

沖合観測情報を用いたインバージョン法によるリアルタイム津波予測

Real-Time Tsunami Prediction by Inverse Analysis of Tsunami Profiles Observed at Offshore Points

安田誠宏¹・高山知司²・川村健太³・間瀬 肇⁴

Tomohiro YASUDA, Tomotsuka TAKAYAMA, Kenta KAWAMURA and Hajime MASE

The present paper has discussed how to improve our real-time tsunami prediction method by the inverse analysis of tsunami profile observed at offshore points. The inverse analysis of the offshore tsunami data estimates the initial displacements of water surface in the segmented tsunami sources. The estimated initial displacements predict tsunami profiles at inshore points of interests. Our prediction method is tried to improve by the introduction of correlation factors with surrounding segmented sources, the supplement of another observation point, or the employment of wider segmented source area. The paper also confirms that the real-time prediction can be applied to predict the tsunami at Shimotsu Port in Wakayama Prefecture as well as in Osaka Bay.

1. 緒 論

東南海・南海地震は概ね 100 ～ 150 年間隔で発生しており、今世紀前半での発生が懸念されている。このような巨大災害に対しては、ハード整備で 100 % の防災を目指すことは膨大な費用が掛かるために極めて困難であり、ソフト対策による減災対策も考える必要がある。地震発生時の津波をリアルタイムに推定しようとする、現状では地震情報から津波予測を行うこととなる。しかしながら、この場合、地震の揺れと津波の発生状況は異なるため、津波予報値の誤差や津波地震の見逃しが生じることが懸念される。2006 年 7 月に発生した西ジャワ地震は、揺れによる被害がない津波地震であったため、津波予報が遅れたという報告もある (Mori, 2007)。

著者ら (2006) はこれまでに南海地震モデルによるリアルタイム津波波源域の再現を試みたが、実用化に向けた精度の向上や必要観測時間の短縮など課題が残っていた。本研究では、これまでの手法を改良し、予測精度向上と実用化を目指した最適なリアルタイム津波予測手法を提案する。まず、2 章では本研究で提案しているリアルタイム津波予測の基本的な考え方を述べる。次に、3 章では実用化に向けての改良方法として、南海地震モデルを対象に、(1) 小領域間の相関を考慮する方法、(2) 観測点を追加して 3 点にする方法を検討する。南海地震モデルである程度の再現性が確認されたことを受けて、3. (3) では実際の対策に用いられ始めている中央防災会議の東南海・南海地震同時発生モデルに対応させるた

めに、波源域の推定範囲を拡大した検証を行う。3. (4) では、これらの検討結果から精度向上の要件を取りまとめて適用し、観測時間を短縮化した場合の予測精度を調べ、長時間継続予測の可能性についても検討する。最後に、得られた主要な結果をまとめて結論とする。

2. インバージョン法によるリアルタイム津波予測

本研究で提案しているリアルタイム津波予測は、GPS 波浪計等による沖合における津波観測データを活用して、地震発生時の津波の初期水位変動量の大きさや波源域の範囲をいち早く予測するとともに、沿岸に来襲する津波の時系列変動をリアルタイムで予測するものである。まず、図-1 に示すように波源域を 144 個の小領域に分割し、それぞれの小領域の水位変動に対する水位の応答関数を、沖合観測点および沿岸の対象地点について求めておく。沖合観測点としては室戸岬沖と潮岬沖の 2 地点を想定し、沿岸の対象地点は神戸空港、大阪港、関西空港の 3 地点とした。沖合津波観測情報を元にインバージョン解析をし、求められた各小領域の水位変動量を応答関数に乗ずることで、到達津波波形を瞬時に予測できるようにしている。応答関数の重ね合わせの正しさについて

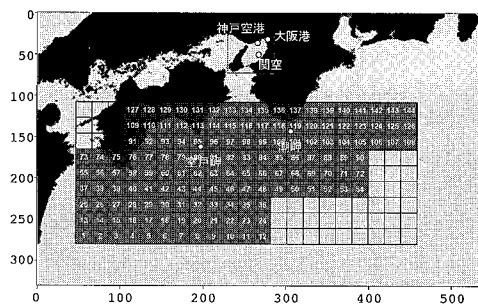


図-1 分割小領域 (格子サイズ: 27km×27km)

