼ全ての機種で計測震度を記録するだけでなく、波形記録を収録する機能を備えている。ただし、通信環境やセンター機能の制限、また自治体にとっては必ずしも波形記録が必要ではないなどの理由により、その扱いは様々である。気象庁では、2003年頃から大きな震度が記録された顕著な地震（現在は原則最大震度5強以上）に関しては自治体に波形データの回収を依頼し、Webサイト等で提供している。2004年新潟県中越地震の川口町（新潟県）や2016年熊本地震における益城町及び西原村（熊本県）における震度7の波形記録など貴重

な震源近傍の強震動が記録され公開されている。更に1999年には、各種機関により運用されている強震観測網・震度観測網などと波形データの交換を可能とする大都市圏強震動総合観測ネットワークシステムの、六大都市圏の拠点国立大学への整備が試みられた。なかでも、首都圏強震動総合ネットワーク（SK-net）は関東圏及びその周辺の自治体震度計を含む多くの機関の波形データを収集し、大学などの研究者に公開している。

●岩盤における強震観測

これまでに紹介してきた強震観測点の多くは、KiK-netの地中観測点を除けば、多かれ少なかれ表層地盤の影響を受ける環境下の観測であるといえる。電力中央研究所が運用している露頭岩盤上強震観測システム（RK-net）は、堆積地盤の影響を受けにくい露頭岩盤に約30点の強震観測点を設置している点で特徴的であり、震源破壊メカニズムの解明、堆積地盤への入力地震動の把握、耐震設計の検証を目的としている。また、多くの地点は1970年代半ばより順次設置されてきた観測を継続していることから、長期にわたり同一条件での観測データの蓄積がはかられている。

また、防災科研が運用する広帯域地震観測網F-net（図1上）は良好な観測を行うため、山肌に横坑（トンネル）を掘削し、その行き止まりの硬質岩盤上の設置台にSTS-1やSTS-2.5などの広帯域地震計とともに、大地震による振り切れを防止しダイナミックレンジを確保するためVSE-355G3などの速度型強震計を設置しており、これらのデータはWebサイトより公開されている。

●港湾地域における強震観測

港湾に特化した強震観測としては港湾地域強震観測が挙げられる。この観測網は1962年に開始され、国土交通省港湾局などの港湾関係諸機関が参画し港湾空港技術研究所が取り纏める形で実施されており、現在では全国61の港湾に153台の強震計が設置されており、これらのデータはWebサイトより公開されている。高層建築物の耐震設計に用いられている標準3波の1つである八戸波（1968年十勝沖地震の際の八戸港の記録）を取得したことで知られている。

●建物における強震観測

耐震工学の観点からは、地盤上だけでなく建物における強震観測が重要であるが、建物における観測は個別の所有者やその関係者により行われる場合が多く、地盤上における観測データほどオープンではない。その中であって、建築研究所の強震観測は公的機関により半世紀にわたり実施

