海岸工学論文集，第55巻（2008）
土木学会，1416-1420

多目的ブイを用いたネットワーク型津波警報システムの人的被害軽減効果に関する研究

Initial Assessment on Capability of Multi-Purpose Buoy System for Tsunami Warning

竹内政彦[1]・越村俊一[2]・目黒公郎[3]

Masahiko TAKEUCHI, Shunichi KOSHIMURA and Kimiro MEGURO

The authors assess the capability of multi-purpose buoy system for tsunami warning, by calculating the number of potential tsunami casualty. The method is developed by integration of tsunami numerical models and GIS analysis with population database and fragility functions. The present method is applied to the potential tsunami events along the Sunda megathrust to assess the effect of tsunami casualty mitigation by implementing international/regional tsunami observation network of multi-purpose buoy system. The results imply that the international tsunami observation network can contribute to reduce the tsunami casualty along the Indian Ocean countries up to 60% by expecting the lead time to issue the early warning.

1. はじめに

2004年スマトラ島沖地震津波を契機に進められたインド洋津波警報システム構想（たとえばIOC, 2006）は，太平洋の津波警報技術のインド洋への移転を前提としたものである．しかし，高度な津波警報技術の運用はインド洋沿岸諸国にとって財政的負担が大きいことに加え，運用にあたる人材の育成，技術課題の解決，維持管理の持続可能性に大きな不安が残る．これらの課題を克服するため，安価で維持管理しやすく，特に沿岸漁業や観光業の日常的な海洋観測ニーズを満たすブイ（多目的ブイ）をインド洋沿岸地域で運用し，そのブイで津波観測も行うことで予報体制を構築するという新しい津波防災対策が目黒・高島(2006)によって提案された．本研究は，多目的ブイネットワークによる津波警報システムの有効性を，観測情報の活用による人的被害軽減効果に着目して検証を行うことを目的とする．

まずインド洋で起こりうる津波を網羅的に考慮するため，スンダ海溝沿いに160通りの地震津波シナリオを想定し，各地域の津波浸水エリア内の人的被害数を推計する．次に，160通りの津波シナリオに対し，津波が発生した際に最も早く津波を検知し観測情報を発信できる地域を推定し，多目的ブイネットワークの人的被害軽減効果を各地域の避難の実施による人的被害の軽減率と軽減数との関連で評価する．最後に，多目的ブイネットワークの有効性を検討するため，各津波シナリオにおいて，インド洋全体でブイをネットワーク化して観測情報を共有した場合と各国内の観測網だけで情報共有した場合の人的被害軽減率の差を比較する．

1　工修　財務省主計局
2正会員　博(工)　東北大学准教授　大学院工学研究科
3正会員　工博　東京大学教授　生産技術研究所

2. 津波による人的被害の推計

(1) 想定津波と数値解析

図-1に示すように，(20°S, 65°E)から(25°N, 130°E)までを計算領域として津波の数値解析を行う．計算には，地球座標系の線形長波理論に基づく差分モデルを採用する（たとえばNagano ら, 1991）．空間格子間隔は1分（約1,800m），時間格子間隔は3秒，時間積分は14,400step（12時間）とした．海底地形データは，GEBCO（British Oceanographic Data Centre, 1997）の1分グリッドデータを利用した．インド洋で発生し得る巨大地震の発生地域については，USGSによる1971年以降の地震震央分布とテクトニクスを考慮し，スンダ海溝沿いに限定することとした．**図-1**中の● は，本研究で想定した地震断層の基準点の位置である．スンダ海溝に沿って40点を設定し，既往のスンダ海溝沿いの巨大地震を考慮してモーメントマグニチュード M_w を8.0, 8.3, 8.7, 9の4通りで計160ケースのプレート境界型低角逆断層地震を想定した．断層面の走向はプレート境界と整合するようにし，断層面基準点（上端）の深さは10kmとした．また，断層長さ・幅 L, W は，Wells・Coppersmith(1994)による断層モデルの幾何学的経験則に整合するように決定し，断層滑り量 D は佐藤ら（1989）による M_w と M_o の関係式から地震モーメント M_o を求め，$M_o=\mu DLW$ の関係式から算定した（地盤の剛性率 $\mu=3.0\times10^{10}$ N/m）．

