

## 学位論文の要旨

氏名	Iyan Eka Mulia
学位論文題目	Tsunami Source Estimation and Waveform Forecasting using Computational Intelligence (計算知能を用いた津波波源推定と波形予測)

2011年東北地方太平洋沖地震において、GPS津波波高計が津波の水位変動をいち早く捉え、津波波源の逆解析から地震発生28分後に東北沿岸各地の津波警報を正確に更新した。従来の津波波源解析が、地殻-上部マントルの不均質な媒体を伝搬する地震波に基づくものに対して、均質媒体である海水中の波動伝搬は、既知量である海底地形分布の関数としてその挙動は明確であり、津波警報の代替手法として注目が集まっている。

本研究は、計算知能技術を導入することで、2つの課題：津波波源の推定ならびに津波波形の予測、に対する新たな解析手法を提案したものである。第1課題に対する検討では、逆解析を通じて津波波源のメカニズムを解明するために、従来の計算手法を修正あるいは更新する新たな手法を展開する。第2課題に対する検討では、地震発生早期の沖合の津波観測データを用いて、短時間のうちに沿岸各地に津波警報を発令するリアルタイム津波予測の実用化に貢献する新たな数値手法を展開する。

第1章では、本研究を取り巻く社会的な要請と学術的に期待される背景を述べた後、この分野の最近の研究動向を概説し本研究の位置づけを明確にした。次いで、本研究が津波波源の変動挙動の推定と、沿岸に來襲する津波波形の予測、という2つの柱で構成されることを説明し、次章以下の論文構成を記述した。

第2章では、本研究で展開した「津波波形の逆解析 (TWI)」のコアとなるアルゴリズムを解説した。逆解析で安定な解を求めるために導入する平滑化手法や、波源域の時間変動を再現するための多段時間窓解析 (multiple window inversion) を説明した。

第3章では、本研究で逆解析におけるパラメータ推定に用いた、いくつかの計算知能 (CI) アルゴリズムについて解説した。単位波源の最適位置と時間遅れに関するパラメータ推定には、遺伝的アルゴリズム (GA) と、パターンサーチ (PS) を用いており、それらの考え方や数学的記述を展開した。また、津波のリアルタイム予測では、ニューラルネットワークの一種でトレーニングスピードが速いことに特徴があるエクストリーム・ラーニングマシン (ELM) を用いており、その考え方や数学的記述を示している。

第4章では、GAとPSを援用した津波波源の逆推定について数値解析結果を示し考察を行った。本章では、本研究が提案する解析手法の妥当性を明確にするために、まず、理想化された津波波源モデルを想定した解析を実施した。海面波形を順解析した結果を真値として目標時系列とし、GA/PSを導入した逆解析手法は、従来の最小2乗法に基づく逆解析よりも正確に時系列を再現できることを示した。GA/PSの導入により単位波源の個数を減少させることができると同時に、計算の安定性も増すことが確認された。

第5章では、理想波源に対して実施した第4章の考察を、2011年東北地方太平洋沖地震(2011 Tohoku) の波源挙動の推定に拡張したものである。2011Tohokuにおいて沖合・沿岸各地でGPS波浪計、海底水圧式波浪計などで観測された津波時系列を逆解析に用いた。こうした2011Tohokuに対する津波波源解析は、他の研究機関でも実施されているが、本研究は単位波源の位置について、ランダムに分布させるのではなく、初期分布として格子点で与えたものから適切なポイント群を選び出す手法を提案し、また断層破壊の時間進行のパラメータ推定にGAやPSといった計算知能を活用したところに独創性があると考えられる。

第6章では、本研究で提案する逆解析の手法を津波のリアルタイム予測への応用することを考察したものである。津波のリアルタイム予測は、沿岸住民の津波に対する避難情報を提供することが目的であることから、地震発生からできるだけ短い時間で、波源域の逆解析、波源域から沿岸各地への順解析を終了させなければならない。この課題では第3章で解説したELMを援用した逆解析結果を提示し、従来手法と比較した場合の本解析結果の精度、計算速度、安定性などを議論した。またELMを用いた結果の信頼性解析から、ネットワークパラメータがランダムな特性を持つにもかかわらず、本手法は一貫した予測能力を持つことを示した。

