

地震音波データ同化システムの開発

長尾 大道 データ同化研究開発センター 特任准教授

東日本大震災の教訓

2011年3月11日午後2時46分に発生した東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)は、東北地方の太平洋岸を中心に、特に巨大津波による未曾有の大被害を惹き起こしました。この地震は、比較的予測しやすいはずの周期的な海洋プレート境界型地震であったにも関わらず、近年急速に発展した数値シミュレーション技術、大規模な高精度観測センサーアレイや人工衛星によるリアルタイム地球観測ネットワーク、さらにはインターネットを駆使した緊急地震速報システムをもってしても、津波の規模を大幅に過小評価してしまったこともあり、被害の拡大を食い止めることができませんでした。後の様々な研究によって、実は観測データに津波の規模を示す現象が多く記録されており、かつそれを基にシミュレーションモデルを構築すれば、津波の規模をかなり正確に予測可能であったという、地震学者にとっては大変悔やまれる事実が次々と判明しました。地球科学の両輪とも言える数値シミュレーションと観測データを、データ同化のような手法によってもっと有機的に融合し、近い将来、必ず起こるとされる東海・東南海・南海連動地震(南海トラフ地震)では同じ轍を踏まないよう、今からあらゆる準備しておく必要があることは言うまでもありません。

非地震観測によって捉えられる地震現象

地震の研究において最も基礎となる観測データはもちろん地震計データですが、近年の観測センサーの精緻化に伴い、本来は地震以外を目的とする観測において、地震と関連する現象が捉えられることが非常に多くなってきました。例えば、日本全域に設置されたGPS受信機網によって、長期にわたる地殻変動の時空間分布が鮮明に捉えられており、GPSデータ同化研究から、プレート境界にはプレート同士が強く固着している場所と滑りやすい場所とが存在することが分かってきています。特に前者においては、蓄積されたエネルギーが大地震として一気に解放されることが予想されます。

他の例としては、地震発生直後に震源から放出された音波が高層大気中を伝搬し、遠く離れた高感度気圧計によって「かすかな音」として捉えられることがあります。特に東日本大震災の際には、津波を起源とする音波が、高度数百kmに存在する電離層を振動させながら数千km遠方にまで届いたことが、GPSおよび気圧観測によって報告されました。データ同化研究開発センターでは、統計数理研究所の統計科学スーパーコンピュータシステムを利用して、2008年岩手・宮城内陸地震の際の地震音波伝搬や、2011年東北地方太平洋沖地震の際の電離層変動を再現することに成功しました(図1)。また実際に地震音波を捉えるために、長野県菅平および和歌山県潮岬に高感度気圧計を設置し(図2)、地震音波が津波よりも速く伝搬する性質を利用した「津波早期警戒システム」の構築に貢献することを目指しています。

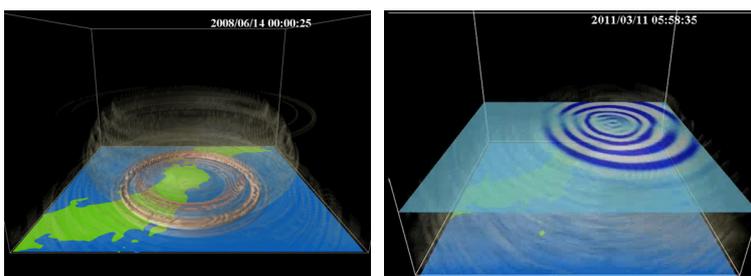


図1: データ同化によって再現された(左)2008年岩手・宮城内陸地震の際の地震音波伝搬、および(右)2011年東北地方太平洋沖地震の際の電離層変動の様子。



図2: (左)長野県菅平および和歌山県潮岬に展開されている地震音波データ同化システム(右)高感度微気圧センサー Nano-Baro Model 6000-16B

地震音波データ同化システム

データ同化研究開発センターでは、この地震音波現象に着目したデータ同化システムの開発を実施しています。本システムでは、各研究機関が地震波解析から算出した震源モデルを基に地震音波伝搬のシナリオを並列計算機を用いて大量にシミュレーションしておき、これと実際の観測データを、マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)を利用したデータ同化によって融合することにより、モデルパラメータに関する分布関数を高速かつ高精度に推定するという仕組みになっています(図3)。

