

地震動の時空間分布の表示

理工学部地球環境学科 片岡俊一
kataoka@cc.hirosaki-u.ac.jp

理工学部附属地震火山観測所 渡邊和俊
wata@cc.hirosaki-u.ac.jp

2001年8月14日に青森県東方沖で起きた地震による地震動が青森県周辺をどのように伝播してゆくかを示すアニメーションを作成し、一般向けの解説をつけてWeb上 (<http://hrsryu.geo.hirosaki-u.ac.jp/>) で公開している。以下にその経緯を示す。

1. はじめに

一般の人々にとっては、地震とはその場所の地面が揺れることであって、その揺れが震源から伝播してきたものと観念的に分かっていたとしても、空間的なイメージを持つことは容易でないと思われる。一方では、気象概況で雲が時々刻々変化して行く様子をテレビを通して見ているので、地震についてもこのような表現をすれば、新たな興味が湧き、地震に対する意識の向上、さらには防災意識の向上も期待されよう。

研究者にとって地震動の伝播状況を把握することは、地表から地球内部に至る地下構造を理解するうえで重要なことである。これまで地震動の伝播状況を調べるために、各観測点における地震波形あるいは特定の位相（P波やS波）の走時と震央距離をプロットして得られる走時曲線が用いられてきた。しかしながら、走時曲線の形は震源の深さによって変化し、地震波速度が深さとともに急激に増加する場合や急激に減少する低速度層を含む場合、この走時曲線は不連続になる¹⁾。地震学の初学者に対して、走時曲線の重要性や地震動が伝播することを講義したとしても、空間的なイメージを持つことは容易ではないであろう。

また、防災面ではこれまで、地震動を最大速度や最大加速度、および震度で表現し、空間分布を調べることが日常的に行われてきた。しかしながら、このような表現では時間変化を追いかけることができず、適切な防災情報とは言い難い。

上記のような問題点を踏まえると、地震波動伝播をアニメーション化することが適切な解決法と考えられる。ただし、これまで地震の観測点密度が粗かつたため、地震動のアニメーション化は非常に困難であった。隣り合う観測点の距離が離れ過ぎていると、その間のデータ補間を行なうことが難しくなり、補間したとしてもその補間値の信頼性が低くなってしまうためである。ところが、1995年の兵庫県南部地震後、防災科学技術研究所によりK-NETやHi-net、そして、KiK-netなどの観測網が全国各地に設置され、観測点密度は飛躍的に高くなった。このような状況下において、地震動の伝播状況をアニメーション化できる可能性が高まったと思われる。

そこで、地球科学を学ぶ学生への教育的効果や一般市民の意識向上を考えて、地震動の伝播状況（地震動の時空間分布）のアニメーションを作成した。ここで行ったアニメーション化は、波面のまわり込み、ノイズレベル、揺れやすい地域など、過去の研究知見の再確認や新たな発見が期待され、専門家に対しても有意義と考えられる。

2. 使用データ

2.1 地震

本研究では、2001年8月14日に青森県東方沖で起きた地震の波動伝播をアニメーション化する。気象庁による速報震源要素は、発生時が同日午前5時11分27秒、震央が41.01°N, 142.42°E、深さが43kmで、マグニチュードは6.2である。

2.2 観測点

現在青森県内には、図-1に示すような地中地震観測点と図-2に示すような地表地震観測点がある。これらの観測点は、主として防災科学技術研究所が設置したHi-net、KiK-net、K-NETと呼ばれる観測網を構成するものである。これらの観測網では、地震動データや観測点の情報をインターネット上で公開している。そこで、各観測点における地震動記録を独自に収集し、使用した。これらに加えて、青森県地震観測システムの観測点NKD（名久井岳）およびUTB（宇樽部）の2ヶ所の地震記録も併用した。以下に各観測網の概要を記す。