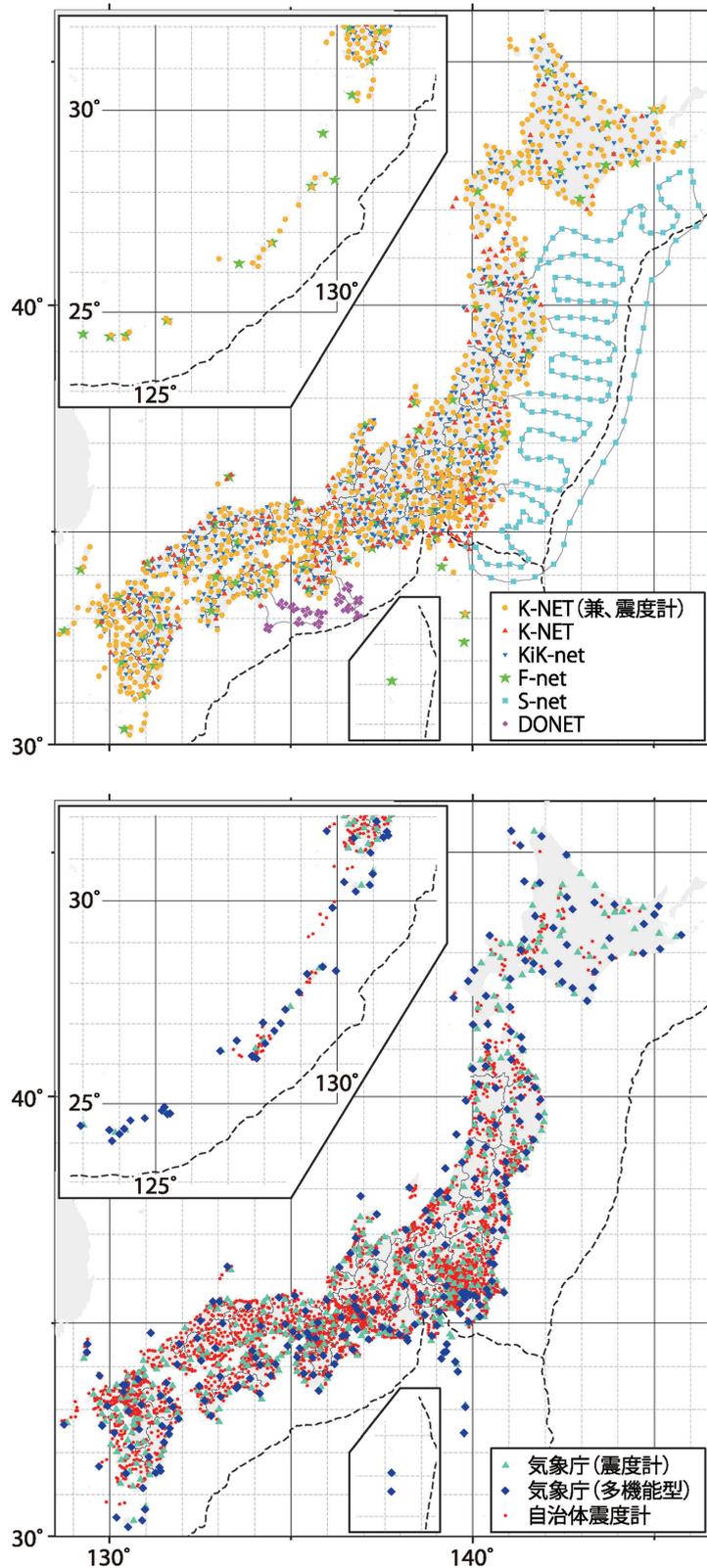


図 1 (上) 防災科研の観測点配置図. 丸印は K-NET のうち震度情報ネットワークシステムに組み込まれているものを示す. (下) 気象庁 (07 型震度計と多機能型地震観測装置) 及び自治体 (震度計) の観測点配置図.

され、多くの顕著な地震についてデータが公開されている。建物の動的な挙動の解明を目的に、首都圏を中心に全国の主な都市に74の強震観測地点が配備されており、基本的に建物の頂部と基礎にセンサーが設置され、地盤と建物の相互作用の解析のため、近傍の地盤にもセンサーが設置されている地点もある。

●海域における強震観測

海域には人が居住せず沿岸を除けば建築物もないため、強震動による直接の被害はほぼないが、海域で発生する地震の地震動を震源近傍で捉えることにより破壊過程をはじめとするさまざまな震源に関する知見が得られることに加え、地震の早期検知という観点から、陸域の地震観測網を海域に延長することでより早く地震を捉え猶予時間を大きく稼ぐことが可能になるという防災上のメリットもある。日本において海域におけるケーブル式観測網に加速度型強震計が採用され始めたのは1990年代であり、2000年代に入り南海トラフにおける地震・津波観測監視システム(DONET)や日本海溝海底地震津波観測網(S-net)など大規模な海域観測網の運用が開始されている(図1上)。2016年8月20日の三陸沖の地震(M 6.4)では、陸域の観測網Hi-netに比べS-netでは約22秒早く地震波を捉えている。今後このようなデータが活用され、懸念される海溝型巨大地震における被害の軽減に役立つことが期待される。

●その他の強震観測

鉄道・高速道路・発電所・ガス・ダムなどにおいて各社によりライフラインの維持や地震発生時の状況把握や緊急停止などの制御などを目的に強震観測が行われている。たとえば、地震時にガスの供給を安全に停止することを目的にした東京ガスの超高密度リアルタイム地震防災システム(SUPREME)では自社供給地域に約4,000箇所の地震計を設置していたり、発電所においては地中・地盤・基礎・建屋に稠密に設置されている。このように目的に応じて特徴的な観測がなされているが、顕著な地震発生時に得られた貴重なデータは販売されているものや学会などを通じて

提供されるケースもあり広く活用されている。

大学においては、当該地域の地震切迫性や地盤特性などを考慮し地域の研究課題を反映した観測が行われているほか、キャンパス内や自治体などと連携した強震観測が行われている。また、被害地震の際には機動性を生かした臨時強震観測が実施されている。