(2) 人的被害推計モデル

津波による人的被害の推計モデルは，越村ら（2005）が提案したPotential Tsunami Exposure（津波曝露人口）の推計モデルを基礎として，ブイによる津波警報の発令から各国沿岸部への津波到達までのリードタイムと避難率，および津波浸水深に対する死亡率を考慮する．津波浸水域内（計算格子毎）の推定死亡者数 PED（Potential

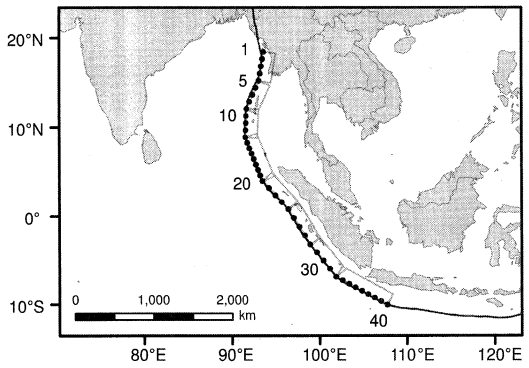

図-1　計算領域と地震シナリオの概要（図中の数字は断層の番号）

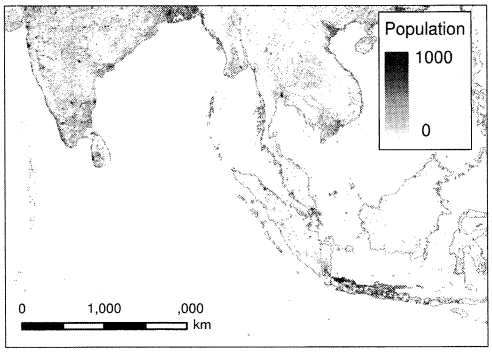

図-2　人口統計データ（LandScan）

Exposed-Death）を次式のように定義する．

$$PED(\eta, LT, Pop) = \alpha(\eta)\{1-\beta(LT)\}Pop \qquad (1)$$

ここでηは浸水深，LTは津波観測・警報によるリードタイム（後述），Popは浸水域内人口（計算格子毎），α（η）は浸水深ηに応じた死亡率，β（LT）はリードタイムに応じた避難率である．

陸上の津波浸水深および曝露人口を算定すべき陸地の格子は，標高30m,海岸線から5km を制約条件として設定する．浸水深ηは，対象とする陸上格子から最短の海域の格子をGIS を用いて探索し，そこの計算津波高を代表値として算出した．また，ηを算出した陸上格子と人口統計データ（Ork Ridge National Laboratory, 2006）をGIS 分析により関連づけ，浸水した陸上格子毎に浸水域内人口Popを算出した．

津波による人的被害は，大家ら（2006），木村ら（2006）が2004年スマトラ島沖地震津波の被害事例を用いて浸水深に対する死亡率という形でそれぞれ提案している．ここでは，Koshimura ら（2008）がBanda Aceh の津波浸水計算と人的被害データを元にして構築したFragility 関数を利用する．津波による人的被害の

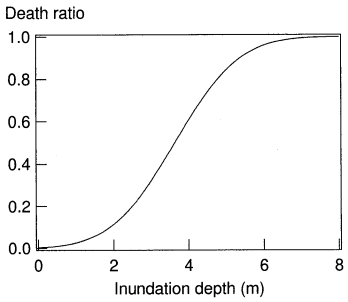

図-3　津波浸水深に対応した人的被害関数

Fragility を**図-3**および次式に示す．

$$\alpha(\eta) = \Phi\left[\frac{\eta-\mu}{\sigma}\right] \qquad (2)$$

ϕは標準正規分布の累積確率分布関数であり，μ，σはそれぞれηの平均値および標準偏差（μ=3.634, σ=1.356）である．

(3) 津波観測によるリードタイムと避難率

リードタイムLTとは，津波警報発令から沿岸部への津波到達までの時間（分）として次式で定義し，ブイの設置地点（後述）と沿岸部においてそれぞれ数値解析結果から求めておく．

