

琉球大学学術リポジトリ

沖合津波観測システムによる沖縄近海での津波早期 検知の可能性

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学理学部 公開日: 2020-10-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 仲間, 辰樹, 中村, 衛, Nakama, Tatsuki, Nakamura, Mamoru メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/46905

沖合津波観測システムによる沖縄近海での津波早期検知の可能性

仲間辰樹・中村衛*†

琉球大学理学部物質地球科学科地学系

Potential for the early detection of tsunami using a detection system offshore of the Ryukyu Islands

Tatsuki Nakama and Mamoru Nakamura*

Department of Physics and Earth Sciences, Faculty of Sciences, University of the Ryukyus, Senbaru 1,
Nishihara, Okinawa, 903-0213, Japan

Abstract

We examined changes in tsunami detection ability when an offshore tsunami observation network was installed around the Ryukyu arc. The offshore tsunami observation points around Okinawa and the Sakishima Islands, as well as the tsunami source areas, were first set, and then we numerically simulated tsunami and calculated the differences in their arrival times between offshore and coastal observation points. As a result, the detection time for tsunami generated in the Ryukyu Trench was shortened ~10–20 minutes via offshore tsunami observations. For tsunami generated near the Okinawa Trough, the detection time was shortened to ~10–30 minutes. These results suggest that the offshore tsunami observation network enables the detection of tsunami and the correction of tsunami warning information more quickly than do coastal tsunami observation points alone.

はじめに

津波災害を低減させる上で、大地震の発生直後に津波の正確な予報を出すことは重要な課題である。気象庁では1999年以降、量的津波予報システムで津波の高さを予測し、津波警報や津波注意報を発表している（草野・横田，2011）。量的津波予報では、日本近海の海域に約10万通りの地震モデルを用いて数値計算で津波の伝播を計算する。次に、沿岸に到達する津波の高さと到達時間をデータベースとして保存しておく。大地震が発生すると、発生した震源要素に最も近い地震をデータベースから検索して、各地の津波の高さと到達時間を予測し、津波注意報・津波警報を発表する。

しかしこのシステムには問題点がある。一つは地震の震源要素が実際の地震と異なる場合、津波の大きさを過大・過小予測してしまう点である。このことにより津波を過小予測してしまった例が、2011年東北地方太平洋沖地震津波である。東北地方太平洋沖地震発生時、気象庁は地震発生から約3分後に津波警報第1報を発表した。しかしマグニチュードを7.9と推定していたため、発表した津波の高さは宮城県で6m、岩手県および福島県で3mであった（気象庁，2011）。実際のマグニチュードは9.0と予測よりはるかに大きなものであった。気象庁では地震発生から24分後、釜石沖に設置されたGPS波浪計で急激な潮位の変化を観測した。この潮位変化を受けて津波警報を上方修正し、津波警報（大津波）の範囲の拡大、および波高予想の引き上げ（宮城県で10m以上、岩手県および福島県で6m）を行った。もう一つの間

* 連絡著者 Email: mnaka@sci.u-ryukyu.ac.jp

† Received: 17 July, 2020

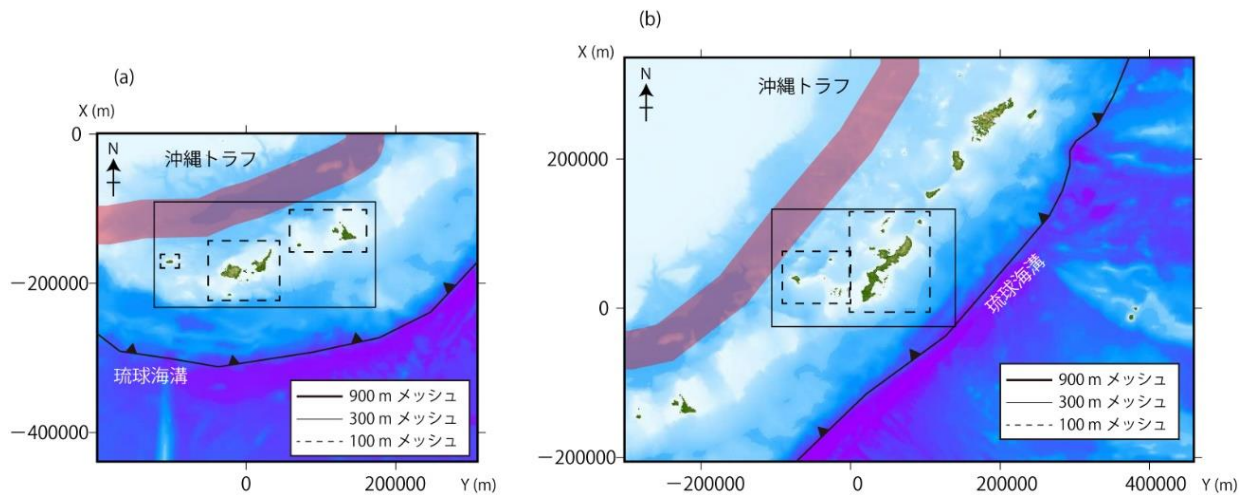


図1 計算領域。(a)は先島諸島、(b)は沖縄島周辺の計算領域をそれぞれ示す。

題点は、地震以外の事象や想定していないタイプの断層運動で生成した津波に対しては、データベースで検索できない点である。この例としては海底地すべりがある。大地震に伴って海底地すべりが発生した場合、現在の地震観測網ではこの現象をリアルタイムで検出するのは困難であり、かつ現在の量的津波予報システムでは扱われていない事象であるため、津波を過小評価してしまう要因となりうる。

このような従来の津波予報システムの弱点を補うため、東北地方太平洋沖地震以降、沖合津波観測網の活用が行われている（気象庁地震火山部，2012）。沿岸から離れた津波を早期に検知するシステムには、海洋レーダ（Hinata et al., 2011; Lipa et al., 2011; Lipa et al., 2012），GPS 海洋ブイ（加藤・他，1998），および海底水圧計（Kaneda et al., 2015; 植平，2016; NOAA, 2020）がある。気象庁の量的津波予報システムでは、沿岸にある津波観測点の記録に加え、GPS 海洋ブイおよび海底水圧計の記録を、津波予測と比較・修正して活用している（中田・西，2014）。いっぽう、沖合津波観測点が多に分布する場合、津波の波高分布を沖合津波観測網のデータから即時予測することで、地震の震源情報を必要としない津波予測技術の開発も進められている（Tanioka, 2017）。

