

同化手法を用いたスペクトル情報の即時予測*

東北大学大学院工学研究科 館林大輔
東北大学災害科学国際研究所 源栄正人

1. 背景・目的

2011年東北地方太平洋沖地震発生時の緊急地震速報では、震源域が広大であり、震源情報の正確な推定ができず、予測震度の過小評価に繋がった。また、構造物減災の観点から、震度情報だけでなく、スペクトル情報を発令できる早期地震警報システムの整備が必要である。

これらの背景より、震源情報に頼らず、前線観測点で検知された波形情報をもとに直接、各地の震度情報およびスペクトル情報を予測する手法を検討することが、本研究の目的である。

2. 検討手法

(1) データ同化と粒子法¹⁾

データ同化を用いて解析空間におけるエネルギー分布の現状把握を行い、粒子法を用いて波動伝播解析及び地震動予測を行う。

各時間ステップにおいて、まず図2.1に示したフローにより「現状把握」を1回行う。その後、その現状把握したエネルギー分布を基に、図2.1に示したフローにより「予測」を複数回行う。例えば、1つの時間ステップの長さを1秒としたとき、20秒後のエネルギー分布を予測する場合は、1つの時間ステップの間に「現状把握」を1回、予測を20回行うことになる。

次の時間ステップでは、1つ前の時間ステップにおいて「現状把握」で推定されたエネルギー分布と、新たに与えられる各観測点のエネルギー密度を用いて、さらに「現状把握」を行い、その現状把握したエネルギー分布を基に、また「予測」を複数回行う。

この操作を図2.2のように繰り返すことによって、エネルギー分布の現状把握と未来のエネルギー分布の予測を行う。

(2) 計測震度の即時評価手法

計測震度の予測では、各観測点における計測震度をエネルギーに変換して解析を行う。図2.3に計測震度の予測フローを示す。

サイト增幅特性には、国総研(www.ysk.nilim.go.jp)による公開データを用いる。

震度増加量には、各観測点のサイト增幅特性G(f)より、以下の式により導出したdIを用いる。

$$dI = 2 \log G_A^{0.2-10.0} \quad (2.1)$$

$$G_A^{0.2-10.0} = \frac{1}{10.0-0.2} \int_{0.2}^{10.0} |G(f) * FC(f)| df \quad (2.2)$$

$$FC(f) = \left(\frac{1}{f}\right)^{0.5} \quad (2.3)$$

* Real time prediction of spectral information using the assimilation technique
by Daisuke Tatebayashi and Masato Motosaka

(3) スペクトルの即時評価手法

スペクトル情報の予測では、各時間における振幅スペクトルの各周波数における振幅成分をそれぞれエネルギーに変換し、各周波数について並行して複数の解析を行う。例えば、0.5Hzから10Hzまで0.5Hz刻み周波数の振幅成分を解析対象とする場合、並行して20の解析を行う。解析空間から出力された同一時間の各周波数における振幅成分を結ぶことによって、スペクトルの予測を行う。図2.4にスペクトルの予測フローを示す。