$$LT = T_{ar} - T_0 \qquad (3)$$

ここでT_{ar}は沿岸の津波到達時間（水位変動±20cm 以上が記録された時間）として沿岸域の計算格子毎，津波イベント毎に計算しておく．T_0は津波警報発令時間であり，設置したブイが最も早く津波を検知した時間T_i（水位変動±20cm が観測される時間）に15分の猶予を加え，式(4)で定義する．15分の猶予を設定したのは，2004年スマトラ島沖地震津波の周期約1時間の1/4周期に相当する時間を津波検知の時間として見積もったためである．過去の事例としては，2007年9月11日11:10（UTC）に発生したスマトラ島沖地震時に発震後14分で太平洋津波警報センター（PTWC）から津波警戒速報第1報が伝えられている．

$$T_0 = T_i + 15.0 \qquad (4)$$

リードタイムに対する避難率βは，津波災害については既往の研究がない．ここでは，片田ら（2000）による豪雨災害時の住民の情報取得に関する研究と，岡本・目黒（2007）の津波避難行動シミュレーションの結果を参考にして，便宜的に**図-4**に示すように与えた．

(4) 人的被害推計結果

上述した手法に従い，160通りの津波発生シナリオに基づく津波数値解析を実施し，人的被害PEDの推計を行った．**図-5**に例示するのは，スンダ海溝に沿ってM_w=

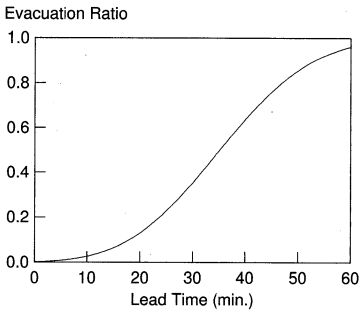

図-4　リードタイム LT と避難率 β の関係

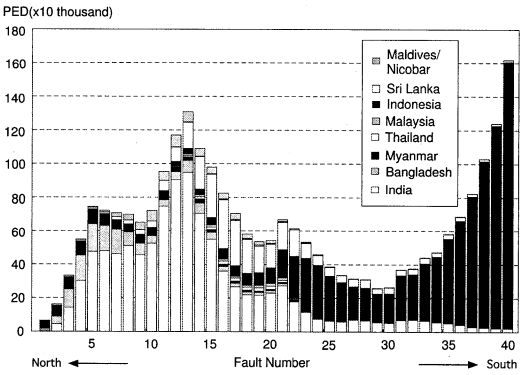

図-5　インド洋沿岸諸国の *PED* 試算結果（M8.7の地震の例）

8.7の地震の発生を想定した *PED* の国毎の試算結果である．**図**の横軸は断層番号（**図-1**参照）で，各番号で示した位置の断層帯で地震津波が発生した場合の *PED* を，上からモルディブ/ニコバル，スリランカ，インドネシア，マレーシア，タイ，ミャンマー，バングラディシュ，インドの順に示してある．ただし，ここで示した結果は，避難行動を考慮していない（β=0）．国毎の人的被害の様相は津波発生地により異なり，特に断層番号20番を境にして顕著に現れる．すなわち，スマトラ島以北で巨大地震が発生した場合には，インドにおける人的被害が大勢を占め，スマトラ島以南の場合にはインドネシアでの人的被害が圧倒的に増加することが分かる．

次に，地震の発生確率を考慮して，*PED* の期待値を算出する．これにより，潜在的な津波被災者が多いと考えられる地域を探索することが可能である．まず，イベント i の沿岸部津波浸水域内の推定死亡者数 PED_i を求め，イベント毎の津波発生確率 K_i を乗じて総和をとることにより，人的被害の *PED* の期待値を式(5)により算出する．