海底水圧計は海底に水圧計を設置しており、津波が通過すると、海面高さの変化が水圧変化となって水圧計で記録される。海底水圧計を用いた津波監視システムには、海底水圧計とブイを組み合わせたものや海底ケーブルに数十 km 間隔で地震計・水圧計を接続したものがある。前者の例として DART システム（NOAA, 2020）がある。後者の例としては、東北地方の太平洋側に設置された S-net（植平，2016）や紀伊半島沖に設置された DONET（Kaneda et al., 2015）がある。

沖縄県では沖合津波観測網が未整備であり、気象庁の量的津波予報の評価・修正は沿岸津波観測点で観測された津波の記録で行っている。そのため、津波が海岸に到達するまで予測の評価や津波警報の更新ができない。そこで沖縄近海に沖合津波観測網を展開した場合、現状の沿岸津波観測点のみでの観測と比べて津波検知時間がどれだけ早くなるか（検知時間差）、津波の数値シミュレーションを用いて検証した。さらに沖合津波観測網の観測点数を減らした場合に津波検知時間がどの程度低下するか、数値シミュレーションを基に観測点配置と観測網の検知性能の関係を調べた。また、津波検知から沿岸に津波が来るまでに住民が避難する猶予の度合いを検討するため、沖合津波観測網で津波を検知してから沿岸に津波が来るまでの猶予時間を調べた。

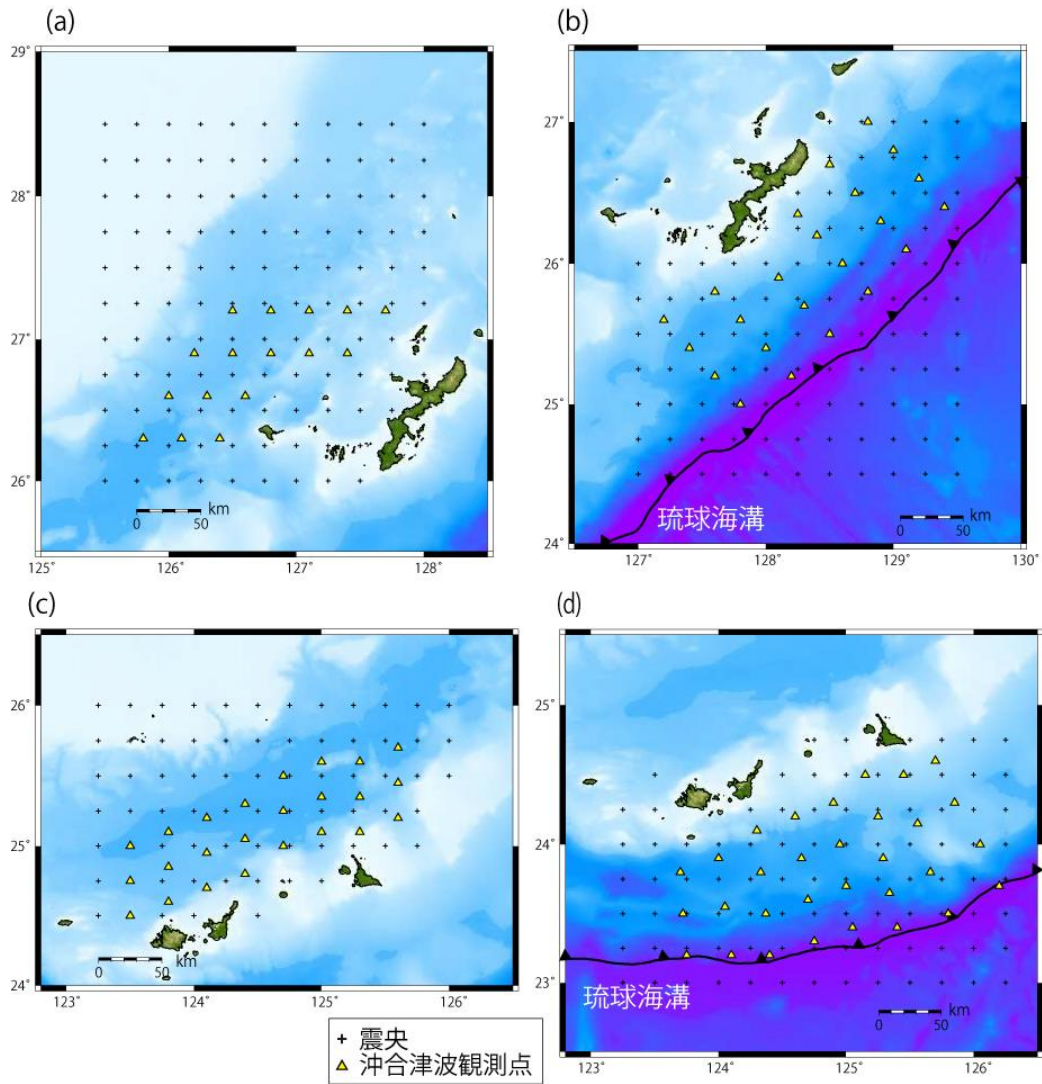


図2 震源と沖合津波観測点の分布図。(a)沖縄島周辺の沖縄トラフ側、(b)沖縄島周辺の琉球海溝側、(c)先島諸島の沖縄トラフ側、(d)先島諸島の琉球海溝側。

データと解析手法

計算対象領域を図1に示す。沖縄島周辺の津波に対しては、北緯 24.1° ～ 29.0° および東経 124.5° ～ 130.7° の領域で計算をおこなった。先島諸島周辺での津波に対しては、北緯 22.0° ～ 26.0° および東経 122.1° ～ 127.1° の領域で計算をおこなった。それぞれ平面直角座標系を適用している。計算格子間隔は900 m, 300 m, および100 mであり、島に近くなるにつれて格子間隔を狭くしている(図1)。津波の数値計算には津波計算コードJAGURS(Baba et al., 2015)を用いた。このソフトウェアを用いて、浸水を含む非線形長波式による津波伝播を計算した。計算時間は地震発生から1時間分である。計算時間間隔は0.2秒である。