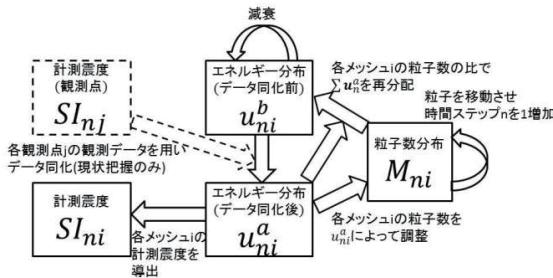


図2.1 現状把握及び地震動予測の解析フロー

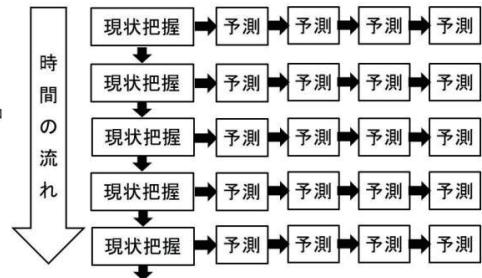


図2.2 解析ステップと時間との関係

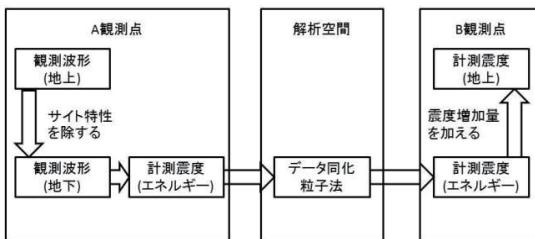


図2.3 計測震度情報の予測フロー

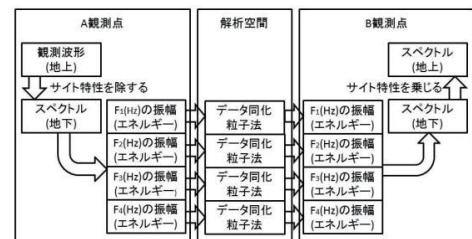


図2.4 スペクトル情報の予測フロー

3. 検討結果

(1) 計測震度の即時予測

東北地方の解析では北緯 37° 東経 138.5° を基準、関東地方の解析では北緯 34.5° 東経 135° を基準に、 $400\text{ km} \times 400\text{ km}$ の範囲を解析対象とし、各メッシュの大きさを $16\text{ km} \times 16\text{ km}$ とした。粒子数は、 1.0×10^5 個とした。2011年東北地方太平洋沖地震について、K-NET, KiK-netの観測記録を用いて、14時46分26秒をt=0とし、各ステップ間隔を1秒として解析を行った。

計測震度分布図とその10秒後予測分布図、各観測点を代表してMYG004(築館), FKS023(会津若松), TCG007(宇都宮), TKY007(新宿)の計測震度記録とその予測の時刻歴変化を図に示す。

東北地方の計測震度分布図とその10秒後予測図を見ると、強い計測震度が早期に観測された沿岸部の前線となる地域では予測ができていないが、内陸部の地域では前線を中心とした計測震度分布の広がりが高い精度で予測されている。

関東地方の計測震度分布図とその10秒後予測図を見ると、東北地方と同様に内陸部の地域では計測震度分布の広がりが高い精度で予測され、さらにその広がりの中心が実際の震源と同様に、福島県沿岸部から茨城県沿岸部に移動する様子が捉えられている。

東北地方について、MYG004 では第 2 波について震度 7 の実測に対し震度 5 強の 10 秒前予測、FKS023 では第 2 波について震度 5 強の実測に対し震度 5 弱の 10 秒前予測となるなど、計測震度の成長が遅れ若干の過小予測となる地点も見られた。

一方関東地方について、より多くの観測点記録を同化に用いることができ、TCG007 では第 2 波について震度 5 弱の実測に対し震度 5 弱の 10 秒前予測、TKY007 では第 2 波について震度 5 弱の実測に対し震度 5 弱の 20 秒前予測となるなど、高精度での予測となる地点が見られた。

