

C会場 | 一般セッション：S03. 地殻変動・GNSS・重力

📅 2022年10月26日(水) 9:45 ~ 10:45 | 📍 C会場 8階 (820研修室)

[S03] AM-1

座長:岡田 悠太郎(京都大学)、中村 優斗(海上保安庁海洋情報部)

9:45 ~ 10:00

[S03-08] 数値シミュレーションによるGNSS-A解析ソフトウェア「GARPOS」の測位誤差の評価

*中村 優斗¹、横田 裕輔²、石川 直史¹、渡邊 俊一¹ (1. 海上保安庁海洋情報部、2. 東京大学生産技術研究所)

10:00 ~ 10:15

[S03-09] SGO-Aにおける統一的な新しい音響信号読み取り方法の検討

*永江 航也¹、横田 裕輔²、石川 直史¹、渡邊 俊一¹、中村 優斗¹ (1. 海上保安庁海洋情報部、2. 東京大学生産研究所)

10:15 ~ 10:30

[S03-10] SGO-Aにおける音響信号の角度・機器依存性と上下動誤差

*横田 裕輔¹、永江 航也²、石川 直史²、渡邊 俊一²、中村 優斗² (1. 東京大学生産技術研究所、2. 海上保安庁海洋情報部)

10:30 ~ 10:45

[S03-11] 海底地殻変動観測による琉球海溝南西端におけるプレート間固着の解明

*中畑 遼祐¹、生田 領野¹、長屋 暁大²、田所 敬一³、中村 衛⁴、宗林 留美¹、原田 靖⁵、安藤 雅孝¹ (1. 静岡大学、2. 神戸大学、3. 名古屋大学、4. 琉球大学、5. 東海大学)

数値シミュレーションによるGNSS-A解析ソフトウェア「GARPOS」の測位誤差の評価

Positioning accuracy evaluation of GNSS-A analysis software GARPOS using numerical simulation

*中村 優斗¹、横田 裕輔²、石川 直史¹、渡邊 俊一¹

*Yuto NAKAMURA¹, Yusuke Yokota², Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹

1. 海上保安庁海洋情報部、2. 東京大学生産技術研究所

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

GNSS観測と海中音響測距を結合することにより海底の動きをセンチメートル単位で検出するGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）の測位精度は、海中音速場の擾乱の影響を大きく受ける。そのため、海底測位の分野では海中音速場と海底局位置を観測データから適切に推定するための様々な解析手法が開発されてきた。海中音速場と海底局位置を経験ベイズにより同時推定するGNSS-Aデータ解析ソフトウェア「GARPOS」（Watanabe et al. 2020, FES）では海中音速場を水平成層の基準場と、海上局及び海底局位置に依存する水平傾斜パラメータに分解し推定している。中村ほか（2021, 地震学会）では数値シミュレーションを用いてGARPOSの水平傾斜パラメータの解釈について議論したが、水平傾斜場が測位解の精度にどの程度影響を及ぼすかについてより詳しく検証する必要がある。

本研究では、PythonのEikonal方程式レポジトリ「PyKonal」（White et al. 2020, SRL）を用いた数値シミュレータで作成したGNSS-A疑似データにより、「GARPOS」の測位精度の評価を行った。数値シミュレータでは、直交座標系のグリッドに海中音速場を与え、最上部のグリッド（海面）からグリッド底面（海底）に設定した海底局位置の間の三次元的な音響伝播を計算する。PyKonalは離散化されたEikonal方程式を低い計算コストで解くFast Marching Method（Sethian 1999, SIAM Rev）を実装しており、Snellの法則を用いたレイトレーシングよりも厳密な理論音響走時を計算できる。計算した理論音響走時と送受信グリッドの座標を結合することにより作成したGNSS-A疑似データをGARPOSで解析し、解析結果をシミュレーションの設定条件と比較することで、GARPOSの測位精度を検証した。

数値実験では、様々な強度・厚さ・深度の水平音速傾斜場を与えてシミュレーションを行った。各パラメータがGARPOSの測位解にどのような影響を与えるか調べ、水平傾斜場が存在する海中音速場における測位解の系統的な誤差について議論する。