津波の波源域と沖合津波観測点は、沖縄島の琉球海溝側と沖縄トラフ側、および先島諸島の琉球海溝側と沖縄トラフ側にそれぞれ設定した(図2)。沖縄島の琉球海溝側では、北緯 24.5°

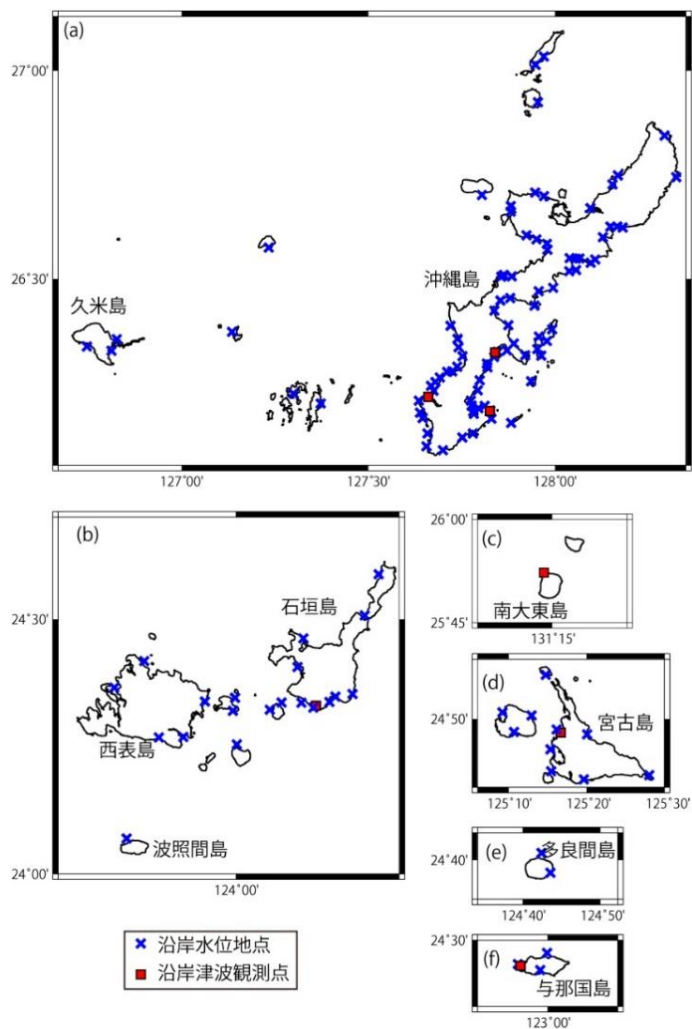


図3 沿岸津波観測点（赤四角）と沿岸水位地点（×）の位置。(a)沖縄島周辺，(b)石垣島周辺，(c)南大東島付近，(d)宮古島周辺，(e)多良間島，(f)与那国島。

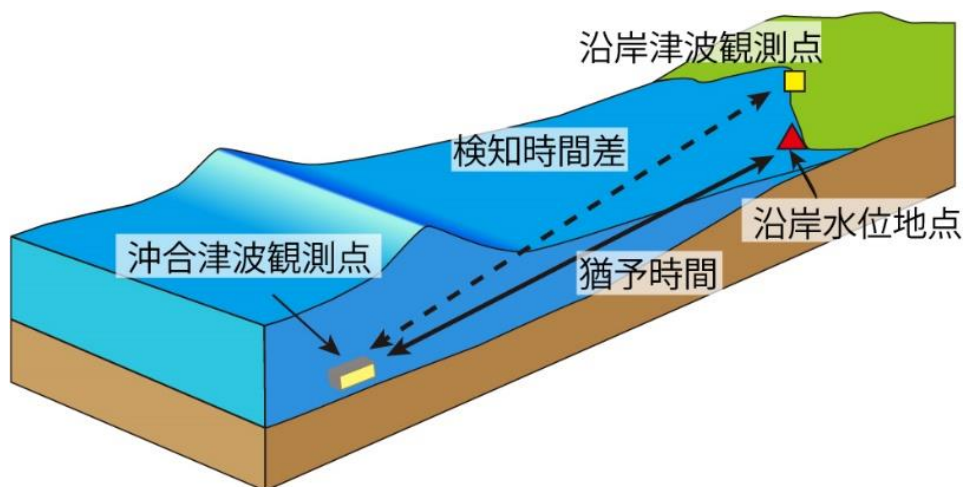


図4 検知時間差と猶予時間の模式図。

～27.0° および東経127.0°～129.5°の領域に、0.25° 間隔で波源域を設定した。沖縄島の沖縄トラフ側では、北緯26.0°～28.5° および東経125.5°～128.0° の領域に、0.25° 間隔で波源域を設定した。先島諸島の琉球海溝側では、北緯23.0°～24.75° ，東経123.25°～126.25° の領域に、0.25° 間隔で波源域を設定した。先島諸島の沖縄トラフ側では、北緯24.5°～26.0° および東経123.25°～126.0° の領域に、0.25° 間隔で波源域を設定した。伝播する方向によって津波検知までの時間が変わらないよう、初期波高分布が円形に近くなる断層パラメータを設定した。用いた断層は、断層上端の深さ20 km、断層の長さおよび幅がそれぞれ30 kmおよび幅40 km、傾斜40°の逆断層である。断層のすべり量は4 mとした。この断層運動による初期波高分布は直径約30 kmのほぼ円形状であり、最大初期波高は円形の中央部で1 mである。