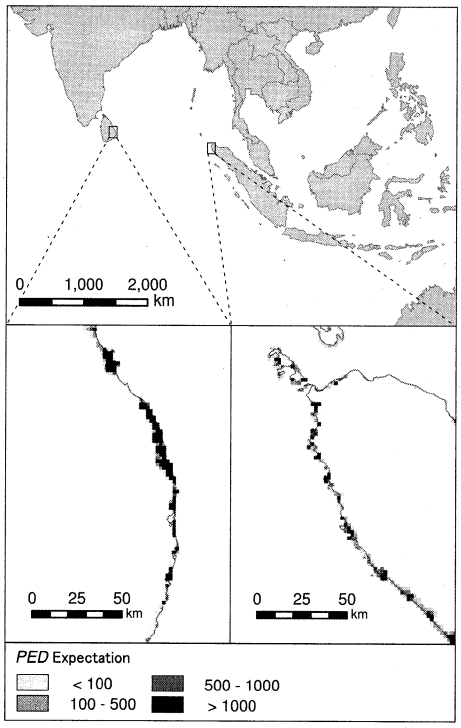

図-6　インド洋の津波危険度（*PED* の期待値）

$$\sum_{i=1}^{160} K_i \times PED_i \tag{5}$$

ただし，スンダ海溝沿いの巨大地震発生確率については未解明な部分も多く，Sieh(2007)がスンダ海溝の北部と南部に分けて歴史津波と現在の地盤の変動量から，今後の発生危険度について定性的に考察しているものの，現段階では定量的に示されたものがない．また，スマトラ島付近以外の地震津波についての言及がないなどの懸念があるが，本研究では K_i をグーテンベルク・リヒターの式(6)を援用して求めた．

$$\log n = a - bM \tag{6}$$

ここで n は地震のマグニチュード M に対して統計をとった地震の発生回数であり，a および b は地域毎に同定される定数である．ここでは b=1と仮定した．発生し得る地震のマグニチュードに応じて K_i（i=1,160）を算出した．たとえば，M=8.0の場合には，上式から求まる地震発生回数を n_M（M_w=8.0, 8.3, 8.7, 9.0）として，式(7)で算出した（K_i の総和は1になる）．

$$Ki = \frac{n_8/40}{n_8 + n_{8.3} + n_{8.7} + n_9} \tag{7}$$

図-6に，算出した *PED* の空間分布の例（スリランカ

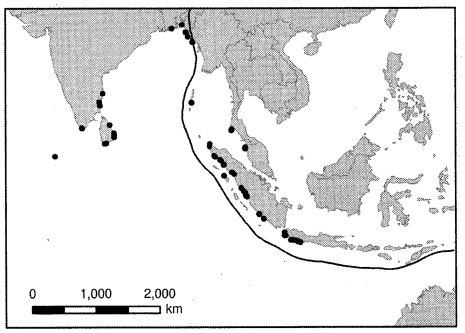

図-7　多目的ブイの設置位置

東岸とスマトラ島北部）を示す．スマトラ島北部では，西岸に沿って *PED* が高く，人口分布と津波高に応じて津波危険個所を選定することができた．

3. 津波警報システムによる人的被害軽減効果

上述の評価手法を踏まえて，多目的ブイネットワークによる予報体制の有無による被害軽減効果を議論する．ここでいう多目的ブイとは，沿岸部の事業主体（自治体，観光業者，漁業関係者，リゾートホテル等）が運用することを想定しており，たとえば加藤ら（2005）により提案されている GPS ブイを沿岸部に設置することによる津波検知を想定している．ブイの仮想設置位置は，人口1万人以上の都市の沿岸を制約条件として，160ケースの想定津波毎に最も早く津波が到達する地点を設置可能地点とした．**図-7**に，想定したブイ設置位置を示す．これらのブイネットワークによる津波の早期検知を考慮して，リードタイムに対応した避難率を考慮して人的被害数を推計する．また，ブイのネットワーク化による効果を見るために，ブイからの津波検知情報をインド洋沿岸諸国が各自で利用して予報を行う場合とインド洋全体で共有する場合に分けて検討を行った．

$$PMR = \sum_{i=1}^{160} K_i \frac{\alpha(\eta) Pop_i - PED_i}{\alpha(\eta) Pop_i} \qquad (8)$$

人的被害軽減効果（PMR:Potential-damage Mitigation Ratio）を式(8)に示す．すなわち，イベント i 毎にリードタイムの有無による *PED* の差を分子にとり，リードタイムを考慮しない場合の *PED* で除した値として定義する．リードタイム *LT* の算出には，**図-7**に示した仮想ブイ設置位置と沿岸部で出力した計算津波波形を用いた．**図-8**に，タイ南部・スマトラ島およびインド南部・スリランカにおける *PMR* の空間分布を例示する．*PMR* の算定には，インド洋全体でのブイの活用（**図-7**の配置）を前提とした．図の見やすさのため，*PMR*>0.3の地域のみを黒いドットで示してある．スンダ海溝沿いの巨大地震