SGO-Aにおける統一的な新しい音響信号読み取り方法の検討

Examination of new method of acoustic signal detection in SGO-A

*永江 航也¹、横田 裕輔²、石川 直史¹、渡邊 俊一¹、中村 優斗¹

*Koya Nagae¹, Yusuke Yokota², Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹, Yuto Nakamura¹

1. 海上保安庁海洋情報部、2. 東京大学生産研究所

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

GNSSと音響測距を組み合わせることで海底地殻変動をセンチメートルレベルでとらえる手法を、GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）と呼ぶ。海上保安庁では、この手法を用いた海底地殻変動観測網SGO-Aを展開しており、これまで、2011年の東北地方太平洋沖地震による地殻変動やその後の粘弾性緩和、プレート間固着や浅部スロースリップ(SSE)などの固体地球科学における重要な結果を示した。現在は、GARPOS (Watanabe et al., 2020, FES) と呼ばれる解析ソフトウェアによりSGO-Aの測位解が公表されている。SGO-Aでの測距には、海上局と海底局の間を10kHzの正弦波を搬送波とする音響信号が用いられる。海上局が受信した波形と送信波形との相関処理を行い、信号の送受時刻を精密に決定することで、往復走時を算出している（富山, 2003, 海洋情報部技報）。ここで、往復走時の分解能は、搬送波の1波長である0.1 msec（往復距離に換算すると約7.5 cm）である。しかし、GARPOSによるこれまでの測位解析では、往復走時残差の標準偏差 σ が0.1 msec以上である結果が多く、観測エポックで得られている。さらに、多くの観測エポックで水平方向の測位解のばらつきよりも上下方向のばらつきの方が明らかに大きく、GNSS-A観測での上下方向の位置の不確実性が指摘されてきている。このような上下方向の解のばらつきは、SGO-A観測網が整備され始めて20年以上が経過し、海上局や海底局を更新する機会が増えたことによる機器の変化が原因の一つとして挙げられる（横田ほか, 2022, 地震学会）。このような機器依存により受信信号に変化（図1）が生じ、読み取り位置に誤りが生じたと考えられる。なお、この図1に示した2エポック間では使用した海底局が異なっている。従来の受信波形の読み取りは、まず、図1の中段に示した相関波形の最大値を見つけ、その値の0.4倍を初めて超す極大値を読み取り値として採用している。図より、2012年と2021年では、中段の相関波形の形状が大きく異なり、特に2021年の波形は後ろへ伸びて波形の最大値が不明瞭であり、結果的に読み取りの精度が悪化したと考えられる。そこで本発表では、SGO-Aにおける全期間にわたって統一的利用可能な新しい受信信号の読み取り方法を検討する。新しい手法では、まず下段の相関波形に対して立ち上がり位置を決定する。なおこの立ち上がり位置は、エポックごとに決定される閾値 s を初めて上回った極大値と定義する。次に、立ち上がり位置から N 個目の極大値を読み取り位置とする。ここで、閾値 s や N は、GARPOSにより得られる走時残差が小さくなるように決定する。この手法を用いることで波形の重畳の影響を抑えることができ、往復走時残差の σ を2 - 2.5 cm程度の精度が可能となる見通しであるが、将来的には、さらに高度で正しい読み取りが実現することが期待される。

