

# 光ファイバーセンシング技術(DAS) を活用した鉄道地震観測網の構築



**片上 智史**  
Satoshi Katakami  
鉄道地震工学研究センター  
地震解析研究室  
主任研究員



**是永 将宏**  
Masahiro Korenaga  
鉄道地震工学研究センター  
地震解析研究室長



**岩田 直泰**  
Naoyasu Iwata  
事業推進部  
地震防災システム  
マネージャー

## はじめに

近年、光ファイバーケーブル（以下、光ファイバー）をデータ通信ではなくセンサーとして用いるDAS (Distributed Acoustic Sensing) と呼ばれる技術の活用が進んでいます。本技術は、

1芯の光ファイバーの片端に接続した機器（インテロゲータユニット：IU<sup>®</sup>）から入力される入射波によって、光ファイバーの内部のガラスの不均質（散乱体）で生成される散乱光（反射波）の位相変化（光の波のずれ）を解析し、光ファイ

図1 DASの計測原理の概念図

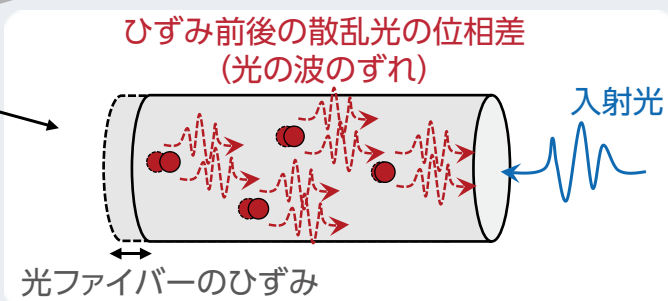
**インテロゲータユニット (IU)**  
DAS観測機器。光信号の送受信機。光ファイバーの片端に接続し、光パルスを光ファイバーへ発射する。光ファイバー内で反射した散乱光を受信し、ひずみを計算する。

外的要因  
(地震波, 列車振動, 交通振動など)

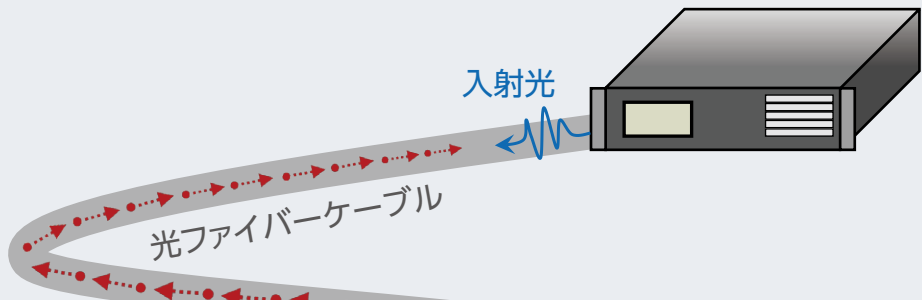


散乱光  
(散乱体で反射する入射光)

散乱体  
(光ファイバー内のガラス不均質)



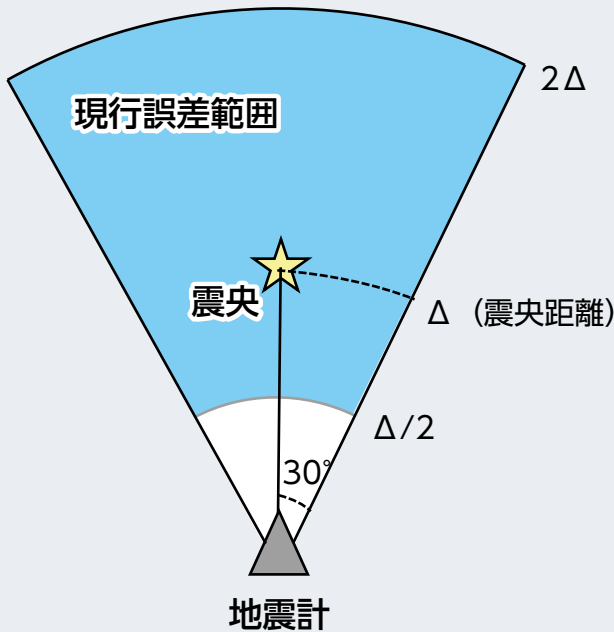
DAS Interrogator Unit (IU)