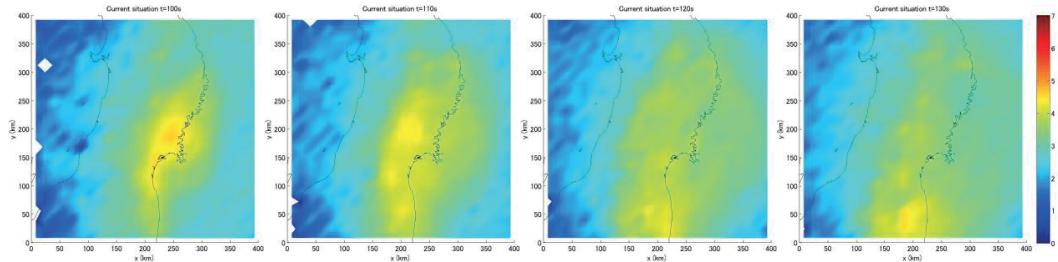


図 3.1.1 $t=100, 110, 120, 130$ における東北地方計測震度分布図

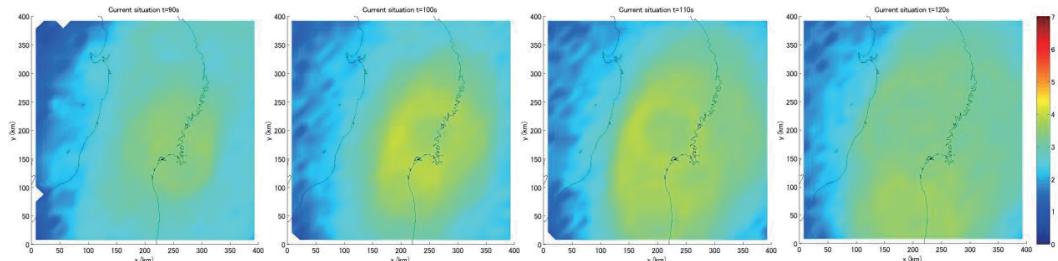


図 3.1.2 $t=90, 100, 110, 120$ における東北地方計測震度分布 10 秒後予測

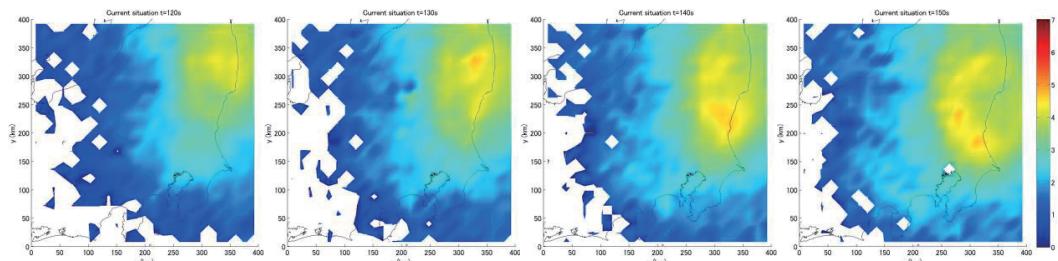


図 3.1.3 $t=120, 130, 140, 150$ における関東地方計測震度分布図

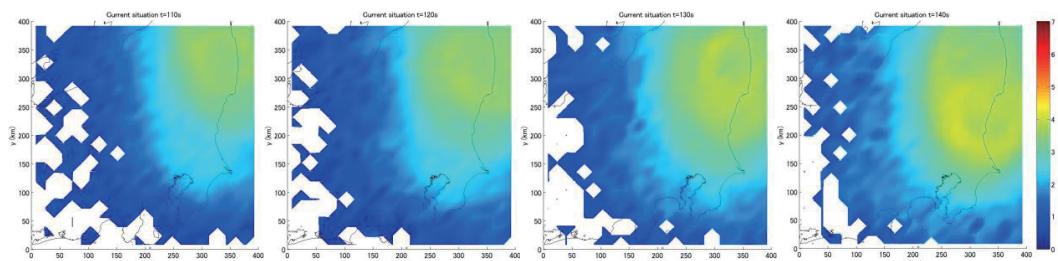


図 3.1.4 $t=110, 120, 130, 140$ における関東地方計測震度分布 10 秒後予測

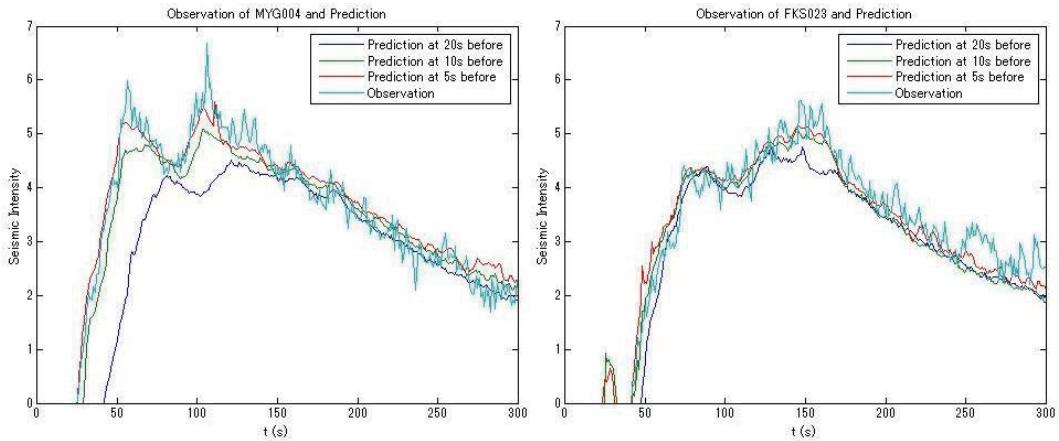


図 3.1.5 MYG004(築館)の計測震度予測図

図 3.1.6 FKS023(会津若松)の計測震度予測図

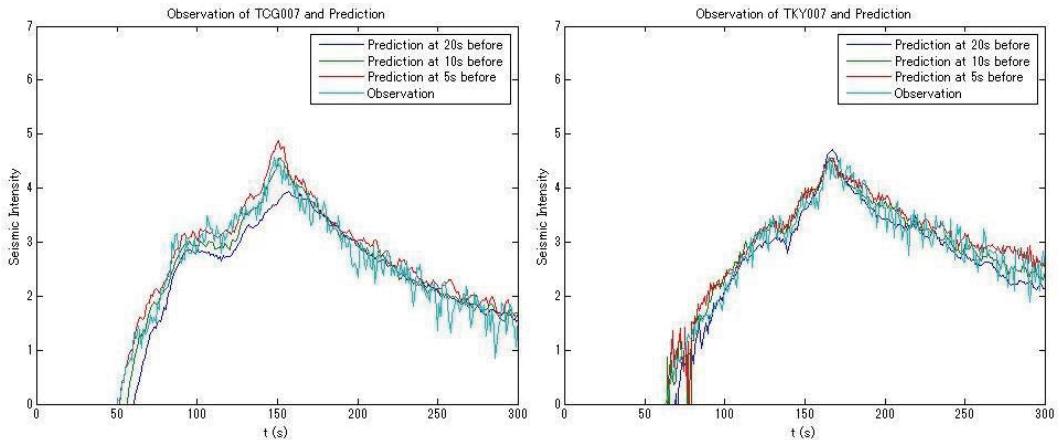


図 3.1.7 TCG007(宇都宮)の計測震度予測図

図 3.1.8 TKY007(新宿)の計測震度予測図

(2) スペクトルの即時予測

解析空間や粒子数などの解析条件は、計測震度の即時予測と同様とした。

2011年東北地方太平洋沖地震についての検討では、同様に14時46分26秒を $t=0$ としたが、新たに同年4月7日の余震についての検討を行い、こちらは23時32分40秒を $t=0$ とした。