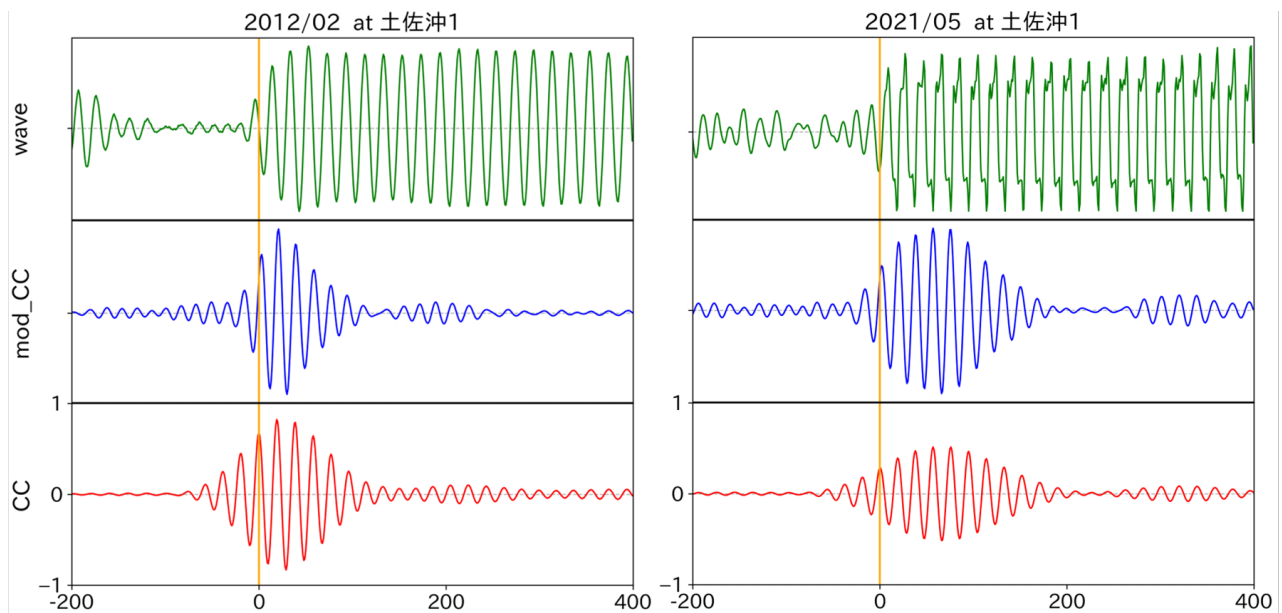


図1：2012年（左）と2021年（右）における受信波形や相関関数の変化。

上段：受信波形。中段：受信波形と変形参照波形（富山，2003，海洋情報部技報）の相関関数。

下段：受信波形と参照波形の相関関数。

SGO-Aにおける音響信号の角度・機器依存性と上下動誤差

Acoustic signal angle/device dependences and up-down component error in SGO-A

*横田 裕輔¹、永江 航也²、石川 直史²、渡邊 俊一²、中村 優斗²

*Yusuke YOKOTA¹, Koya Nagae², Tadashi Ishikawa², Shun-ichi Watanabe², Yuto Nakamura²

1. 東京大学生産技術研究所、2. 海上保安庁海洋情報部

1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

海上保安庁はGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）による海底地殻変動観測を継続的に実施している。この観測網をSGO-Aと呼ぶ。現在、GARPOS（Watanabe et al., 2020, FES）と呼ばれる解析手法による結果が公表されている。船舶側の海上局と海底局の間は10kHzの正弦波で構成される音響信号によって測距される（富山, 2003, 海洋情報部技報）。送信信号と受信信号に対してそれぞれ理論波形との相関処理を行うことで信号の送受時刻を精密に決定して往復走時を計測する。

これまでのデータから水平動よりも大きい上下動のばらつきは、(i)音響信号の読み取り誤り（永江ほか, 2022, 地震学会）にくわえて、次の2つの要因による音響往復時間の計測誤りに依存していることがわかってきた。

(ii)ソナーの有限の大きさに依存した信号の位相反転、重畳などによる角度依存性

(iii)海上局、海底局や観測時期などの機器に依存した位相、タイミングの崩れ具合の違い

これら(ii)と(iii)の影響は見かけの受信波形・相関波形からは容易に識別することができない場合が多いが、GARPOSの最終残差に0.1msec（信号1波長分）ごとのがたつきが見られることで認識される。

音響信号の角度依存性はHonsho et al. (2021, FES)で東北大の観測で用いられる7次2波のM系列信号に対して指摘されており、SGO-Aで用いられている9次4波のM系列信号でも生じていることが確認されたものである。(ii)の角度依存性には(iii)で指摘される機器依存性も関係している。海上局と海底局の機器の組み合わせが変更された場合に角度依存性の表出の仕方が変化する。これらの複合的な影響による信号相関波形の違いに応じた読み取り閾値を考慮しなければ1波長（0.1msec）以上の読み取り誤りを生み、とくに上下動の推定に悪影響がある。