1 正 会 員 博(工) 京都大学助教 防災研究所
2 フェロー 工博 (財)沿岸技術研究センター 沿岸防災技術
研究所長
3 修(工) (株)リンクアンドモチベーション
4 正 会 員 工博 京都大学教授 防災研究所

は、著者ら (2006) の論文ですでに検証し、その精度を確認済みであるため、本稿では省略する。なお、津波シミュレーションには、後藤ら (1993) による線形長波モデルを用いた。計算格子間隔は外洋で 1350 m、大阪湾で 450 m であり、計算時間間隔は 2 秒とした。

3. 実用化に向けての改良

(1) 小領域間の相関を考慮したインバージョン法

これまでに著者ら (2006) が提案した手法では、津波の初期水位平面分布の推定において、隣接する小領域間の水位が滑らかになっていなかった。本来、初期水位平面分布は滑らかになるはずであり、隣接する小領域の水位変動量はある程度近い値になるべきである。そこで、ある小領域を囲む各小領域における水位変動量平均値を元の水位変動量に加えることで、小領域間における水位変動量の相関を考慮する方法を検討した。

具体的な方法としては、ある小領域の周囲に存在する 8 個の小領域の水位変動量を平均し、重み付けした小領域間の相関に関する係数 a_{oi} を誤差を求める際に加え、最小二乗法を用いて次式から求めた。なお、周囲に 8 個の小領域が存在しない箇所は、存在しない小領域の水位変動量を 0 に設定した。

$$E = \sum_n \sum_K \left\{ \eta_{obsK}(n) - \sum_i (a_i + a_{oi}) \eta_{Ki}(n) \right\}^2 \quad (1)$$

$$a_{oi} = \frac{1}{8} \beta \sum_{i=1}^8 a_{oi1} \quad (2)$$

K : 観測点番号, n : 観測時刻番号, i : 小領域番号, β : 相関影響関数である。

式 (1) の誤差 E を最小にする a_i を求めるために、次式の連立方程式を解く。

$$\frac{\partial E}{\partial a_i} = 2 \left\{ - \sum_n \sum_K \eta_{KJ}(n) \eta_{obsK}(n) + \sum_i (a_i + a_{oi}) \sum_n \sum_K \eta_{Ki}(n) \eta_{KJ}(n) \right\} = 0 \quad (3)$$

式 (3) は次式のように書き直すことができる。

$$\sum_i a_i \sum_n \sum_K \eta_{Ki}(n) \eta_{KJ}(n) = \sum_n \sum_K \eta_{KJ}(n) \left\{ \eta_{obsK}(n) - \sum_i a_{oi} \eta_{Ki}(n) \right\} \quad (4)$$

式 (4) をマトリックスで表すと、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} A_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A_{ij} = \sum_n \sum_K \eta_{Ki}(n) \eta_{KJ}(n),$$

$$B_i = \sum_n \sum_K \eta_{Ki}(n) \left\{ \eta_{obsK}(n) - \sum_i a_{oi} \eta_{Ki}(n) \right\}$$

一回目の反復計算では式 (5) で $a_{oi} = 0$ とし、 a_i を求

める。次に $a_{oi1} = a_i$ とし、式 (2) より a_{oi} を決定する。そしてこれを式 (5) に代入し a_i を求め、 $a_i + a_{oi}$ を水位変動量とする。そして再び $a_{oi1} = a_i + a_{oi}$ とし、式 (2) より a_{oi} を決定する。そしてこれを式 (5) に代入し a_i を求め、 $a_i + a_{oi}$ を水位変動量とする。

この計算過程を何回か繰り返すことで、小領域間の相関を考慮した水位変動量を求めることができる。観測データを入手してから予測結果を得るまでに必要な時間は、相関を考慮しなかった場合は 1 分以内であったが、相関の繰り返し計算に余分に時間を要するため 2 ～ 3 分掛かるようになった。なお、本研究では $\beta = 1$ とし、繰り返し回数は 8 回に設定した。