協議会形式での強震観測の例としては、兵庫県南部地震の震源近傍強震動を捉えた関西地震観測研究協議会(CEORKA)のように、会費で20年以上の長年にわたり観測を継続している事例もある。

●おわりに

強震観測は従来イベントトリガー方式と現地ため込み方式の組み合わせにより頻度の低い強震動を確実に記録することに主眼が置かれてきたが、近年の観測技術や通信環境の劇的な向上により確実性を損なうことなくリアルタイムの連続観測が可能となってきた。現在、強震連続観測データを防災情報としてより有効に活用する事を目指し、データの一部は緊急地震速報に活用されているほか、強震動指標に関しては強震モニタという形で誰もが今の揺れを知ることが可能なシステムとして公開されている。また、震源情報を用いることなく「揺れ」から「揺れ」を直接推定する手法の開発が行われており、新たな観測技術や解析技術を開発する重要性和有効性は今後ますます高まると考えられる。

これまで国内外の多くの先人の努力により長年にわたり強震観測が継続されることで貴重なデータが得られてきた。短期的な研究成果を挙げる事が重要視される風潮があるが、新しい技術を取り入れつつも、同一地点において観測を継続し、兵庫県南部地震や熊本地震、東北地方太平洋沖地震のような極めて頻度の低い重要なイベントの強震動を確実に記録することも非常に重要である。

謝辞：青木重樹氏、岩田知孝氏、功刀卓氏、芝良昭氏、野津厚氏、畑山健氏、藤原広行氏、干場充之氏にはコメントをいただいた。また、多くの文献やWebサイトの情報を参考にさせていただいた。記して感謝いたします。

(第4回) 応答スペクトル

強震動委員会 松崎伸一(四国電力株式会社)

地震動の性質は、地震の震源特性(地震規模や深さなど)、震源からの伝播特性(減衰や深部地下構造など)、サイト増幅特性によって大きく影響を受ける。その性質のひとつである“地震動の強さ”を示す指標としては、例えば、震

度階、計測震度、最大加速度、最大速度などがある。1948年福井地震を契機に震度7が制定されて以降、初めて震度7が適用された1995年兵庫県南部地震では、死者6,434名という甚大な被害がもたらされたが、このときJR鷹取で

観測された最大水平加速度は 650cm/s^2 程度であった。一方、2011年東北地方太平洋沖地震の際、同じく震度7と判定されたK-NET 築館では、 $2,933\text{cm/s}^2$ (3成分合成値) という大きな最大加速度が観測されたにも関わらず、神戸のような甚大な被害には至らなかった。このように、地震動の特性と被害との関係にあるひとつの指標だけで表現するのは困難である。それは、地震動は様々な周期の波を含んでいるからである。

そのような地震動の周期特性を表現するもののひとつとしてフーリエスペクトルがある。時刻歴データを周期ベースに変換し、周期ごとの影響度の強さを分析する手法のことをスペクトル分析と言い、フーリエスペクトルは、地震波を振幅と位相の異なる定常な正弦波に分解することによって求まる。しかし、それは地震波自体の特性であって、どの周期帯の波を多く含むかというような情報は有しているものの、構造物の地震応答との関わり方に関する情報は含まれていない。そこで、地震動の特性を構造物への影響という観点で表現したものが応答スペクトルである。

応答スペクトルの基本となるのは1質点系の振動論である(図1)。応答(地震動が入力した場合の構造物の揺れ)としては変位、速度、加速度の3種類があり、さらにそれぞれが絶対値か相対値かで2種類に分かれ、都合6種類の応答が存在する。例えば、図1でxが構造物の地面に対する相対変位を表すものとし、yを地面の変位とすると、x+yが絶対変位を示すこととなる。1質点系の地震応答の運動方程式は固有周期Tと減衰定数hの関数で表すことができるが、構造物の時々刻々と変化する応答は、減衰定数を与条件としてこの運動方程式を直接に数値積分して求めるのが一般的である。しかし耐震工学上は、構造物への影響という観点では、時間的な変化よりも応答の最大値の方が重要な量となることが多い。そこで固有周期を横軸とし、固有周期を種々変化させて求めた最大応答値を縦軸にとってスペクトル表示したものが応答スペクトルである(図2)。つまり、応答スペクトルは、ある地震動が色々な構造物に対して与える影響を一見してわかりやすく表現したグラフである。