既に広く研究されているGNSS観測における誤差は、①大気圏・電離圏遅延量などの自然由来誤差（Davis et al., 1985, RS; Boehm et al., 2006, JGR）と②サイクルスリップなどの非自然由来誤差（Lau & Cross, 2007, JG）、③アンテナ補正量・マルチパスなどの衛星角度に依存した誤差（Kunysz, 2010, IEEE; Banville & Langley, 2013, JG）に分けられる。GNSS-A観測における海中音速度場による誤差（Yokota et al., 2019, MGR）は①のアナロジーであり、(i)信号の読み取り誤差は②、(ii)角度依存誤差と(iii)機器依存誤差は③（②を含む場合もある）のアナロジーであると考えることができる。

本発表では、GARPOSによる推定結果を利用することで、全期間に統一的に利用できる信号トラベルタイムの補正法を考察し、SGO-A観測網のより正しい上下動を導出する方法を議論する。この中で、(iii)を適切に補正することで最も懸念される海底局置き換えなどによる10cm近いバイアス的なずれはほぼ補正可能であることがわかった。ただし、(iii)の物理的な原因は不明であり、今後、水槽実験などで調査する必要がある。

(ii)はGARPOSの最終残差に対する移動平均などによるスムージング結果を用いることで補正することは可能であり、残差のばらつきを抑えるだけでなく、一部の観測エポックの上下動誤差の低減に効果を示すことがわかった。こちらも詳細な原因は不明であるが、以前から実験的に指摘されており（望月ほか, 2007, 海洋情報部研究報告）、今後、水槽実験などで調査する必要がある。

これまでの考察から、 $\sigma \sim 2\text{--}2.5\text{cm}$ 程度の精度は実現できる見通しであるが、将来的にはさらに高度で尤もらしいトラベルタイム補正が実現することで精度を上げることができると考えられる。

謝辞：本研究は東京大学地震研究所の公募研究ERI JURP 2022-Y-KOBO25により実施されています。

海底地殻変動観測による琉球海溝南西端におけるプレート間固着の解明

Lack of inter-plate coupling at the southwestern end of the Ryukyu Trench observed by GNSS/Acoustic geodesy

*中畑 遼祐¹、生田 領野¹、長屋 暁大²、田所 敬一³、中村 衛⁴、宗林 留美¹、原田 靖⁵、安藤 雅孝¹
*Ryosuke Nakahata¹, Ryoya Ikuta¹, Akihiro Nagaya², Keiichi Tadokoro³, Mamoru Nakamura⁴, Rumi Sohrin¹, Yasushi Harada⁵, Masataka Ando¹

1. 静岡大学、2. 神戸大学、3. 名古屋大学、4. 琉球大学、5. 東海大学

1. Shizuoka University, 2. Kobe University, 3. Nagoya University, 4. University of the Ryukyus, 5. Tokai University

琉球海溝の南西端に位置する八重山諸島は、1771年4月24日に発生した「八重山津波」と呼ばれる巨大津波によって壊滅的な被害を受けたことが知られている。八重山津波の発生源は未だ議論が続いているが、Nakamura (2009)は、琉球海溝南西端のプレート境界浅部で発生したMw8.0の津波地震が発生源であることを示唆している。そこで我々は、琉球海溝南西端のプレート境界の固着の有無を明らかにするために、2014年10月に波照間島南方沖約40km、水深約3300mの前弧海盆に海底基準局OHTM（図）を設置した。海底基準局は3台のトランスポンダをおおむね水深の1/√2程度の外接円直径をもつ正三角形に配置した。2014年10月から2022年6月まで、2021年を除いて年一回のGNSS/音響測距結合方式による観測を実施し、海底局の座標の変動から固着の有無を推定した。本発表では、すでに解析が済んでいる2014年10月～2020年9月の結果に、現在解析中の2022年の結果を併せて報告する予定である。

海底局の座標は、解析プログラム群OCDASAN（Ocean-bottom Crustal Deformation Analysis tool for Study in Ando labo. Nagoya university）を用いてIkuta et al. (2008)によって提案された方法で推定した。本研究では、3台のトランスポンダの重心を海底局の座標と定義している。OCDASANは、（1）海中の音速構造は水平成層をなしており、一定の滑らかさで時間変化する、（2）3台のトランスポンダの構成は不変、という2つの仮定のもと罰則付き最小二乗法を解くことにより海底局の座標を推定している。