沖合津波観測点は各領域に約30 km間隔で設定した(図2)。沖縄島の琉球海溝側では、北緯25.0°～27.0°および東経127°～129.5°の領域に設定した。沖縄島の沖縄トラフ側では、北緯26.3°～27.3°および東経125.8°～127.8°の領域に設定した。先島諸島の琉球海溝側では、北緯23.2°～24.6°および東経123.8°～126.0°の領域に設定した。先島諸島の沖縄トラフ側では、北緯24.5°～25.8°および東経123.7°～125.6°の領域に設定した。さらに沿岸津波観測点での津波到達時間を調べるため、南大東島、沖縄島(中城湾港・沖縄・那覇)、宮古島(平良)、および石垣島(石垣)にある沿岸津波観測点の位置に水位観測点を設定した(図3)。

ある波源域で津波が発生した後、沖合津波観測点および沿岸津波観測点で水位が10cm以上変化するまでの時間を計測した。さらにこれらの観測点で最も早く検知した時間を津波の検知時間とした。次に、沿岸津波観測点のみで観測を行った場合の検知時間と、沿岸津波観測点と沖合津波観測点をあわせて観測を行った場合で津波検知時間の差を計算し、この時間差を検知時間差とした(図4)。さらに先島諸島の琉球海溝側に設置した沖合津波観測網の配列を変更し、観測点が琉球海溝に直交する1列の場合、および観測点が2列の場合に検知時間差の空間分布がどのように異なるか調べた。

また、沖合津波観測網による津波検知時間から沿岸に津波が到達するまでの猶予時間を調べた(図4)。沖縄県被害想定(沖縄県土木建築部海岸防災課、2015)の中で津波水位計測地点として選ばれた主要港・沿岸地点に沿岸水位地点を設置した(図3)。ただし主な集落があるにもかかわらず周辺に水位観測点がない地域では、新たに沿岸水位地点を設置した。

結果

(1) 検知時間差の地域性

沖縄トラフ内で発生した地震の場合、検知時間差は約30分であった(図5a)。久米島付近でも検知時間差は約20分であった。一方、沖縄トラフの北西側で地震が発生した場合、検知時間は北西側に向かうにつれて短くなる傾向が見られた。

沖縄島付近の琉球海溝側の場合、沖縄島に近い南東沖で検知時間差は10分以下であった(図5b)。琉球海溝付近で検知時間差は約20分に達した。琉球海溝に沿う方向でも検知時間差には地域性がみられた。琉球海溝の南西側(北緯24.75°・東経127.75°)では検知時間差は25分であった。これは沖縄島付近の琉球海溝側領域で最大の値であったが、琉球海溝の北東側(北緯26.0°・東経129.50°)では検知時間差は14分であった。

先島諸島の沖縄トラフ側では、各島から約30 km以内の海域で地震が発生した場合、検知時間差は10分以下であった(図6a)。いっぽう、各島から約50 km以上離れた海域で地震が発生した場合、多良間島より東側では検知時間差は20分以上になったが、石垣島より西側では検知時間は10～20分になった。

先島諸島の琉球海溝側では、検知時間差が他領域と比べて短い傾向があった。西表島南方沖から多良間島南方沖にかけての海域では、北緯23.75°より北側の海域で地震が発生した場合、