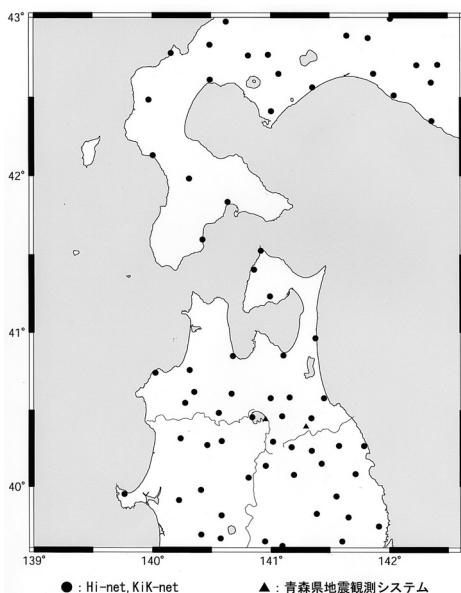


図-1 地中観測点分布

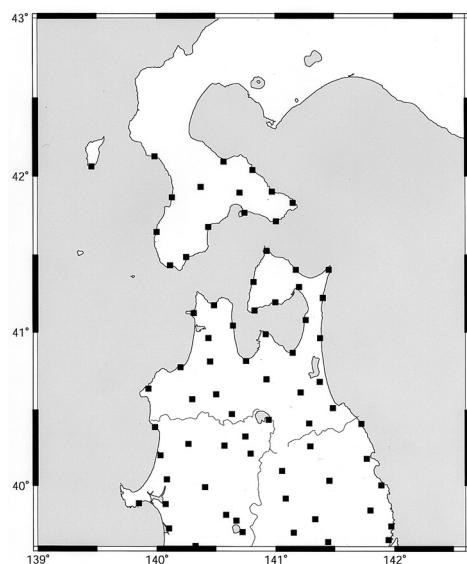


図-2 地表観測点分布

(1) Hi-net²⁾

Hi-net（高感度地震観測網）は、1995年の兵庫県南部地震後に発足された地震調査研究推進本部の推進する観測点網であり、高感度地震計による微小地震観測をその目的としている。微小地震は発生する頻度が非常に高いために、この観測網によって、各地域における地震の活動度や地震の発生様式、地下構造などを精密かつ迅速に把握することができるようになると期待されている。

Hi-netでは、深さ100m以上の観測井戸の中に3成分速度計が設置されており、さらに後

述するKiK-netの地震計も併設されている。Hi-netは連続観測を行っており、100Hzサンプリングの波形記録は、通信衛星を介して、2002年4月から弘前大学理工学部附属地震火山観測所にも常時テレメータされている。

(2) KiK-net³⁾

KiK-net (Kiban Kyoshin network) は、地震調査研究推進本部の推進する『地震に関する基盤的調査観測（基盤観測網）』の一環として、防災科学技術研究所により全国500ヶ所以上に設置された。前述したHi-netの地震計では、強い地震動の場合記録が飽和してしまう可能性があるので、強い地震動でも観測可能な地震計（強震計）としてKiK-netの地震計が併設されている。

各観測点では、深さ100m以上の観測井戸が掘られ、井戸底および地表にペアで最大2000cm/s²まで観測可能な3成分の加速度型強震計がそれぞれ設置されている。記録はイベントトリガー方式（地震動を感じた時点で、その数秒～数十秒前からのデータを収録する）で行われ、3成分のうち1成分でもトリガーレベルを超えると記録を開始するように設定されている。観測記録は200Hzサンプリングであり、収録時間については、最短でも120秒は記録するものとし、収束判定条件（原則として0.1gal）を下回ってから30秒後に終了する。

(3) K-NET⁴⁾

K-NET (Kyoshin NETwork) は、1995年の兵庫県南部地震後に防災科学技術研究所により全国1000ヶ所以上に設置された強震計ネットワークであり、加速度型強震計を日本全国に25km間隔で設置することにより、非常に均質な観測を行うことができるのが特長である。多くの観測点は役場などの公共施設の敷地内に設置されており、硬質岩盤上に設置される場合に比べ、より人間の生活圏に近い条件で観測が行われているといえる。確かに、図-1と図-2を比較すると、地表観測点の方が平均的に配置されている。

各観測点に設置された3成分加速度型強震計は、最大2000cm/s²まで観測可能である。記録はイベントトリガー方式で行われている。観測記録は100Hzでサンプリングされ、記録の終了はトリガーのスタートレベルと同一のレベルを収束判定条件として終了させるが、最短120秒は記録される。

本研究ではこのK-NETと前述したKiK-netの地表における観測波形を併合処理し、以下では「地表観測データ」と呼ぶこととする。

(4) 青森県地震観測システム

青森県地震観測システムは、青森県周辺における微小地震活動の調査を目的とし、青森県によって県内5ヶ所に観測点が設置されている。観測点データは1999年8月以降、弘前大学へリアルタイムテレメータ伝送されている。特にここで用いるNKDとUTBはHi-netに近い仕様を満たしており、地下100mに3成分短周期地震計が設置されている他に強震計、傾斜計も併置されている。本研究ではHi-netデータとあわせて用い、以後特に断らない限り「地中観測データ」と称した場合はHi-netとNKDとUTBを含めたデータセットを指すものとする。

