

博士論文（要約）

津波水位・流速逆解析による沖合巨大 津波観測計画実験

(Observation system study experiment of mega-tsunamis
by sea level and flow velocity inversion)

舘畑 秀衛

学位論文内容の要旨

近年、沖合設置型津波計の観測データを用いた線形逆解析（インバージョン）は、津波予報モデルの初期値を得る手法として注目されている。この津波逆解析は、従来、海水の水位変化の観測データを用いて行われており、流体の基本的な要素である流速は研究に用いられていなかった。理由は、歴史的に津波の研究には検潮所の検潮データが主に利用されてきたためと思われる。

次に、津波が発生した海域での初期流速が解析対象にされていないのは、主に津波の逆解析が地震断層の地殻（海底）変位の推定に行われていることが大きいと思われる。地震断層運動の鉛直成分は明確に津波を起こすが、水平の変位（海底の水平移動）は、海水の水平移動を引き起こすわけではなく、津波の初期流速は極僅かである。結局、観測でも Source である波源でも「津波の流速」は注目されて来なかった。

ところが、例えば 2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震津波 (M9) では、本震お後 3 ～ 5 分遅れて日本海溝西側直近で高角で細長い一種の副断層が動き、海面を 20 ～ 30m 持ち上げたため、三陸沿岸では最初の大津波に遅れてやってきた巨大津波が重なり甚大な被害を起こした。加えて最初の地震によって、陸域に設置された多くの地震計がスケールアウト、または破壊されたために、遅れて発生した地震の概要が分からず、結局、三陸沖に設置されていた GPS 津波計に、過去、例の無い巨大津波が観測されるまで、気象庁は正しい予報ができなかった。

この時間差のある大地震と大津波の例は、1707 年 10 月 28 日の宝永地震がある。古文書の類では、七～八丁歩く程の時間揺れが続いたと記録されている例もあり、複数の地震断層が時間差を持って動いたとする学説がある。確かに 311 東北津波時では気象庁（千代田区大手町、屋内）での身体の次元 motion から、震源は三陸沖 M8.2 程度と思われた（経験的推定）が、異常に揺れが長いため M8.5 程度かと推定し直した経験がある。時間差のある地震断層は想定南海トラフ巨大地震でも考慮されている。

時間差のある複数の地震断層による津波は、最後の地震を時間軸のゼロ基準点とすると、それ以前に発生した地震は既に広がり始めており、流速を持って伝播している。津波波源の推定を逆解析を使って行う時、最後に発生した津波を解析する津波時刻としなければ意味がなく、先に発生した津波は既に流速を持っている。つまり個々の津波は初期流速を持っていないが、発生に時間差がある場合は、ある時刻の津波の流速を逆解析する必要がある。特に時間差が 10 分以上になると無視できなくなり、311 東北津波の経験から最初の地震後、数十分間は高感度地震計がノイズで観測不能になるため、津波の観測データから全てを予報しなければならず、津波波源における流速の逆解析推定が必要となる。

本論は、最初に津波の波源逆解析の理論的な考察から始まる。津波研究者の間での逆解析は、直接、行列を用いて説明されることが多く、津波（2 次元空間での浅海長波）の解析的

な Green 関数に関する文献は少ないため、敢えて初学的、かつ詳細に記述した。また津波の流速に関する Green 関数も記述した。津波の高さ（水位）に加えて、流速データを用いた場合の Data kernel（行列を用いて離散的に表現された Green 関数）、最小自乗法による解法に比べて、より少ない観測点、より多い単位波源の推定に有利な最小ノルム法による解法について、多くの津波逆解析を用いている研究者の悩みである単位波形の数値分散ノイズを最小にする手法を考案して記述した。

興味深い結果として、津波の初期流速を推定するためには、必ずしも流速の観測データは必要ないことである。水位だけの観測でも初期流速は求められ、流速の観測だけから初期水位だけを求めることも可能である。上の Data kernel は、水位と流速の津波波動場一杯に拡張一般化したものと考えることができ、一部分を使うことでどのような観測要素から波源におけるどのような推定要素でも、実用する場合の組み合わせは自由である。ただし、初期流速の推定には、観測点の配置に制限がある事が示された。

実際の観測における流速観測測器の、Instrumental な考察等は行っていない。実際の津波の流速は、数 mm/sec ～数 cm/sec のオーダーであるため、測定が難しいが、従来実用になっている電磁式流速計を津波の代表的周期を考慮してサンプリングレートを減らせば、比較的容易に実現できると考えられる。

