

## データ同化にもとづく津波即時予測：現況把握・予測とその高度化

前田 拓人（弘前大学大学院理工学研究科）

### はじめに

2004年スマトラ沖地震や2011年東北地方太平洋沖地震を受けて、地震・津波の海底観測網の整備が急速に進んでいる。特に日本周辺における海底圧力計による即時的津波監視網の発展には瞠目するものがある。西南日本では東南海においてDONETおよびDONET2の観測・公開が開始され、東日本太平洋沖ではS-netの運用と一部の公開が開始した。そして南海においてもさらに新たな観測網の構築が計画されるなど、21世紀初頭の地震観測網と同じような基盤観測網の充実とデータ量の爆発的な増加が、いま津波観測においても起こりつつある。

このような稠密かつリアルタイムにデータ伝送される記録を最大限に生かし、沖合の観測記録だけから、近地・遠地地震にかかわらず津波の全体像を一刻も早く推定し、津波来襲を正確に予測する手法が求められている。我々はその一手法として、地震による初期波源を推定することなしに、面的な津波波動場の状態（現況）を直接推定する逐次的データ同化手法を構築してきた。本講演では、地震即時解析・即時予測との類似性あるいは差異に触れながらその方法を概観するとともに、近年の高度化ならびに応用研究について紹介する。

### 逐次的津波データ同化とその応用

長周期・長波長の津波は、しばしば浅水波（線形長波）方程式でモデル化される。これは2次元面内における不均質媒質中の波動方程式に帰着されるもので、地震とは同じ波動現象であるものの、その速度構造は地中構造よりも高精度に推定されている水深にのみ依存するため、モデリングの精度は一般に高く、初期条件さえ的確に推定できれば非常に細かな津波波形の特徴まで再現することが可能になっている。

逐次的津波データ同化は、津波シミュレーションによる予測と、高密度な観測による波動場推定との組み合わせによって実現される（Maeda et al., 2015）。もともとのデータ同化という概念はたいへんに広いもので、固体地球物理学でいうところの逆問題をも含むものであるが、ここでは以下のような逐次的な手法のことを指す。

まず、何らかの波動場の現況から、数値シミュレーションにより微小時間後の波動場を予測する。予測された波動場とその時間における観測点における観測値とを比較し、もしそれらの間に差異があれば、観測-予測残差に比例した量の補正が波動場に対して適用される。ただし、予測は面的な波動場であるのに対して、観測は離散的な点でしか行われぬ。そこで、観測点の周辺にも補正值をある重み関数で割り当てることにする。このときの重み形状は、観測点の配置と観測および数値計算誤差の分散共分散構造の仮定のもとに、データ同化結果の2乗誤差を最小にする条件のもとに決めることができる（最適内挿法；Kalnay, 2003）。このようにして現在時刻の津波の現況が推定できれば、それを条件にさらに次の時間ステップの予測を行える。すなわち、このデータ同化は地震発生等に依拠することなく、逐次的に現況波動場の推定を行うことができる。この方法で得られるのは津波の空間波動場そのものであるので、いざ必要となればその現況を初期条件に将来予測シミュレーションを実行することも容易である。そのようなときにも、震源における地震発生の初期状態に戻る必要がない、

というのが逐次的津波データ同化法の大きな特徴である。

Maeda et al. (2015)は当時整備中だった S-net 敷設予定位置を仮想観測点として数値実験を行い、逐次的津波データ同化法の有効性を検証した。その後、ポップアップ型の海底地震観測に付随した圧力計で記録された津波に対し、それらを仮想的な即時記録とみなす予測実験が米国カスケディア (Gusman et al., 2016) およびニュージーランド沖 (Sheehan et al., in press) で行われており、いずれも良好な性質を示した。

当初提案された逐次的津波データ同化法には、計算量の問題があった。この方法を実際の津波即時予測に適用するためには、複数の段階でデータ同化から予測シミュレーションに切り替えて、予測対象地域における津波予測を行うことが不可欠である。だが、たかが2次元問題といえ、幾度もシミュレーションを行うのは計算機的な負荷が大きい。そのため、予測シミュレーションが高精度になるほど予測の即時性が落ちる、というトレードオフが存在した。この問題を解決したのが Wang et al. (2017)の Green's Function based Tsunami Data Assimilation (GFTDA)である。最適内挿法に基づくデータ同化では、予測された津波波動場は常に観測点とその周辺の重み関数を波源として生成される。したがって、観測点毎に重み関数を初期波源とした津波を予め計算しておけば、それらの線形結合から瞬時に予測津波波形が生成できる。このアイデアによって、逐次的津波データ同化法の計算量問題は大きく改善し、より複雑な線形分散波津波モデルを用いた津波即時予測も実現可能となった (Wang et al., 2018)。また、近年逐次的データ同化に基づく現況把握と即時予測を地震の表面波に適用することにも成功した (Furumura et al., in press & 本集会) が、特に計算量の多い地震波動伝播問題に対してこの GFTDA を適用する試みも進行中である (大峽・他, 本集会)。

逐次的津波データ同化法は、予測-観測残差をモデルにフィードバックするというシンプルな仕組みであるため、異種データへの適用や混合も比較的容易である。たとえば、Mulia et al. (2017)は、DONET 等海底圧力に海洋を移動中の船舶の位置情報データを組み合わせることにより高精度な同化およびインバージョンが可能であることを示した。木村・他(2018)は視線方向の津波流速を推定できる海洋レーダに基づく津波データ同化の数値実験を行い、レーダー記録だけから津波の現況把握と予測ができることを示した。

このように多種多様なデータに対して適用と高度化の進む逐次的津波データ同化法であるが、肝心の海底圧力計に対しては困難に直面している。圧力計はあくまでも海底と海面の相対距離を推定するものであるため、地震による地殻変動によって海底と海面が同時に移動してしまうと波高が推定できない。そのため、せっかく津波を震源直上で観測できたとしても、地震直後にはそのデータを生かせないことになってしまう。これは、逐次的津波データ同化法に限らない、津波即時予測研究の多くの手法に共通する大きな問題である。また、津波が震源域の外側に伝播すると、震源域では地殻変動に起因する圧力計記録のオフセットが生ずる。津波データ同化においては、オフセットがあらたな波源として認識されてしまい、推定に不整合が生じるという問題があった。最近 Maeda (2017)は、この圧力オフセットが存在する記録に基づくデータ同化結果が津波の波動方程式には従わないという事実を逆手にとり、そのオフセット項をも逐次的に推定する方法を提案した。しかし、地殻変動によるオフセットと津波高とは完全にトレードオフする関係にあり、あらゆる状況で適切に分離できる方法はいまのところ存在しないようである。さらなる手法の高度化と、そもそも「どこまで即時的に推定できるのか」という限界点の見極めのための研究の推進が期待される。