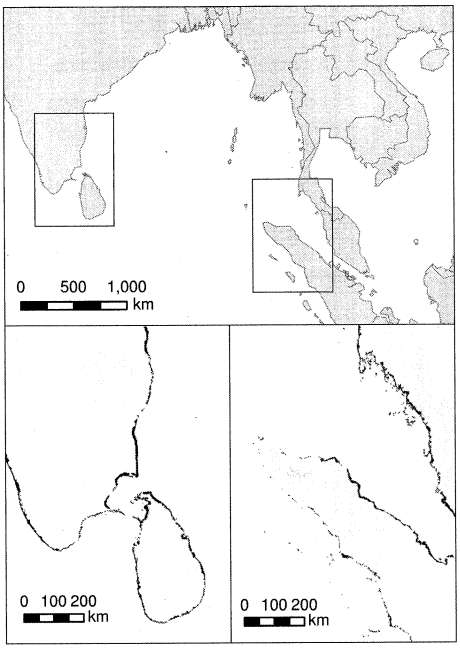

図-8　インド洋沿岸の人的被害軽減率の期待値（PMR）

の発生を考えた場合，波源から遠方にある地域ではブイによる津波検知の効果が高いと判断できる．しかし，波源に近いスマトラ島西岸におけるブイの効果は他国より低く（インドネシア全体で，*PMR* は0.2程度），スマトラ島では，ブイ観測による人的被害の軽減には限界があることが分かる．これは，スマトラ島への津波の到達時間が他のどの地域よりも早く，インド洋全体で観測情報を共有したとしても，リードタイムを大幅に稼ぐことが難しいためである．このような地域では，津波観測施設・予警報システムの整備に加え，迅速な避難を促すための対策も必要となる．

最後に，インド洋全体で国際的な津波観測ネットワークを構築した場合と，各国が独自の観測網で津波検知を行った場合の人的被害軽減効果を比較した結果を**図-9**に示す．インド洋全体で津波観測情報を共有することにより，多くの国で人的被害軽減効果が見込めることが分かる（最大9倍程度の被害軽減効果）．ただし，この結果には津波波源近傍のスマトラ島沖での観測施設の整備が大きく寄与していることに注意が必要である．自国沿岸部だけでなく，インド洋全体という大局的視野に立った観測施設の整備と情報共有が重要である．インド洋沿岸諸国が津波対策を考える場合には，自国周辺の津波観測体制のみに目を向けるのではなく，他国の観測施設も融通しあって活用することが人的被害の軽減に大きく寄与できることが明らかになった．たとえば上記の結果を活用して，沿岸各地のブイ設置・維持費用負担率を決定する

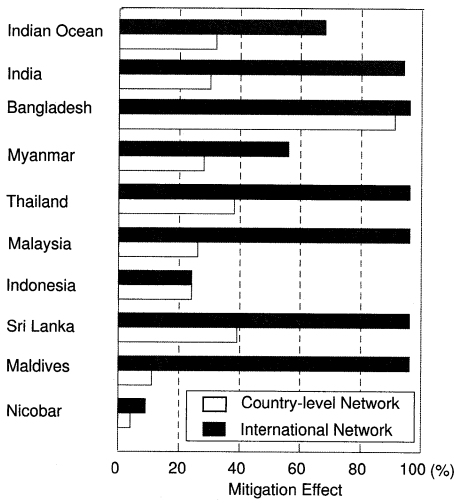

図-9 ブイのネットワーク化によるPMRの国別比較

などの仕組みが望まれる．

4. おわりに

本研究で得られた結果を以下に列挙する．

各地域の津波危険度を，津波が発生した際に被害者の絶対数が多い地域（*PED* の期待値高）として定量的に示すことができた．この結果は，津波防災対策推進地域の優先順位付けに利用できると考えられる．