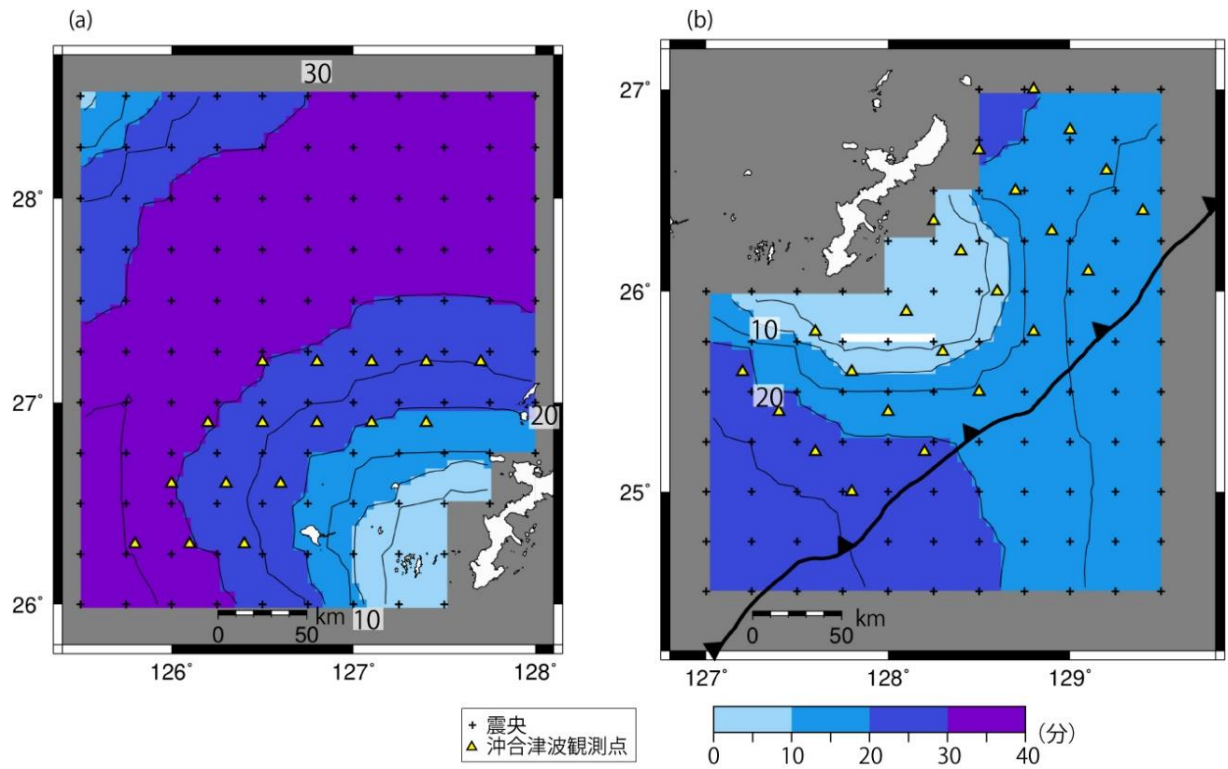


図5 沖縄島付近における検知時間差の分布。(a) 沖縄トラフ側に震源がある場合の猶予時間の分布。(b) 琉球海溝側に震源がある場合。

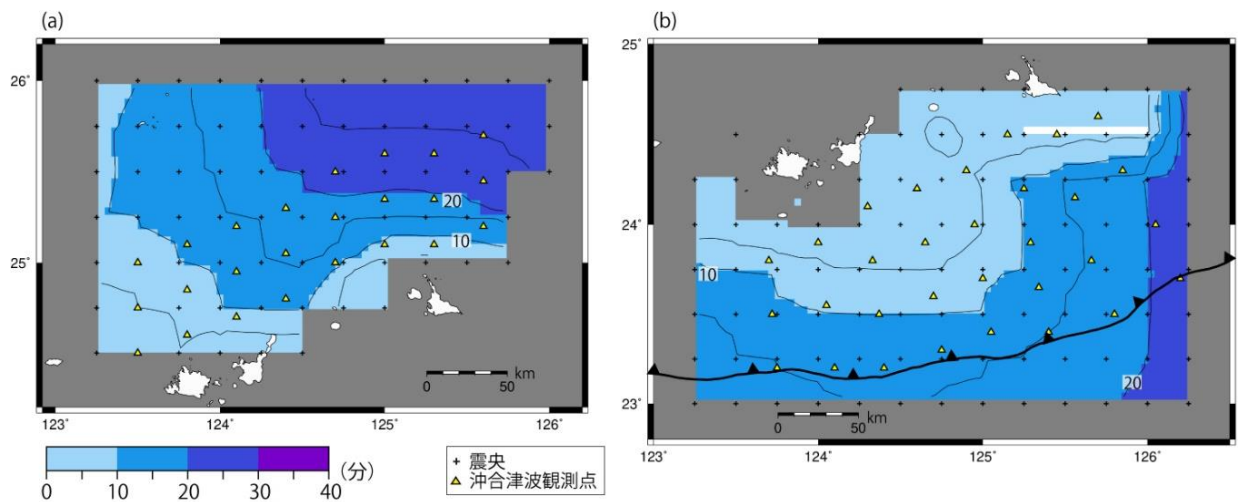


図6 宮古・先島諸島における検知時間差の分布。(a) 沖縄トラフ側に震源がある場合の猶予時間の分布。(b) 琉球海溝側に震源がある場合。

検知時間差は5分以下であった(図6b)。北緯23.75°より南方では検知時間差が増加し、琉球海溝付近では約15分に達した。いっぽう、宮古島南方では北緯24.50°より北側で地震が発生した場合、検知時間差は5分以下であったものの、震源が北緯24.50°より南側にある場合には、

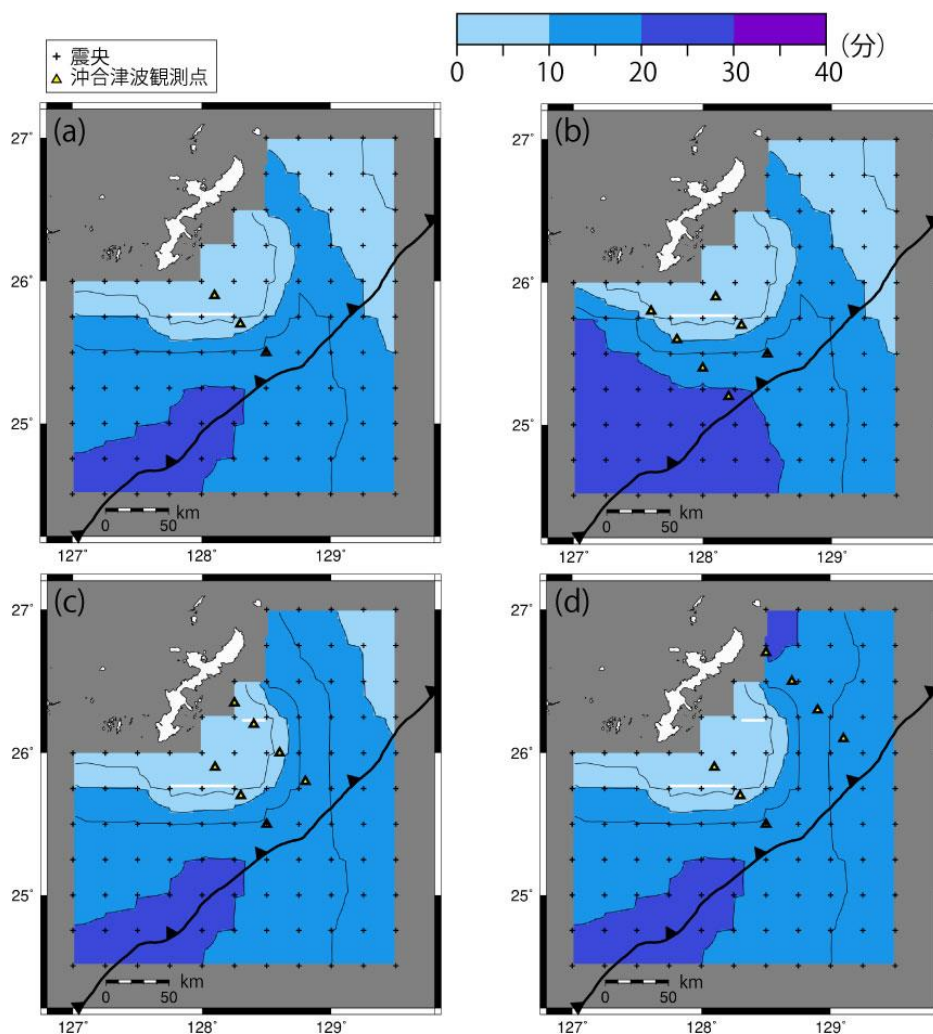


図7 沖縄島南東沖で沖合津波観測点の配列を変化させたときの検知時間差の変化。(a) 1列の場合。(b) 2列（沖縄島の南側と南西側に設置）の場合 (c) 2列（沖縄島の南側とそれより約 50 km 北東側に設置）の場合。(d) 2列（沖縄島の南側とそれより約 100 km 北東側に設置）の場合。