観測要素として、1 観測点に合計 3 成分（ η , V_x , V_y ）のセンサーが同架された場合、逆解析結果の精度は、単純には 3 倍、進行波の状態では 3 つの成分は $|\mathbf{v}| = \sqrt{g/D}$ で結ばれるため、情報量として 2 倍と考えられるため逆解析結果の精度も 2 倍程度と期待できる。三陸沖の海域に 311 東北津波の断層モデルと波源から仮想観測データを作成し、同海域に観測点を置いた場合の仮想観測点を用いて、逆解析精度向上の効果を数値実験で確認した。水位の観測センサーとしては GPS 波浪計のような絶対水位が測定できるセンサーを想定し、海底と海面との相対距離だけが測定される水圧式津波計についての議論は、他の研究に譲り、本論では行っていない。観測点数（密度）と津波発生から観測データの終了までのデータ時間長を変化させながら、主に、仮想観測データの作成に用いた初期海面変動（初期流速無し）と、逆解析結果として得られた初期海面変動との相関係数で評価した。結果、流速観測による精度向上の効果は、観測点数が少ない場合（推定したい単位波源の総数に比較して相対的な数）に特に有効であること、特に波源の真上に設置した場合に有効であることが示された。

もともと流速観測を加えることは、波源への方向（津波の到来方向）が推定できることから、波源の真上の設置は、波源が観測点の真下の方向に存在すると判定することと同値であると考えられ、この結果は自然であると言える。また、精度向上の効果は高く、常に水位のみの観測よりも高精度の結果が得られる。ただし、精度向上には限界があり、ある一定の観測点密度になると、どちらの観測要素であっても同等になる結果が得られた。

本論の後半では、三陸沖に展開された S-net の観測点配置を比較対象とし、3 成分観測を仮定した場合の最適な観測点配置を検討した。ただし、S-net は水位のみの観測とした。観

測点数を 5 点程度から始めて、最大 50 点程度まで 3 成分観測点を変化させる。同時にデータ時間長も何通りか変化させて数値実験させることとした。推定すべき単位波源の配置と数は、この実験の意味付けを考える上で重要である。何故なら、単位波源を特定の過去津波事例に特化したなら、その津波に関する事例解析となって結果の一般性が無くなるからである。本論では、あえて 311 東北津波の波源の最大水位変動から 10%以上とした、狭い範囲に単位波源を限定した場合と、三陸沖の広い範囲で何処で発生しても必ず、そこそこの結果が得られる観測点配置に 2 通りを実験検討した。

結果、推定すべき単位波源を 311 東北津波に極限定した結果では、データ時間長 10 分程度の短い時間長では、波源真上周辺での配置が効果が高いものの、データ時間長を 30 以上に延ばすと、逆に沿岸部に密度高く配置した方が効果が高いという結果となった。この現象の解釈としては、波源真上の配置は効果的であるものの、観測点密度による青銅向上効果は沿岸部より早く上限に達するため、むしろ沿岸部に配置した方が精度的には高くなるからと言える。ただし、この向上は僅かである。

次に、何処で津波が発生しても、そこそこの結果が得られる観測点配置を決定するアルゴリズムとして、Data Kernel の行ベクトルの独立性に注目し、1 次独立である行ベクトルを多く受け持つ観測点を配置効率の高い観測点と定義して、観測点を選別するアルゴリズムを開発した。結果、水深 200m 程度の海域と 6000m の海域では観測点密度が半分程度になるものの、ほぼ想定海域に均一に配置する観測点配置が得られた。観測点を通過する全ての単位波源からの津波（単位波形）の波長の平均値を考えれば、水深の深い海域での観測点での平均的な津波の波長が長くなるため、観測点配置が粗になるためと考えられる。

津波発生の想定海域内の何処で津波が発生しても一定の精度が得られることは、解析的にも数値実験的にも確認不能であるが、本論では 311 東北津波に加えて、もう 1 例の実験を行っている。明治三陸津波の 37 年後に昭和三陸津波が発生している。これは前者の地震断層による歪みによって、日本海溝の東側の領域で太平洋プレートが断層を起こした現象と解釈されている。311 東北津波でも、同様に日本海溝の東側で昭和三陸地震と同様の、正断層型大地震と津波が、近い将来、発生する可能性は有ると本研究者は考えている。

2 つの津波事例に対して、3 成分観測による逆解析結果は水位のみの観測による結果より高精度を示した。S-net の観測点配置と水位観測とした場合の初期水位分布の相関係数で評価すると、S-net の 1/3 ~ 1/5 点程度で同等の精度が得られる事が示された。特に上述の想定日本海溝東側正断層型大津波では、S-net が大陸棚側に偏っているため、広い範囲に観測点を配置する本研究結果の観測点配置と 3 成分観測点の方が高精度であった。

以上の結果は、3 成分観測は S-net の観測点数を減らして、全体費用を削減できることが示された。これは日本以外の他の津波災害に苦しむ国々、特に、経済的に裕福とは言えないアジア諸国が S-net の技術を導入し、独自の沖合津波観測網と津波予報体制の可能性を開くと、本研究者は期待している。