図-2 は相田 (1981) の安政南海地震モデルによる津波の初期水位平面分布であり、図-3 は小領域間の相関を考慮した場合の推定結果である。津波が観測点に到達してから 30 分間の観測データを元に推定した。一回目の反復計算で、小領域の水位変動量に最大で約 0.2 の変化がみられたが、その後はほとんど変化しなかった。小領域間の水位の相関は若干改善されたが、依然として好ましくない所がみられる。大阪湾内の予測についても、到達波高との誤差はほとんど改善されなかった。今回提案した方法は、ある小領域の周囲の小領域の水位変動量の平均値を元の水位変動量に加える方法であり、その平均値が数値としてあまり大きくならないことが原因と考えられる。

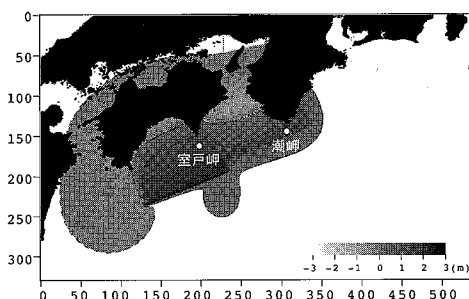


図-2 相田 (1981) の安政南海地震モデルによる津波の初期水位平面分布

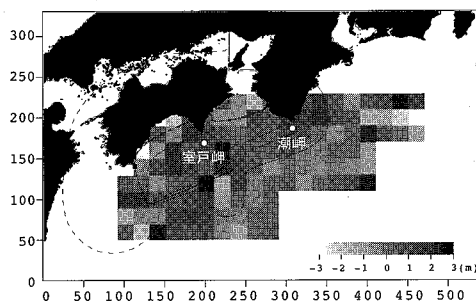


図-3 初期水位平面分布の推定結果 (小領域間の相関を考慮, 観測時間 30 分)

相関を考慮したことで、初期水位面分布に若干の改善はみられたが、反復計算により計算時間が1～2分増加した。短時間の増加ではあるが、リアルタイム予測においては解析に要する時間は短ければ短い方がよく、精度向上の割合に比して有利な方法とはいえない。そこで、以下の解析ではこの相関方法を用いないこととした。

(2) 沖合観測点の最適配置

本研究では、なるべく少ない沖合観測点を用いてリアルタイム津波予測を行うことを目指しているが、精度向上のために新たな観測点を設置することも有用な手段の一つである。その際、観測点をどこに配置すれば精度の良い予測結果が得られるのか、つまり観測点の最適配置について検討する。

これまでの検討地点である室戸岬沖、潮岬沖に加えて新たに設置する観測点は、図-4に●で示した7地点のうちの1点とした。3地点での誤差が最小になるよう、同様にインバージョン解析を実施して、初期水位変動量を求めた。なお、図-2の安政相田モデルを対象とし、30分間の観測データを用いて推定した。

足摺沖に追加設置した場合の大阪湾内での到達波形と予測結果の時系列を比較した結果を図-5(a)に示す。室戸岬と潮岬の2地点での結果も併せて図示している。足摺沖に追加設置した場合、2地点では2:30以降に過大予測していたのがやや改善されており、誤差も小さくなっているが、精度はあまり向上しなかった。図示していないが、四万十沖、奈半利沖のように、土佐湾沖に新たに観測点を設置した場合には、位相に乖離が見られ、逆に精度が悪化する結果となった。初期水位平面分布の推定においても、紀伊水道内での水位変動がプラスになり、逆の結果になった。

浅川沖に追加設置した場合の大阪湾内での到達波形と予測結果の時系列を比較した結果を図-5(b)に示す。関西空港でみられた短周期変動が減少し、予測値とのずれも小さくなった。浅川沖や白浜沖のように、紀伊水道付近に新たに観測点を設置した場合、大阪湾内の津波予測だけでなく、初期水位平面分布の予測においても精度は向上し、紀伊水道内でのマイナスの水位変動を再現できた。浅川沖と白浜沖を比較すると、浅川沖の方がより良い結果が得られた。

尾鷲沖に追加設置した場合の大阪湾内での到達波形と予測結果の時系列を比較した結果を図-5(c)に示す。新宮沖や尾鷲沖のような紀伊半島東部沖に新たに観測点を設置した場合、四国の南沖に設置した場合と同様に、大阪湾内の津波予測精度はあまり向上しなかった。