解析の結果、2014年10月～2020年9月のOHTM海底局の移動方向及び移動速度は、揚子江プレートに対して南向きに $66.3 \pm 10.3 \text{ mm/yr}$ 、東向きに $19.0 \pm 9.4 \text{ mm/yr}$ と推定された。また、上下方向は $0.0 \pm 9.7 \text{ mm/yr}$ と推定され、上下変動を伴っていないといえる。さらに、この海底局の移動速度は、西表島及び波照間島に設置されている国土地理院の陸上GNSS局で観測された移動速度よりも速い。この結果は、この地域のプレート境界には固着が存在せず、それどころか前弧海盆が上下変動を伴わずに伸長していることを示唆している。

上下変動を伴わずに前弧海盆を伸長させるメカニズムとして、Nagaya et al. (2016)で提案された、琉球海溝のマントルウェッジの先端におけるアンチゴライトの弱い対流が考えられる。アンチゴライトはマントル中のかんらん岩が水和してできる蛇紋岩の一種であり、かんらん岩よりも粘性率が低いのが特徴である。海底局を設置した前弧海盆の地下の比較的浅部にまで、水和してアンチゴライト化したマントルウェッジかんらん岩が侵入し、対流によって前弧ウェッジを海溝側に引き伸ばしていると考えられる。さらに我々は、FreeCAD 0.19 (<https://www.freecadweb.org/?lang=ja>)を用いて、有限要素法を用いて我々の観測結果を再現するモデルを検討した。OHTM直下のプレート境界に固着が無いだけでは不十分で、マントルウェッジの先端にウェッジを伸長させる対流が必要であることが示唆された。

本研究の結果は琉球海溝南西端の前弧下に固着が無いことを示しているが、固着の欠損がどの程度広範囲にわたるかを知らるには更に海溝に沿って広範囲で海底地殻変動を観測する必要がある。OHTM観測点直下に固着が無い事実は、八重山津波の発生源としてOkamura et al. (2018)のような海溝斜面における海底地すべりが有力

な候補であることを支持する。1771年の八重山津波では八重山諸島で強震動があったことが示唆されている（例えばAndo et al. 2018）が、直下型の地震に伴う海底地すべりであったと考えても矛盾はない。将来、海底地すべりにより八重山津波の規模の津波が強震動を伴わずに生じる可能性も考えられる。減災のためには海盆上に海底津波計などを設置し、発生した津波を直接監視するシステムが有効である。

今後の計画として、波照間島沖の海底地殻変動観測を続けるほか、宮古島南方沖の宮古深海平坦面に新たな海底局を設置し、この地域のMw8.0クラスのプレート境界地震を発生させうる固着の有無を明らかにしていく予定である。

引用文献

Ando, M., Kitamura, A., Tu, Y., Ohashi, Y., Imai, T., Nakamura, M., Ikuta, R., Miyairi, Y., Yokoyama, Y., and Shishikura, M, 2018, Source of high tsunamis along the southernmost Ryukyu trench inferred from tsunami stratigraphy. *Tectonophysics*, **722**, 265 -276. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.007>

Ikuta, R., Tadokoro, K., Ando, M., Okuda, T., Sugimoto, S., Takatani, K., Yada, K., and Besana G.M. 2008, A new GPS-acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: Application to the Nankai Trough. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, **113**, B02401. <https://doi.org/10.1029/2006JB004875>