スペクトルとして、時間ステップごとに各時間までの5.12秒間の加速度波形をFFTし、バンド幅1.0Hzで平滑化してフーリエスペクトルを作成し、この0.5Hzから10Hzまで0.5Hz刻み周波数の振幅成分を用いた。

図3.2.1、図3.2.2では、MYG004の3.11における0.5Hz、2.0Hzの振幅成分とその予測の時刻歴変化を示したが、これらの図を見ると、計測震度予測の場合と比較して誤差が大きくなっていることが分かる。3.11第2波到達時の各成分を結び、MYG004のスペクトル予測としたものを図3.2.3、同様にFKS023のスペクトル予測を図3.2.4に示したが、こちらも予測と実測で誤差が大きく、スペクトルの予測として信頼性に乏しい。

この原因を探るべく、まず 3.11 第 2 波と 4 月 7 日余震 S 波到達時の MYG004 におけるスペクトルの現状把握値と実測値を図 3.2.5, 図 3.2.6 に示す。現状把握値は解析空間における観測点地下の値にサイト增幅特性を乗じた値であり、本来実測値と同値となるはずの値であるが、これらの図では大きな誤差を生じている。ただ、2 つの図を比較すると、これらの誤差は異なる 2 つの地震で類似した傾向を示していることがわかる。

さらに、3.11 第 2 波到達時の MYG004, FKS023 におけるスペクトルの予測値と現状把握値を図 3.2.7, 図 3.2.8 に示したが、実測値に対する予測の場合と比較して誤差が小さく、現状把握値に対する予測値は高い信頼性を持つことがわかる。