第7章では、本研究で得られた主要な結果をまとめるとともに、本研究で展開した手法の有用な点と限界について総括した。また、今後の解明すべき課題について提示した。

## Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Tsunami Source Estimation and Waveform Forecasting using Computational Intelligence

Name: Iyan Eka Mulia

The 2011 Tohoku Earthquake triggered a tsunami warning for 28 minutes after the initiation of the megathrust earthquake. However, a more precise tsunami wave forecast could now be issued based on an inverse analysis of offshore tsunami motions. This inversion analysis uses well-known quantities such as the propagation speed of tsunami waves in a homogeneous medium (i.e., sea water) and the bathymetry. Because of its simplicity, this method is expected to be an alternative tool to the conventional one that uses seismic waves for which propagation is affected by heterogeneity in the crust and upper mantle.

This study proposes novel approaches for two subjects: estimating the source of the initial tsunami and forecasting a tsunami waveform using computational intelligence. In the former case, the proposed method is expected to enhance (or replace) existing computational methods for revealing the underlying physics of tsunami source movements. In the latter case, the method can contribute to the modification of real-time tsunami forecasting systems using offshore tsunami observation data.

**Chapter 1** explains the general backgrounds, motivations, and expected contributions of the study. The chapter also establishes the main framework of the thesis that is divided into two parts: the estimation of tsunami sources and forecasting tsunami waveforms.

**Chapter 2** explains the fundamental theory of the TWI method, which is the core of the algorithm used in the both parts of this study (estimation of tsunami source and waveform forecasting). The description also includes a general formulation of a regularization scheme that is typically incorporated into the TWI to maintain stable solutions. Additionally, mathematical expressions for single and multiple time window inversions are presented.

**Chapter 3** describes the general theories of the CI comprised of a GA and an ELM. A brief introduction to the PS routine as a supplement for the GA is also described. For the GA and PS, the descriptions are mainly in generalized forms, and thus may not be directly related to the TWI. Details on the connections of the GA-PS algorithms to particular TWI applications are discussed separately in Chapters 4 and 5.

**Chapter 4** discusses the first attempt to apply the proposed method using GA and PS to estimate the tsunami source. In this chapter, all data (i.e., tsunami source,

waveforms) are artificial except for bathymetry. The GA-PS algorithm was first tested using the same design parameters as in the TWI. The purpose of this test was simply to compare the performance of the proposed GA-PS method with the traditional least squares inversion in the same model design and environment. Rather, the second design parameters are the essence of the study. It aims to find the optimal locations of unit sources that, in the initial state, are distributed randomly around the tsunami source. The use of the artificial data in an ideal case allows assessment of the advantage of the proposed method in a more detailed manner.

**Chapter 5** is an extension of Chapter 4. Here, the GA-PS algorithm is applied to the real case of the 2011 Tohoku tsunami. However, there are several additional steps which were previously not included in the ideal case. For example, the determination of the source area uses backwards-propagated tsunami arrival times and a multiple time window inversion that includes the computation of time delays. Other than those, in the real case, instead of using randomly distributed unit sources, the model uses a very dense set of unit sources and selects the optimal ones. Therefore, in the real case, waveform interpolation is not required.

**Chapter 6** is the second part of the study, in which the use of the ELM is described in relation to tsunami waveform forecasting. The descriptions are started by a brief review of existing studies of tsunami forecasting using neural networks, and followed by explaining the potential application of the ELM, which has never been used before. Various statistical analyses were conducted to assess the performance of the proposed model. An uncertainty analysis was also performed to ensure that the ELM has a consistent predictive power in spite of the random characteristics of the network parameters.

**Chapter 7** presents an overall summary of the conclusions of the study, then goes on to provide detail for each of the Chapters 4, 5 and 6.