以上の検討より、室戸岬沖と潮岬沖に加えて新たに観測点を設置する場合、大阪湾内の津波予測精度向上のためには、紀伊水道内に新たに観測点を設置することがよ

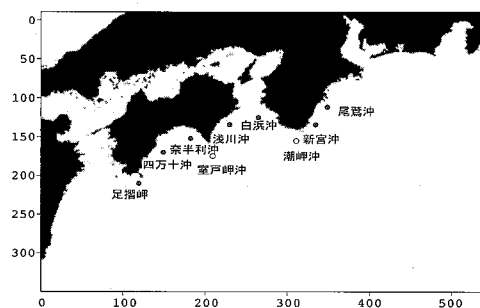


図-4 追加沖合観測点位置

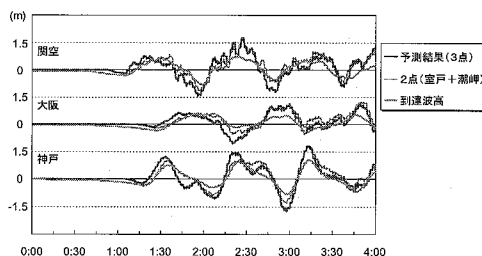


図-5(a) 大阪湾内での到達波形と予測結果の比較
(室戸岬+潮岬+足摺岬, 観測時間 30 分)

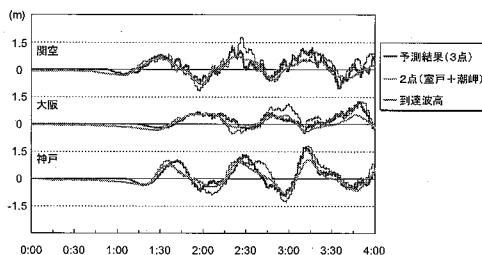


図-5(b) 大阪湾内での到達波形と予測結果の比較
(室戸岬+潮岬+浅川, 観測時間 30 分)

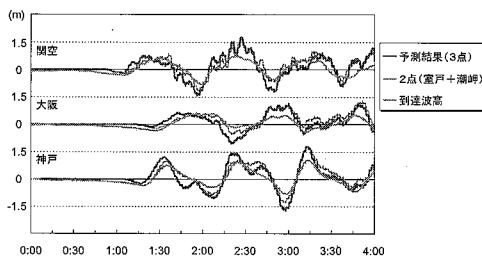


図-5(c) 大阪湾内での到達波形と予測結果の比較
(室戸岬+潮岬+尾鷲, 観測時間 30 分)

いことがわかった。当初、南海地震のような広域な初期水位平面分布を予測するためには、観測点を分散させる方がよいのではないかと予測していたが、紀伊水道内に設置する方が予測精度向上につながる事が明らかになった。今回、想定した7点の新たな観測点の中では、浅川沖を追加することが最も有用であることがわかった。

(3) 推定小領域の範囲

これまでは、比較的単純な南海地震モデルで検討し、予測精度の向上を図り、ある程度の再現性を確認することができた。一方で、和歌山県などの太平洋沿岸の各自治体においては、図-6に示す中央防災会議（2002）の東南海・南海地震同時発生モデルが、津波外力として対策に用いられている。本手法の実用化を考えた場合には、中防モデルによる検証も必要と考え、波源域の推定範囲を図-1から図-7のように拡大し、156個の小領域に分割した。沖合観測点は室戸岬沖と潮岬沖の2地点で、30分間の観測データを元に推定した。

逆解析の結果、図-8のような初期水位平面分布の推定結果が得られた。この図をみると、室戸岬付近での正の水位変動や、足摺岬から土佐湾にかけての負の水位変動をある程度再現しており、初期水位平面分布の傾向は推定できている。

図-9は、推定範囲を拡大した場合の大阪湾内の到達波形と予測結果の時系列を比較したものである。神戸港、大阪港、関西空港の3点とも、時系列変動をかなり精度良く再現できている。特に、1波目の再現精度は高い。関西空港での推定結果には短周期変動が現れていて、2波目以降は若干再現精度が低下する。しかし、30分間の観測データを用いただけにも関わらず、いずれの点でも津波到達から約3時間後までの水位変動を再現できている。

また、図示はしていないが、推定範囲を拡大した小領域モデルを用いて、相田（1981）モデルによる南海地震津波の予測精度を再検証したところ、144個に分割した場合と比べて、大阪湾内の振幅の予測精度がかなり向上した。144個に分割した場合では、3時間後以降の再現があまりよくなかったが、対象領域の範囲を拡大したことで、いずれの点でも津波到達から約4時間後までの水位変動を再現できるようになった。