3. アニメーションの種類

アニメーションにより表現することを以下のように考え、地中データ上下動の伝播状況、地中データの水平2成分と上下動成分を合成した振幅時空間変化の状況、同様な変化を地表データで見た場合の3種を作成することとした。

地中データの上下動は、地震動の初動（P波）の到来を見ることに重点を置いている。一方、地中データの3成分合成波形については、地震動の主要動の伝播状況を表現することを意図している。また、地表のデータは、観測点毎にその揺れ方が大きく異なることから、地表と地中を対比することで、地震動が地表付近で增幅されている様子を表すことも意図した。

さらに、地表のデータだけでも揺れやすい地域があることは理解できると考えている。

4. データ処理手順

地震動の伝播状況をアニメーション化するには、時々刻々における各観測点における地震動の振幅を求め、それを内挿することで、対象地域内における地震動分布の図（スナップショットと言う）を作成し、これを適当なタイミングで連続して示せば良い。このような手順を整理すると図-3のようになる。各ステップにおける作業内容の概略を以下に示す。

Hi-net及び青森県地震観測システムの記録は、連続記録であるので、収集した地震動データを任意の時刻、例えば地震の破壊開始時刻に合わせることは容易である。そこで、地中データについては全データを破壊開始時刻に合わせて処理を行った。しかしながら、トリガータイプの地震記録は各観測点が独自に記録収集を開始するため、各観測データの先頭時刻が異なっている。また、必ずしも地震波のP波到来以前からのデータが収録されている訳でもない。そこで、ほぼ全観測点が記録を開始した破壊開始から60秒後以降のデータを用いることとした。また、加速度記録は積分して速度記録に直した。その際には、1Hz以下の成分は除去している。このような前処理を行ってデータを整備した。

地震動データは、正負の値を有するが、ここでは揺れの大きさに着目することとし、地震動の包絡振幅を用いた。地震波の包絡形を求める方法は種々あるが、地中の上下動については、P波の立ち上がりの位相を乱さず滑らかな包絡形を与えるComplex envelope⁵⁾を用いた。3成分の合成波には、Complex envelopeが適用できないが、この場合は元来揺れの強さの時空間分布を視覚的に表現することを目標としているので、単純な2乗和平方根とした。3成分の波形とその包絡形の例を図-4に示す。