本システムで推定するモデルパラメータは、次のパラメータベクトルにまとめられます。

$$\theta = (C \ V \ m_{1:N} \ t_0 \ \sigma_{1:K}^2)$$

ここに、Cは震源の位置、Vは断層破壊伝搬速度、mは断層沿いに配した仮想震源のモーメントの大きさ、t₀は上空を吹く風の影響度、σ²は観測点における観測ノイズレベルを表します。理論波形と観測波形を比較するための評価関数(事後分布)は、次式で与えます。

$$p(\theta | \delta p_{k,t}^{obs}) \propto p(\theta) \prod_{t=1}^T \prod_{k=1}^K \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k^2}} \exp \left[- \left(\delta p_{k,t}^{obs} - \sum_{n=1}^N m_n \delta p_{n,k,t-t_0}^{sim} \frac{nL}{(N-1)^n} \right)^2 / 2\sigma_k^2 \right]$$

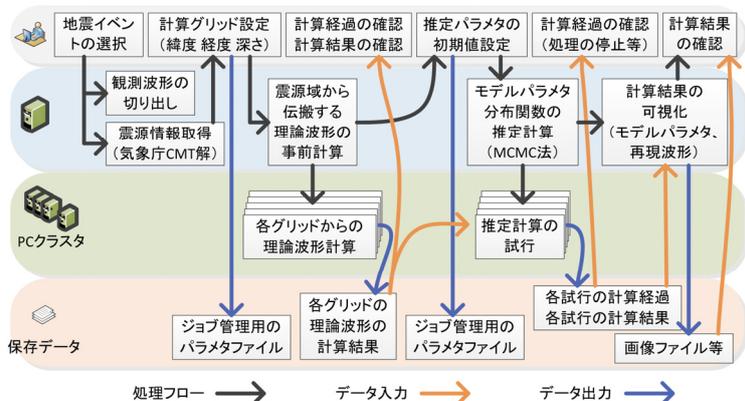


図3: 地震音波データ同化システムにおける解析の流れ。

双子実験によるシステムの検証

システムを検証するために、東南海地震が発生した際に予想される気圧変動を仮想観測データとする「双子実験」を実施したところ、始めに仮定した断層に関する真のパラメータを再現できることを確認しました(図4)。南海トラフ地震の発生から津波到来までは、早いところでもわずか数分という予測もなされており、より実用的なシステムへと発展させるために、今後はデータ同化計算および観測データ処理の高速化に取り組んでいきます。

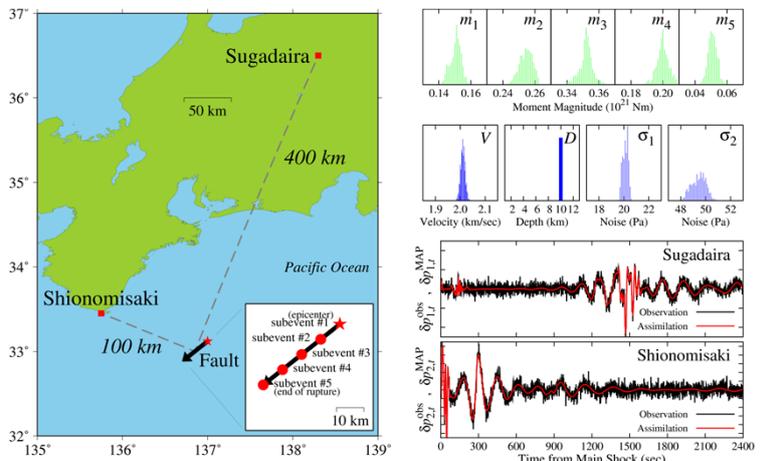


図4: 東南海地震の際に想定される菅平および潮岬での気圧変動シミュレーションを擬似観測データとした双子実験によるシステムの検証。

謝辞: 電気通信大学 富澤一准教授および京都大学防災研究所 林泰一准教授には、微気圧観測点設置に際して便宜を図って頂きました。また、地震音波伝搬の理論計算に際して、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 小林直樹助教より計算コードのご提供を頂きました。この場を借りて、御礼申し上げます。