検知時間差は5分以上になった。宮古島南方の琉球海溝付近で発生した地震の場合、検知時間差は15～18分に達した。

(2) 沖合津波観測網の配列を変更した場合における検知時間差の変化

(2.1) 沖縄島周辺の琉球海溝側

観測点を沖縄島南部の南東沖に 1 列だけ設置した場合、海底観測点近傍で地震が発生したときの検知時間差は、観測網が十分ある場合の検知時間差とほぼ同じであった(図 5b, 図 7a)。いっぽう、海底観測点から離れた海域で地震が発生した場合、検知時間差は 20 分以内となった。

2 列目の観測点をさらに沖縄島南方沖に設置した場合を 1 列だけのものと比べると、沖縄島の南西側で地震が発生した場合の検知時間差が 10～20 分から 20 分へ増加した(図 7b)。いっぽう、海溝軸付近の検知時間差に変化は見られなかった。沖縄島の北東側で地震が発生した場合の検知時間差は、1 列の場合と 2 列の場合で違いが見られなかった。観測点を沖縄島南部

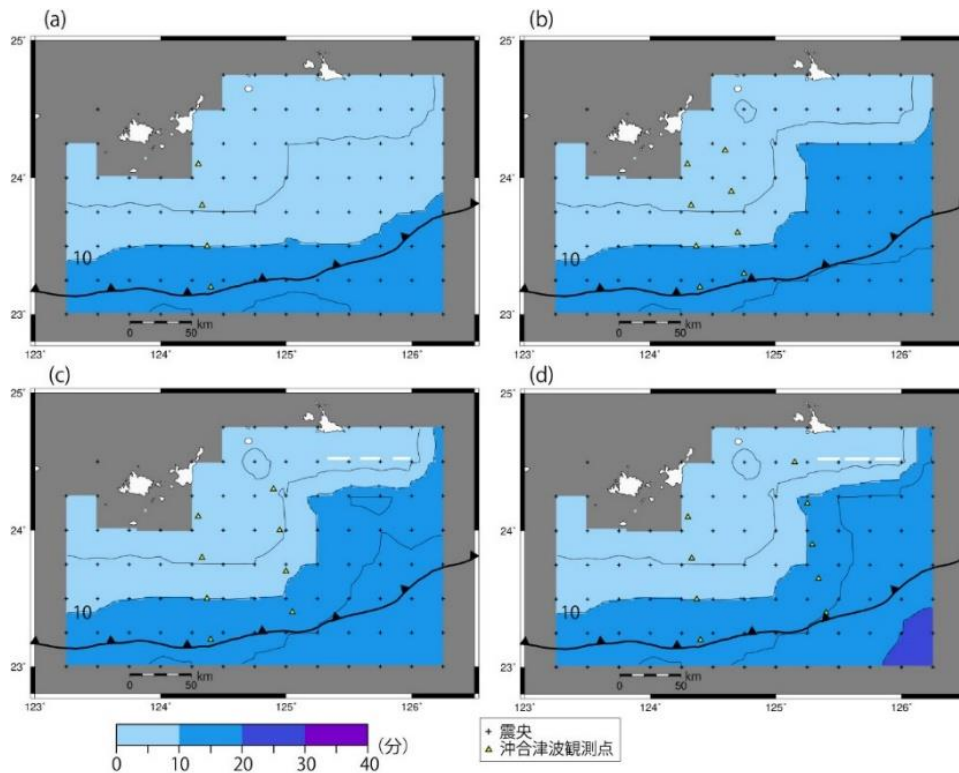


図8 先島諸島で沖合津波観測点の配列を変化させたときの検知時間差の変化。(a) 1列の場合。(b) 2列(石垣島南沖と南東沖に設置)の場合 (c) 2列(石垣島南沖と多良間島南沖に設置)の場合。(d) 2列(石垣島南沖と宮古島南沖に設置)の場合。

の南東沖と沖縄島北部の南東沖に2列に設置した場合、1列だけの場合と比べて沖縄島東沖での検知時間差が約5分長くなった(図7c)。2列目の観測点を沖縄島最北部に南東方向に設置した場合、1列だけの場合と比べて沖縄島の東沖だけでなく、さらにその東側(北緯 27.0° ・東経 129.5° 付近)まで検知時間差が約5分長くなった(図7d)。

(2.2) 先島諸島の琉球海溝側

観測点近傍で地震が発生した場合には、石垣島南方に1列の観測点を設置した場合の検知時間差は十分観測網を設置した場合とほぼ同様であった(図6b, 8a)。しかし観測点から離れた海域で地震が発生した場合、検知時間差はほぼ全領域で10分以内となった。海溝軸付近でも検知時間差は10~15分にとどまった。いっぽう、石垣島南方の観測点に対して、その東方にもう1列観測点を加えた場合(図8b-d)、宮古島南方沖での検知時間差が10分以内だったのが10~15分と改善された。特に、観測点をより宮古島に近い側に設置した場合、宮古島南方沖の海溝軸付近での検知時間差が約18分と改善された。

(3) 猶予時間

沖縄島付近では、沖縄トラフ側・琉球海溝側ともに、猶予時間は島から約100 km以内では10分以内であった(図9)。琉球海溝付近で地震が発生した場合、猶予時間は約10分であった(図9b)。

八重山諸島でも沖縄トラフ側では、島から50~100 km以内の海域で地震が発生した場合、猶予時間は10分以内であった(図10a)。猶予時間が10分以内の海域は、宮古島付近では約50 km以内、西表島付近では約100 km以内であった。八重山諸島の琉球海溝側では、島から約100 km以内の海域で地震が発生した場合、猶予時間は約10分以内であった(図10b)。宮古島沖の