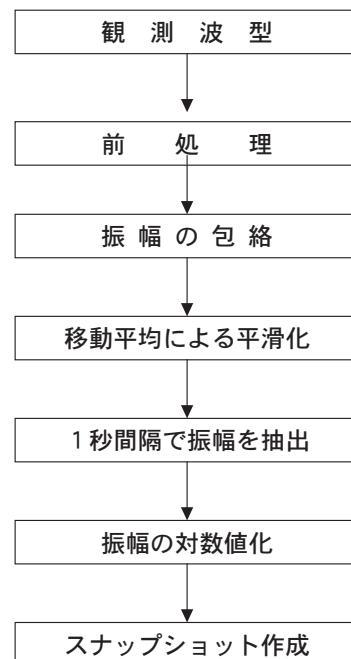


図-3 地震動のアニメーション表現の手順

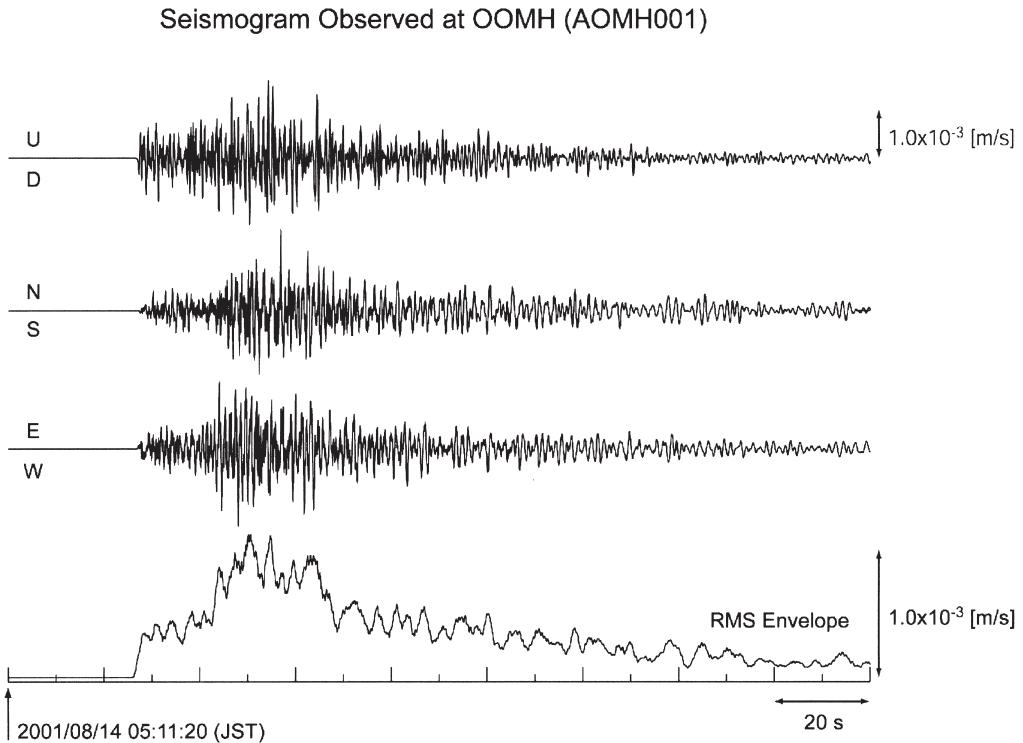


図-4 3成分地震動波形とその包絡波形の例

包絡形にしてもその変化が非常に滑らかという訳ではない。また、スナップショットを求める時間間隔よりも細かい動きがあったとしても、それは適切に表示できることになる。そこで、移動平均により包絡振幅をさらに平滑化した。移動平均の幅は、試行錯誤的に検討し、上下動は前後0.1秒間、3成分の合成動は前後0.8秒間とした。ここまで処理には、UNIX上で開発されたSAC⁶⁾を用いた。SACは、X-Window上で動作するインタラクティブな地震波形処理プログラムパッケージである。

振幅の表現方法は、振幅の値そのものではなく対数値とした。これは、地震動到達前のノイズレベルと地震動の大きさを一目で表現できるようにすること、大局的には距離の対数値に比例して振幅の対数値が減少してゆくこと、人体感覚を考慮する場合には対数が用いられていること等を総合的に勘案した結果である。なお、最も一般的な地震動指標である、震度も地震動振幅の対数値の関数となっている。

スナップショットは、振幅の大小を色で表現したコンターマップとして表すことにした。これにはGMT(Generic Mapping Tool)⁷⁾を利用した。GMTは、GNU General Public Licenseに基づいたフリーソフトで、UNIXおよびWindows上で動作可能な2次元、3次元データの図化ソフトである。GMTは、海岸線データを保有し、地図作製用の各種投影法が適用できるので、多様な地図を作製することが可能である。

ここでは、各観測点の位置(東経、緯度)と1秒ごとの振幅を一つのファイルとして作成しておき、これをGMTに読み込ませ、GMTの機能を用いてコンターマップを作成した。GMT内の具体的な手順としては、不等間隔のデータを曲率最小化アルゴリズムを用いてグリッドデータに変換し、グリッドデータの振幅を予め定めておいた振幅スケールで表し直し

て表示している。GMTは、EPSファイルを出力できるので、最終的には1秒毎のスナップショットをEPSとして出力した。表示例を図-5に示す。

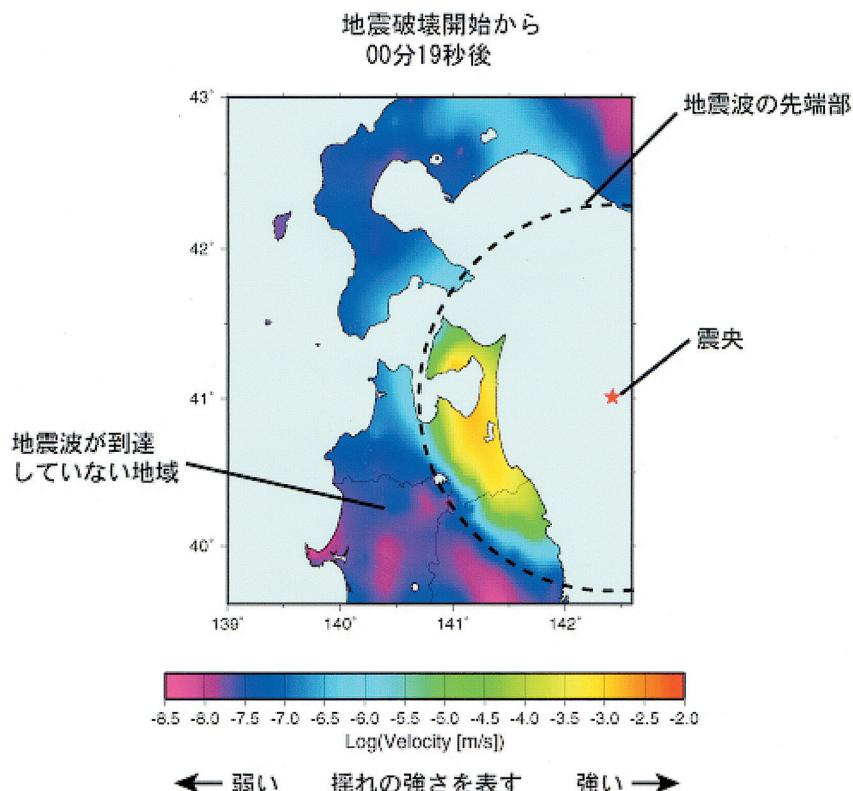


図-5 スナップショットの一例(地中観測記録、上下動)