この応答スペクトルの利点は、耐震設計への移行が容易なことである。例えば図2(右上図)が加速度応答スペクトルを示すとした場合、固有周期T1の構造物には最大加速度A1の地震動が作用することを意味する。ここで仮にA1が 600cm/s^2 であったとすると、この構造物に作用する耐震設計用の水平震度(重力加速度 980cm/s^2 に対する水平方向に作用する加速度の割合)は0.612と求まる。そして、これに構造物の重量を乗じることにより部材に働く力を算出することができる。そうした耐震設計(震度法)との関連から、応答スペクトルは耐震工学の分野では特に

重要な概念として、構造物の耐震設計、被害予測、耐震診断などにおいて広く利用されている。

ここで、種々の応答スペクトルの特徴を把握しておくことも重要であろう。応答スペクトルは、加速度としては絶対的な揺れ(絶対加速度応答スペクトルSA)を、変位と速度については構造物の相対的な揺れ(相対速度応答スペクトルSV, 相対変位応答スペクトルSD)を用いるのが通例となっている。絶対量であるSAは固有周期が非常に短いところでは固有周期がゼロに近づくため、構造物が剛体として運動する場合に相当する。つまり構造物のSAは地動(入力地震動)の最大加速度に等しくなる。一方、固有周期が長くなると、ばねの復元力が働かなくなるので、構造物は地震動を受けても動かないため、構造物のSAは常にゼロである。一方、相対量をもとにしたSV, SDでは、固有周期が短いところはゼロに、長い周期ではそれぞれ地動の最大速度、地動の最大変位に漸近する。

一方では、1質点系のSA, SV, SDは互いに独立であるものの、固有周期が短く、減衰定数の小さな範囲では、近似的に次の関係が成り立つことが知られている。

$$PSV = 2\pi/T \times SD \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$PSV = T/2\pi \times SA \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、PSVは固有周期との関係から近似的に求めることから擬似速度応答スペクトルと呼ばれる。これらの関係式に従えば、ある応答スペクトルから他の応答スペクトルを近似的に求めることができる。そしてこの関係を用いると、先の3種類の応答スペクトルをひとつのグラフで表現することが可能であり、3重応答スペクトルあるいはトリパートイト応答スペクトルと呼ばれている。その例を図3に示すが、右上がりの軸が加速度応答のレベルを、右下がりの軸が変位応答のレベルを、水平の軸が擬似速度応答の