以上より、東南海地震にも対応できるよう波源域を拡大し156個の小領域に分割した結果、144個に分割した場合よりも予測精度は向上した。南海、東南海地震に関係なく、対象領域の範囲を広げた方法が有用であることがわかった。

(4) リアルタイム津波予測の実用化へ向けて

リアルタイム津波予測の実用化へ向けての検証として、大阪湾に加えて、和歌山県海南市の下津港に到達する津波予測を行った。下津港は地震発生後、約40分後に津波が到達する地点であり、地震発生後、即座にリアルタイム津波予測を行って避難勧告を出すなど、早急に対策を行う必要性の高い港である。実用化を目指すにあたって、和歌山県が採用している図-6に示した中防モデル（2002）を対象に、予測時間の短縮と長期継続予測の可

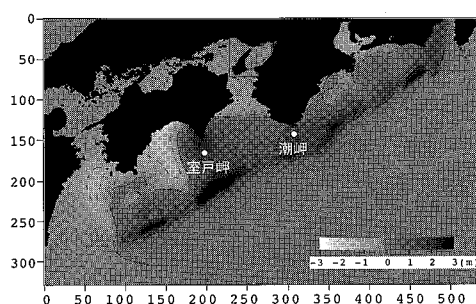


図-6 中央防災会議（2002）の東南海・南海地震同時発生モデルによる津波の初期水位平面分布

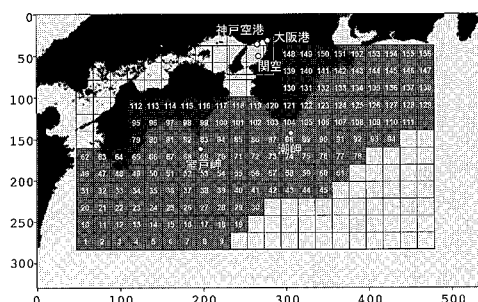


図-7 修正小領域モデル（格子サイズ：27km×27km）

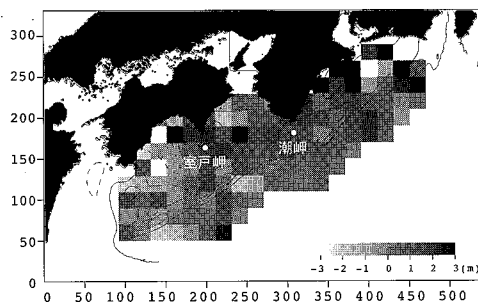


図-8 初期水位分布の推定結果（修正小領域モデル、観測時間30分）

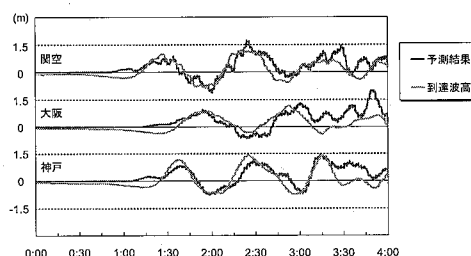


図-9 大阪湾内での到達波形と予測結果の比較（修正小領域モデル、観測時間30分）

能性についての検討を行った。これまでに得られた成果より、室戸岬沖、潮岬沖、浅川沖の3地点の観測データと、図-7の修正小領域モデルを用いた。

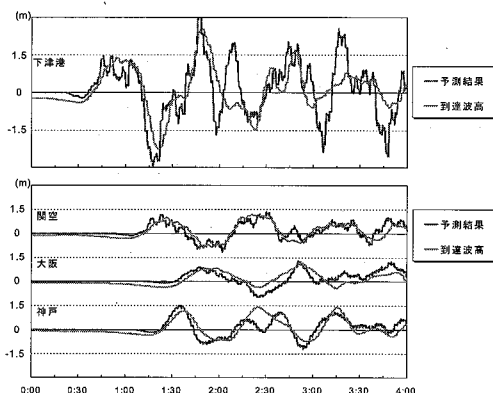


図-10 下津港と大阪湾内での到達波形と予測結果の比較
(3地点(室戸岬+潮岬+浅川), 観測時間15分)