GMTから出力された1秒ごとの振幅分布を示すEPSファイルは、以下のようにAdobe社のソフトウェアを用いてWindows上でアニメーションに変換した。まず、EPSファイルをAdobe Illustratorを用いて開き、コメント等を必要に応じて記入し、Illustratorのファイルとして保存する(以下、aiファイル)。GMTの機能として、図にコメントを記入することは可能であるが、日本語のコメントを入れること、および以下の作業との関連から、この手順をとっている。この際、ファイル名に時刻順にシーケンシャルな番号を振っておくと以下の作業が楽になる。

次に、Adobe Live Motionからアニメーションの最初の時刻のaiファイルを“シークエンスの配置”を指定して開けると、ファイル名に振られた番号順にスナップショットのaiファイルが読み込まれる。アニメーションの形式は、プラットホームに依存しないこと、インターネットを通じて一般公開することを念頭におき、swf形式(Shock wave flash object)とした。swf形式におけるアニメーションの再生レートは、各スナップショットを1秒毎に再生することにした。これにより、ローカルなファイルへのアクセスあるいはネットワークにおいてもスムーズな転送が行われるのであれば、地震動の伝播状況が実時間で実感できる。なお、Adobe Live Motionは、swfファイルを埋め込んだhtmlファイルも同時に書き出す機能を有している。

4. おわりに

一般市民の地震への意識向上、地震学初学者への導入あるいは専門家に対しては過去の知見の確認と新しい課題の発見への期待といった様々な意図を含めて、地震動が伝播してゆく様子を示すアニメーションを作成した。作成に当たっては試行錯誤的に各種のパラメータを設定しているが、結果から判断して、少なくとも青森県周辺の地震記録の処理については適切なものと考えている。実際、今回の開発結果を踏まえ、研究目的で同種のアニメーションを複数作成したが、手順が決まっていることから作業は比較的容易であり、表したいこともうまく短時間で表現できるようになった。

ここでは、開発経緯を記したのみで、アニメーション結果の考察については記していないが（参考文献^{8), 9)}に記述）、これまでの知見の再確認に極めて有用であったことは言うまでもない。また、授業などで学生に紹介し、地震動の伝播あるいは空間分布のイメージを明確に持たせることに成功したと判断している。さらに、学会や研究集会における紹介の反響を見ると、専門家間の評価も高いと判断している。今後は、事例解析を重ね、既存知識の再確認や新たなテーマの発見に努めるとともに、一般にもできるだけ公開し、市民の意識向上に役立てたいと思っている。

謝 辞

ここで紹介したアニメーション化は、地球環境学科の梅澤香さんの卒業研究（平成13年度）の一環として行ったものである。遂行に当たっては、平成13年度弘前大学総合情報処理センター研究開発費の補助（400千円）を受けた。地震動記録は、防災科学技術研究所のHi-net、KiK-net、K-NETのデータを利用し、スナップショットの作成にはGMTを用いた。記して関係各位に謝意を示す。

参考文献

- 1) 宇津徳治：地震学，共立出版，74, 1985.
- 2) <http://www.hinet.bosai.go.jp/>
- 3) 青井真・小原一成・堀貞喜・笠原敬司・岡田義光：基盤強震観測網（KiK-net），日本地震学会ニュースレター，12, 31-34, 2000.
- 4) 青井真：K-NET，日本地震学会ニュースレター，9, 8-9, 1998.
- 5) Farnbach, J. S. : The complex envelope in seismic signal analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, 65, 951-962, 1975.
- 6) <http://www.llnl.gov/sac/>
- 7) Wessel, P., and W. H. F. Smith: New version of the Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Am., Geophys. Union., 1995
- 8) 梅澤香：地震動のアニメーション化の試み，平成13年度弘前大学理工学部地球環境学科卒業論文，2002.
- 9) 渡邊和俊，梅澤香，片岡俊一：青森県周辺域における地震波動伝播の可視化，地球惑星科学関連学会，2002年合同大会予稿集，S045-P012, 2002.