以上の結果より、解析空間内での予測はできているものの、観測点と解析空間との間におけるデータの受け渡しに問題があると考えられる。この問題を解決する方法の一つとして、サイト增幅特性の見直しが考えられる。

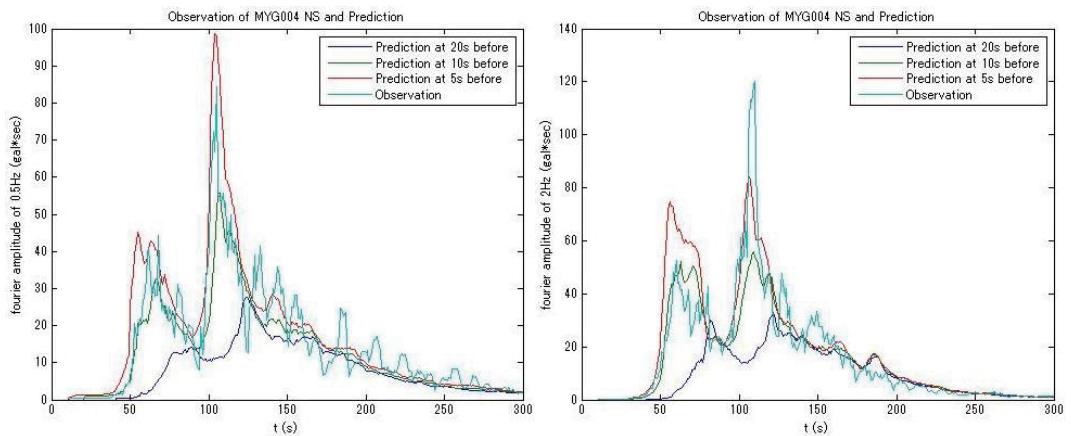


図 3.2.1(左) 3.11 時 MYG004(NS)における 0.5Hz のフーリエ振幅成分(予測と実測)

図 3.2.2(右) 3.11 時 MYG004(NS)における 2.0Hz のフーリエ振幅成分(予測と実測)

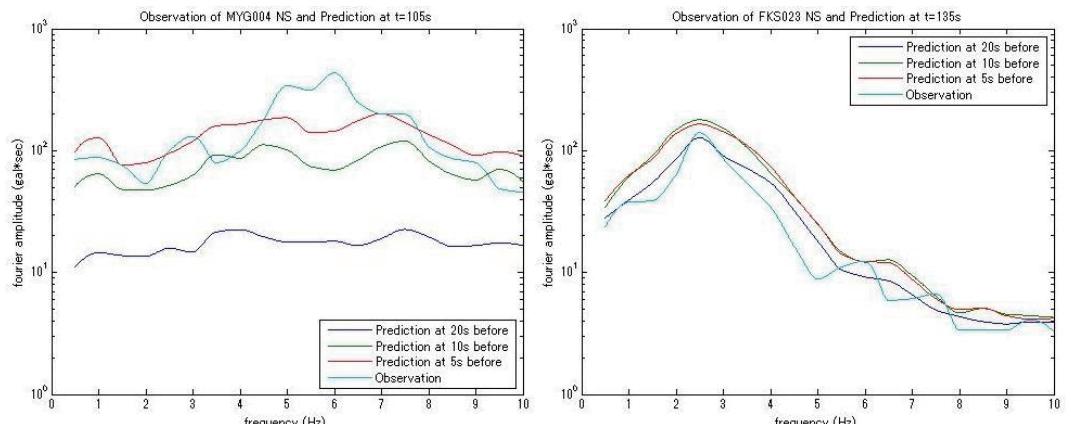


図 3.2.3(左) 3.11 第 2 波到達時 MYG004(NS)におけるフーリエスペクトル(予測と実測)

図 3.2.4(右) 3.11 第 2 波到達時 FKS023(NS)におけるフーリエスペクトル(予測と実測)