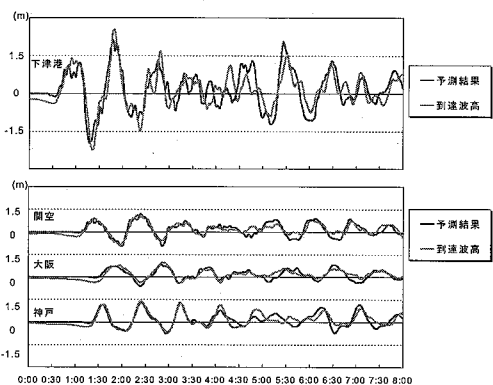


図-11 下津港と大阪湾内での到達波形と予測結果の比較
(3地点(室戸岬+潮岬+浅川), 観測時間1時間)

図-10は室戸岬沖、潮岬沖、浅川沖の3地点における15分間の観測データを元に推定した結果である。下津港における第2波目までが精度よく予測できている。大阪湾内の予測においても、3地点を用いたことで、15分間の観測データによる予測精度が大幅に向上した。

長期継続予測の検証として、1時間の観測データを用いて推定した対象地点の予測時系列と到達波形とを比較した8時間後までの結果を図-11に示す。約8時間後まで、下津港、大阪湾内ともに、到達津波の傾向を十分に予測することができた。1時間の観測データを用いれば、警報解除時期の判断材料として用いられることの可能性を確認できた。

4. 結 論

本研究で得られた主要な結果を以下にまとめ、結論とする。

(1) 小領域間の相関を考慮する方法は、反復計算により水位変動量に多少の変化が表れ、関係は若干改善され

るが、隣接する小領域の水位が滑らかに接続せず、収束計算時間が掛かる割に、期待したほどの効果は得られなかった。新たな手法の考案が必要である。

- (2) 沖合観測点として室戸岬沖と潮岬沖に加えて、四国南沖、紀伊水道内、紀伊半島東部沖のいずれかに1点を追加して予測精度を比較したところ、大阪湾内の予測においては観測点を分散させるのではなく、紀伊水道内、特に浅川沖に追加するのがよいことがわかった。
- (3) 小領域の範囲を拡大し、中央防災会議の東南海・南海地震同時発生モデルで予測精度を検証した結果、初期水位平面分布における室戸岬付近での正の水位変動や足摺岬から土佐湾にかけての負の水位変動を再現できた。また、観測値と逆解析結果は十分に一致することがわかった。
- (4) 観測点2地点では30分間の観測期間が必要であったが、浅川沖を加えた3地点にすることで15分間の予測精度が大きく向上した。また、1時間の観測期間で、和歌山下津港、大阪湾内ともに、約8時間後まで到達津波の傾向を予測でき、警報解除時期の判断材料としての有用性も高いことを確認した。
- (5) 実用化を考慮した最適予測手法は、以下のとおりである。

- ・小領域同士の相関を考慮しない応答関数を用いるインバージョン解析を行う。
- ・小領域の格子サイズは27 km×27 km以下とする。
- ・小領域モデルの範囲は東南海・南海地震の波源域を含む範囲とする。
- ・想定沖合観測点が室戸岬、潮岬の2地点ならば、観測時間は地震発生から30分間必要であり、室戸岬、潮岬、浅川の3地点であれば、観測時間を10～15分間まで短縮できる。

参 考 文 献

- 相田 勇(1981): 南海道沖の津波の数値実験, 東京大学地震研究所集報, Vol. 56, pp. 713-730.
- 小池信昭(2002): 先験情報を考慮したインバージョンによる津波初期水位分布の推定方法との精度に関する研究, 土木学会論文集, No. 712, II-60, pp. 117-135.
- 後藤智明・佐藤一央(1993): 三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発, 港研報告, Vol. 32, No. 2, pp. 3-44.
- 中央防災会議-東南海、南海地震等に関する専門調査会(2002): 東南海、南海地震に関する報告, 平成15年12月.
- 安田誠宏・高山知司・川村健太(2006): 観測データを用いたグリーン関数重ね合わせ法によるリアルタイム津波波源域推定法, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 311-315.
- Mori, J.(2007): The July 17, 2006 Tsunami Earthquake in West Java, Indonesia, *Annals of Disas. Prev. Res. Inst.*, Kyoto Univ., No. 50A (in printing).