インド洋沿岸において，津波による人的被害の軽減に効果的な多目的ブイの設置位置を推定した．主にミャンマー，ニコバル，インドネシアが津波観測情報発信国となればインド洋全体での人的被害の軽減が可能であることが分かった．

各地の人的被害軽減率 *PMR* を推計した結果，広範囲に多目的ブイのネットワークを構築すれば人的被害の大幅削減が可能であることが分かった．特にインド・スリランカ・バングラディシュ・タイなどでは最大96%の軽減が可能である．また，多目的ブイネットワークによる人的被害軽減率の期待値は，沿岸各地のブイ設置・維持費用負担率を決める際にも活用できる．

国毎の多目的ブイのネットワーク化の効果を，人的被害軽減率を尺度にして，自国内のみでネットワーク化する場合とインド洋全体で共有する場合に分けて評価した．その結果，インド洋全体で観測ネットワークを整備した場合には，自国のみの場合に比べて最大9倍程度の人的被害軽減が見込めることが分かった．多目的ブイによる観測ネットワークが津波警報システムとして十分な効果を持つことが分かった．

謝辞：本研究の一部は，科学研究費補助金基盤研究（A）（代表：目黒公郎，課題番号：18254002）および平成20年度産業技術研究助成事業（代表：越村俊一，プロジェクトID：08E52010a）の補助を受けて実施された．ここに記して謝意を表する．

参考文献

大家隆行・越村俊一・柳澤英明・今村文彦（2006）：2004年インド洋大津波によるバンダ・アチェ市街地の津波氾濫解析と被害評価，海岸工学論文集，第53巻，pp.221-225.

岡本 睦・目黒 公郎（2007）：避難行動シミュレーションに基づく避難困難度マッピングシステムの構築，第62回土木学会年次学術講演会講演概要集，CD-ROM.

加藤照之・寺田幸博・越村俊一・永井紀彦（2005）：GPS 津波計による津波観測，月刊地球，Vol.37, No.3, pp.179-183.

片田敏孝・淺田純作・桑沢敬行（2000）：GIS を用いた災害情報伝達のシミュレーション分析，土木情報システム論文集，Vol.9，pp.49-58.

木村健太郎・石見和久・佐藤誠一・福田忠弘・三上勉・菊池茂（2006）：スマトラ沖地震津波被害実態調査に基づく波源モデルの検証と建物被害関数の提案-スリランカ国 Matara 市の被害を対象として-，海岸工学論文集，第53巻，pp.301-305.

越村俊一・高島正典・鈴木進吾・林春男・今村文彦・河田恵昭（2005）：インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャルの評価，海岸工学論文集，第52巻，pp.1416-1420.

佐藤良輔（編）（1989）：日本の地震断層パラメター・ハンドブック，鹿島出版会，390p.

目黒公郎・高島正典（2006）：沿岸産業主導による津波災害軽減に向けて-多目的観測ブイを用いた津波警報システムの提案-，土木学会誌，第91巻，第7号，pp.42-43.

British Oceanographic Data Centre（1997）：The Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas（CD-ROM）

Intergovernmental Oceanographic Commission(2006)：Indian Ocean Tsunami Warning andMitigation System（IOTWS），http://ioc3.unesco.org/indotsunami/

Koshimura, S., T. Oie, H. Yanagisawa and F. Imamura（2008）：Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia, Coastal Engineering Journal, JSCE, submitted.

Mansinha, L. and D. E. Smylie（1971）：The Displacement Fields of Inclined Faults, Bull. Seism. Soc. Amer., 61(5), pp.1433-1440.

Nagano, O., F. Imamura and N. Shuto（1991）：A Numerical Model for Far-Field Tsunamis and Its Application to Predict Damages Done to Aquaculture,Natural Hazards, 4, pp.235-255.

Ork Ridge National Laboratory（2006）：LandScanTM Global Population Database http://www.ornl.gov/sci/landscan/

Sieh, K.（2007）: The Sunda megathrust -Past, present and future, Journal of Earthquake and Tsunami, Vol. 1, No.1, pp.1-19.

Wells, D. L. and K. J. Coppersmith（1994）：New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, Bulletin of the Seismological Society of America, 84（4）, pp.974-1002.