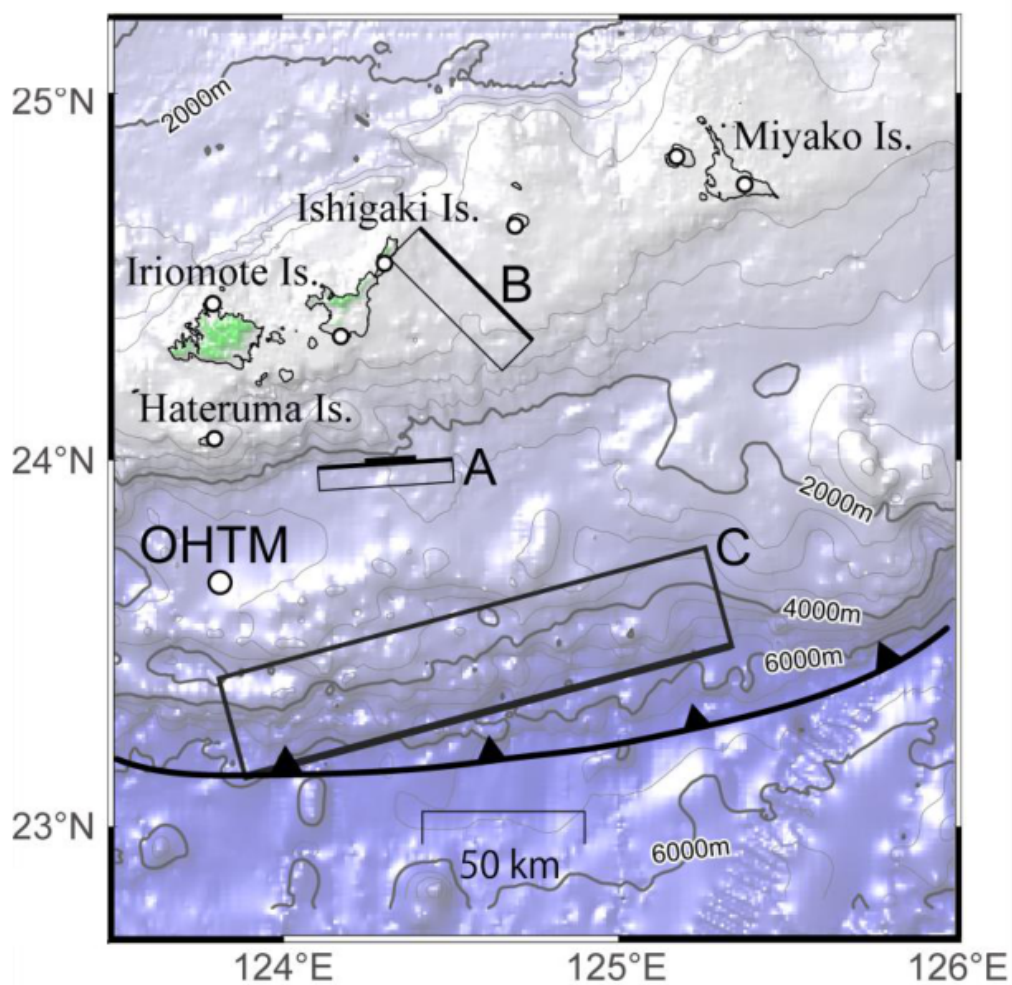
Imamura, F., Yoshida, Y., & Moore, A., 2001, Numerical study of the 1771 Meiwa tsunami at Ishigaki Island, Okinawa and the movement of the tsunami stones. *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, **48**, 346–350 (in Japanese). <https://doi.org/10.2208/proce1989.48.346>

Nakamura, M., 2006, Source Fault Model of the 1771 Yaeyama Tsunami, Southern Ryukyu Islands, Japan, Inferred from Numerical Simulation. *Pure and Applied Geophysics*, **163**, 41-54. <https://doi.org/10.1007/s00024-005-0007-9>

Nakamura, M., 2009, Fault model of the 1771 Yaeyama earthquake along the Ryukyu Trench estimated from the devastating tsunami. *Geophysical Research Letters*, **36**, L19307. <https://doi.org/10.1029/2009GL039730>

Nagaya, T., Walker, A.M., Wookey, J., Wallis, S.R., Ishii, K., and Kendall, J.M., 2016, Seismic evidence for flow in the hydrated mantle wedge of the Ryukyu subduction zone. *Scientific Reports*, **6**, 29981. <https://doi.org/10.1038/srep29981>

Okamura, Y., Nishizawa, A., Fujii, Y., and Yanagisawa, H., 2018, Accretionary prism collapse: a new hypothesis on the source of the 1771 giant tsunami in the Ryukyu Arc, SW Japan. *Scientific Reports*, **8**:13620. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31956-8>



図：海底基準局 OHTM の位置と八重山津波の波源モデル。

A=Imamura et al. (2001); B=Nakamura (2006); C=Nakamura (2009)