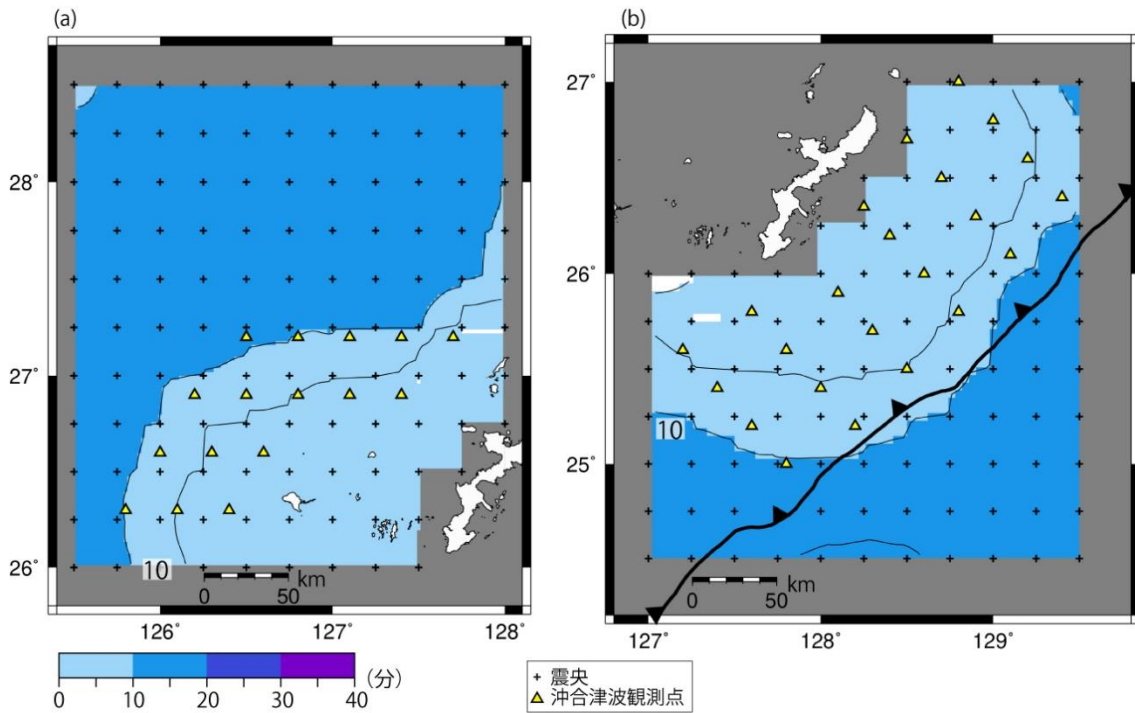


図9 沖縄島付近における猶予時間の分布。(a) 沖縄トラフ側に震源がある場合の猶予時間の分布。(b) 琉球海溝側に震源がある場合。

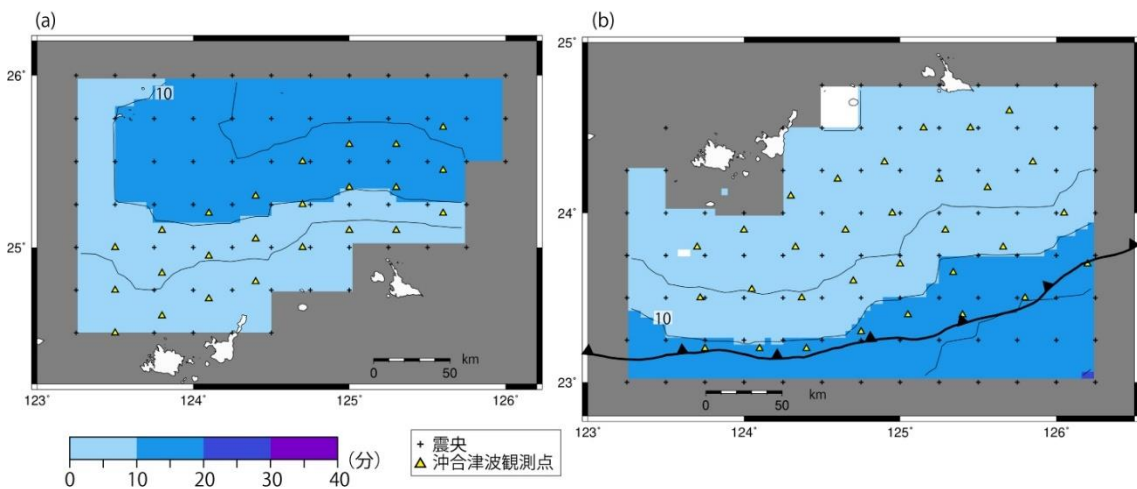


図10 先島諸島における猶予時間の分布。(a) 琉球海溝側に震源がある場合の猶予時間の分布。(b) 沖縄トラフ側に震源がある場合

琉球海溝では猶予時間は約15分、石垣島沖の琉球海溝では猶予時間は約10分であった。

考察

(1) 検知時間差と猶予時間

沖合津波観測網を設置すると、波源が沖合津波観測網付近かつ島から離れた遠い海域である場合には、海溝付近で10分～20分、沖縄トラフ付近で20分から30分、沿岸津波観測点よりも早く津波を検知できた。海溝沿いの地震の場合、津波の第1波のピークが到達するのは、石

垣島南東岸（大浜）で16分、宮古島南東岸（友利）で16～18分、沖縄島南東部（八重瀬町具志頭、糸満市米須）で14分、および沖縄島西海岸（読谷村都屋、今帰仁村今泊）で24分となっている（沖縄県土木建築部海岸防災課,2015）。沖合津波観測網がある場合、津波発生とほぼ同時に津波を検出できる。つまり、第1波のピークが来る前に沿岸津波観測点だけの場合よりも検知時間差のぶんだけ早く情報の修正が行えるといえる。

基本的に島の検潮所から離れると検知時間差は大きくなる。しかし、沖縄島東方沖（北緯26.0°・東経129.4°付近）の海域では、逆に沖縄島から遠ざかるにつれて検知時間差が小さくなる。検知時間が短くなるのは、この海域で津波が発生した場合、沖縄島に津波が到達する前に南大東島の検潮所で早期に津波を検知していることが影響している。このため、沖縄島東方沖での検知時間差はあまり大きな値にならないと考えられる。