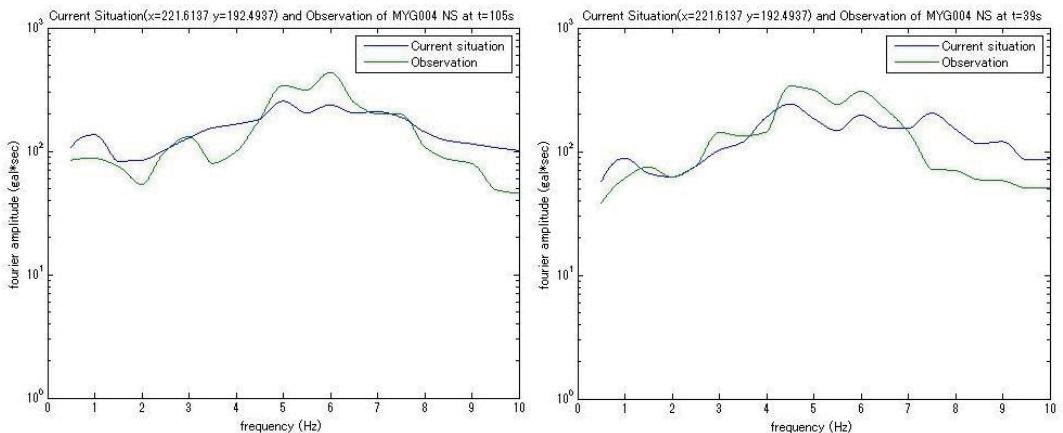


図 3.2.5(左) 3.11 第 2 波到達時 MYG004(NS)におけるフーリエスペクトル(現状把握と実測)

図 3.2.6(右) 4/7 余震 S 波到達時 MYG004(NS)におけるフーリエスペクトル(現状把握と実測)

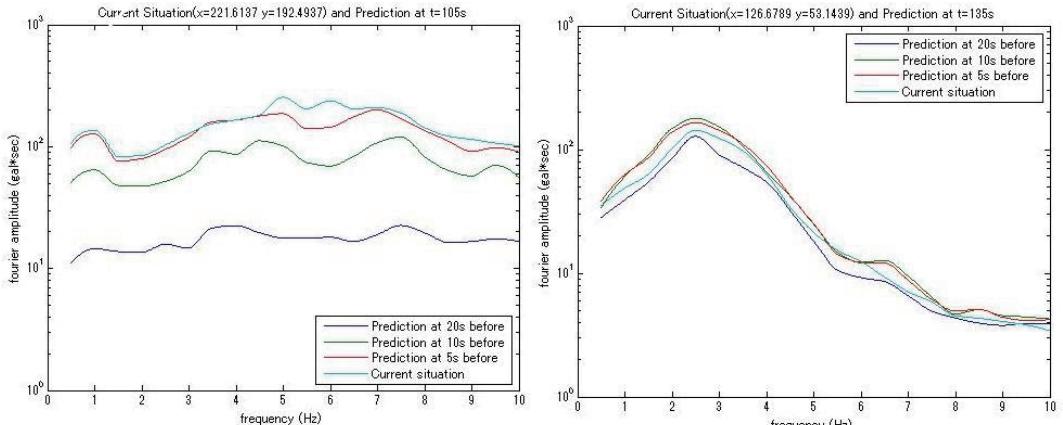


図 3.2.7(左) 3.11 第 2 波到達時 MYG004(NS)におけるフーリエスペクトル(予測と現状把握)

図 3.2.8(右) 3.11 第 2 波到達時 FKS023(NS)におけるフーリエスペクトル(予測と現状把握)

4.まとめ

計測震度について、特に前線から離れた観測点では、おおむね一致した値を予測できる。

スペクトルについて、予測として信頼性に乏しい。この改善方法の一つとして、複数の地震に対する現状把握値と予測値の誤差を用いてサイト增幅特性を逐次修正することが考えられる。

謝辞

防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net 強震記録を利用しました。記して感謝いたします。

国土技術政策総合研究所のサイト增幅特性データを利用しました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 干場充之,青木重樹: Numerical Shake Prediction for Earthquake Early Warning: Data Assimilation, Real-Time Shake Mapping, and Simulation of Wave Propagation, 2015