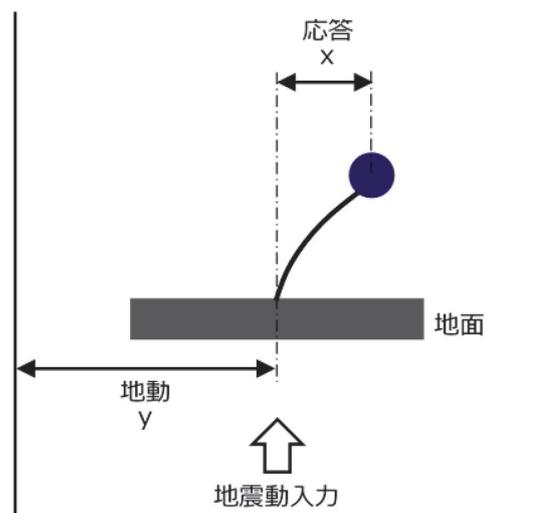


図1 1質点系モデル

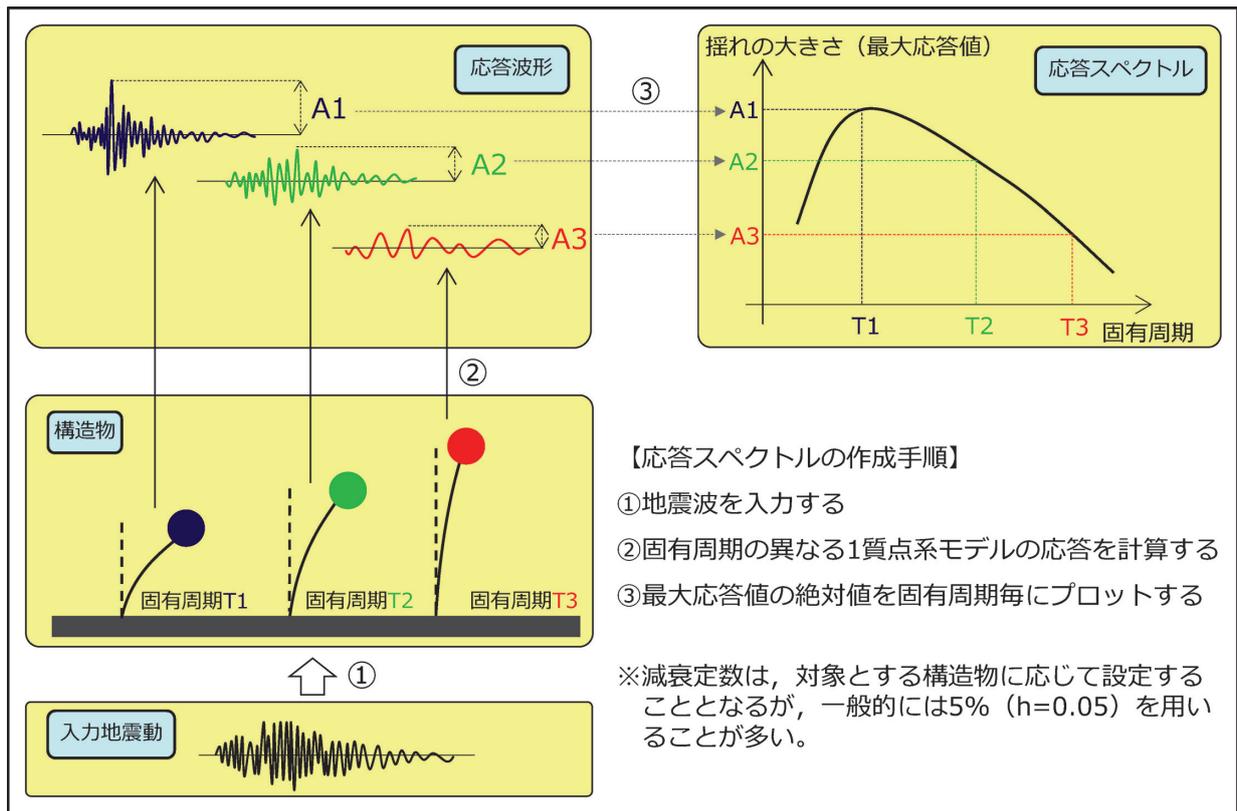


図 2 応答スペクトルの概念

レベルを示している。3重応答スペクトルは、短周期側では加速度軸に対して地動の最大加速度に漸近し、長周期側で変位軸に対して地動の最大変位に漸近する。応答スペクトルの概念は1950年代にHousnerによって提案されたが、その際に定義された擬似速度応答スペクトルは変位応答スペクトルに基づいていた〔(1)式〕が、最近では加速度応答スペクトルに基づいている〔(2)式〕ことが多い。

図3を見ると、JR鷹取の記録は周期1~2秒付近の構造物が大きな応答を示すのに対し、K-NET築館の記録ではもっと短周期の0.2~0.3秒付近に固有周期を持つ構造物への影響が大きいことがわかる。このような周期特性の違いが地震被害の差として現れた訳である。構造物被害の大小と相関が高い指標としては、例えば周期1秒付近の応答スペクトルレベルが知られているが、JR鷹取の記録や2016年熊本地震(本震)における益城町役場の記録は、構造物に大きな被害を与える地震動であったことを応答スペクトルで確認できる。応答スペクトルは、そのまま地震動入力の大さを表しているといってもよく、近年は構造物の応答を直接把握する使い方よりも、地震動の周期特性を確認するスペクトルの意味合いが強くなっているようである。

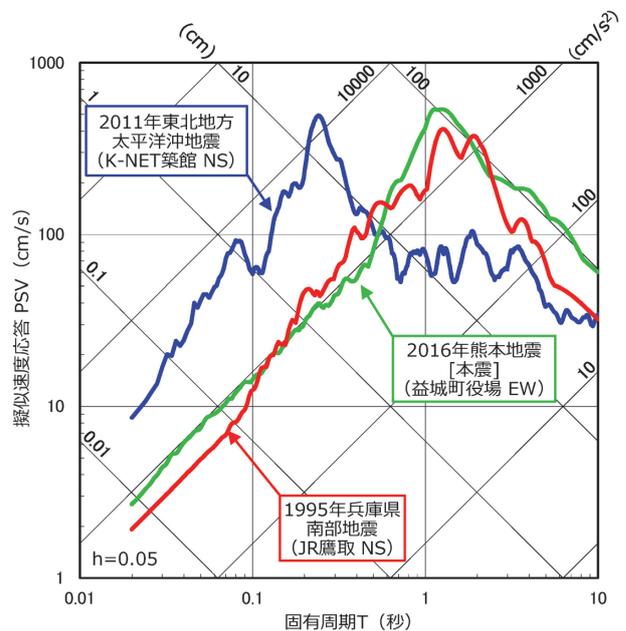


図 3 著名な地震波の3重応答スペクトル