震源の場所によっては、検知時間差と猶予時間に大きな差が見られた。たとえば沖縄島南東沖（北緯25.25°・東経128.5°）で地震が発生した場合、検知時間差は約20分である（図5b）。しかし猶予時間は約10分である（図9b）。この差は、沖縄島南部の検潮所で津波が観測され始める約10分前に、沖縄島の南東海岸で津波による海面変動が起こり始めていることを意味している。たとえば、平成27年に沖縄県が行った津波浸水想定によると、沖縄島南東沖の琉球海溝でモデル⑤の地震（M8.2）が発生した場合、検潮所のある安座真で±20 cmの変動が観測されるのは15分後である（沖縄県土木建築部海岸防災課, 2015）。一方、久高島の徳仁港や八重瀬町具志頭では6分後に±20 cmの変動が観測される。つまり、もし徳仁港や具志頭で潮位を測定していれば、現状よりも9分早く潮位変化を検出できることになる。

このような場所は、検知時間差と猶予時間の差が大きい地域として見つけることができる。たとえば久米島北西沖では検知時間差と猶予時間の差が約20分ある（図5a, 9a）。このような地域では、たとえば久米島で潮位を測定していれば、現状より早く津波の検知および予報の修正が行えると考えられる。

(2) 沖合津波観測網の配列と検知時間差の関係

配列が2列の場合と1列の場合を比較すると、2列の場合に検知時間差が全体的に改善された。2列の間隔と改善の度合いは地域によって異なる。沖縄島付近を例にすると、2列の幅が広くても（図7c, d）2列の間の検知時間差はほとんど変化しない。先島諸島でも、2列の幅が広いほうがより宮古島南方での検知時間差が大きくなっている（図8b-d）。しかし、その差は海溝軸付近で大きくても約5分である。津波は水深の深いところでは伝播速度が大きいいため、単に津波の検知を行うだけであれば、特に水深の深い場所では観測点配列の間隔はある程度広がっていても検出できると予想される。

結論

沖縄島および先島諸島の沖合に沖合津波観測網を設置した場合、沿岸津波観測点と比べてどのくらい検知する時間が早くなるか、津波の数値計算を用いて調べた。その結果、海溝付近・沖縄トラフ付近ともに10分～20分、検潮所よりも早く津波を検知できた。また、沖合津波観測点の観測点数を減らしたところ、沖合津波観測点から離れた地点では検知に時間がかかる傾向がみられた。しかし、観測点配置が広い場合でも、観測網内の検知時間差に大きな変化はなかった。

震源の場所によっては、検知時間差と猶予時間に大きな差が見られる地域があった。このような場所では、沿岸の適切な場所に津波観測装置を設置することで、現状の沿岸津波観測点よりも早期に津波の検知および予報の修正が行える可能性がある。

謝辞

津波計算コード JAGURS (Baba et al., 2015) を用いた。また、沖縄県土木建築部海岸防災課提供の海底地形データを使用した。図の作成には、GMT (Wessel and Smith, 1998) を用いた。なお、本稿は投稿に先立って、藤田和彦教授の吟味を経ている。藤田教授には、心からの感謝の意を表す。

引用文献

- Baba, T., Takahashi, N., Kaneda, Y., Ando, K., Matsuoka, D. and Kato, T. (2015). Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, **172**(12), 3455-3472. doi:10.1007/s00024-015-1049-2.
- Hinata, H., Fujii S., Furukawa, K., Kataoka, T., Miyata, M., Kobayashi, T., Mizutani, M., Kokai, T. and Kanatsu, N. (2011). Propagating tsunami wave and subsequent resonant response signals detected by HF radar in the Kii Channel, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **95**, 268-273. doi:10.1016/j.ecss.2011.08.009.
- Lipa, B., Barrick, D., Saitoh, S., Ishikawa, Y., Awaji, T., Largier, J. and Garfield, N. (2011). Japan tsunami current flows observed by HF radars on two continents. *Remote Sensing*, **3**, 1663-1679. doi: 10.3390/rs3081663.
- Lipa, B., Barrick, D., Diposaptono, S., Isaacson, J., Jena, B.K., Nyden, B., Rajesh, K. and Kumar, T. (2012). High frequency (HF) radar detection of the weak 2012 Indonesian tsunamis. *Remote Sensing*, **4**, 2944-2956. doi:10.3390/rs4102944.
- Kaneda, Y., Kawaguchi, K., Araki, E., Matsumoto, H., Nakamura, T., Kamiya, S., Ariyoshi, K., Hori, T., Baba, T. and Takahashi, N. (2015). Development and application of an advanced ocean floor network system for megathrust earthquakes and tsunamis, In: Favali, P., Beranzoli, L., and Santis, A. D. (eds.) *Seafloor observatories*. Springer Praxis Books, pp. 643-663. doi:10.1007/978-3-642-11374-1_25.
- 加藤照之, 寺田幸博, 木下正生, 柿本英司, 一色 浩 (1998). GPS波計の開発. 月刊海洋, 号外 **15**, 38-42.
- 気象庁 (2011). 平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震調査報告第II編 5章 東北地方太平洋沖地震に際して気象庁のとした措置. 気象庁技術報告, **133**, pp.355-474.
- 気象庁地震火山部 (2012). 津波警報の改善について. 平成24年度気象・地震等の情報に関する講習会. <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/minikan/koushu120518/shiryoku4.pdf> (2020年4月25日確認)
- 草野富二雄・横田崇 (2011). 津波予報業務の変遷. 験震時報 **74**, 35-91.
- 中田健嗣・西新三郎 (2014). ブイ式海底津波計の紹介. 測候時報 **81**, S101-S112.
- NOAA Center for Tsunami Research (2020) DART® (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis). <https://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/> (2020年4月3日確認)
- 沖縄県土木建築部海岸防災課 (2015). 沖縄県津波浸水想定図. https://www.pref.okinawa.jp/site/doboku/kaibo/h27tsunami/h27tsunami_a.html (2020年2月18日確認)
- Tanioka, Y. (2017). Tsunami simulation method assimilating ocean bottom pressure data near a Tsunami source region. *Pure Applied Geophysics*, **175**(2), 721-729. doi:10.1007/s00024-017-1697-5
- 植平賢司 (2016). 日本海溝海底地震津波観測網(S-net)について. 自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, **53**, 96-101.
- Wessel, P. and Smith, W. (1998). New, improved version of Generic Mapping Tools released. *Eos*,

Transactions American Geophysical Union. **79**. doi:10.1029/98EO00426.