入射光

光ファイバーケーブル

## 離散的な地震計による警報



## DASによる警報

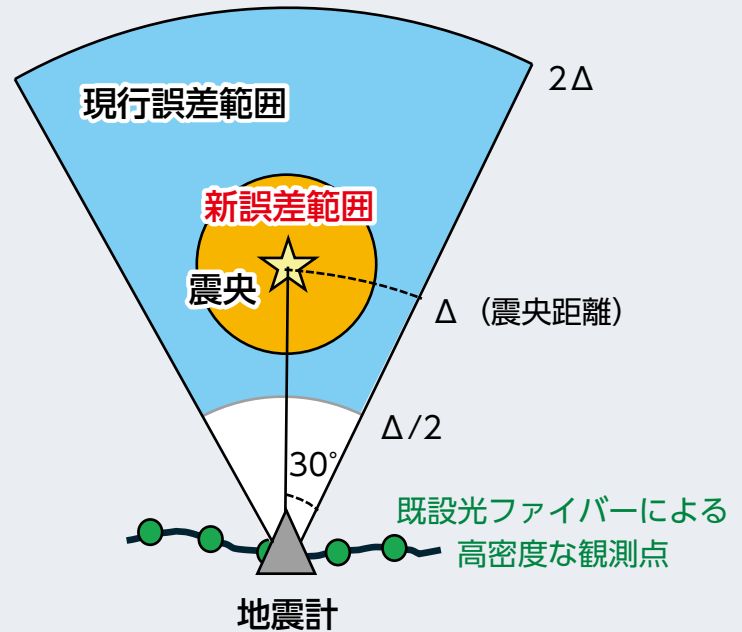


図2 現行手法（地震計）とDASの地震警報の誤差範囲の比較

バーに沿ったひずみを高密度（数cm～数m間隔）にリアルタイムで計測するものです（図1）<sup>例えば1)2)</sup>。

鉄道沿線には通信用の光ファイバーが敷設されていることが多く、そのうち1芯の光ファイバーにIUを接続することでDASを用いた計測を鉄道沿線で実施することが可能です。さらに、DASを用いた地震観測は、陸上・海底問わず光ファイバーを用いて試験的に多数行われており、近傍で発生した地震や遠地地震などさまざまな地震波形が記録できることが示されています<sup>例えば3)4)</sup>。

現在の新幹線用の早期地震警報の地震諸元推定アルゴリズムは、単独観測点データから震央距離（C-Δ法）や震央方位（主成分分析）などを推定します。この方式は、複数点のデータを使うよりも早く警報を出すことができます（最短1秒）が、統計的に震央距離は倍半分、震央方位は±30°程度の推定誤差があります（図2）。DASは、数mごとにデータを計測できるため、

ほぼ同時刻（例えば0.5秒以内）に地震波を複数点で検知することが可能であり、複数観測点で取得したデータを活用した高精度な震源決定手法を適用できます（図2）。さらに、地震発生後の列車の引き抜きや点検範囲の設定は、鉄道沿線に離散的（10-40km程度）に設置された地震計で記録された地震動の揺れの強度を反映した指標値（加速度など）を代表値として用いるため、DASによる高密度な指標値の取得により点検区間などの最適化が期待されます（図3）。以上を背景に本解説では、鉄道沿線の既設光ファイバーにDASを接続し実施した地震観測の結果について報告します。

### 九州新幹線沿線でのDAS地震観測

九州新幹線沿線に敷設されている通信用既設光ファイバーを利用し、DASによる約1か月の地震観測を2度実施しました<sup>5)</sup>。観測条件を表1に示します。ここで、ゲージ長とは、ひ

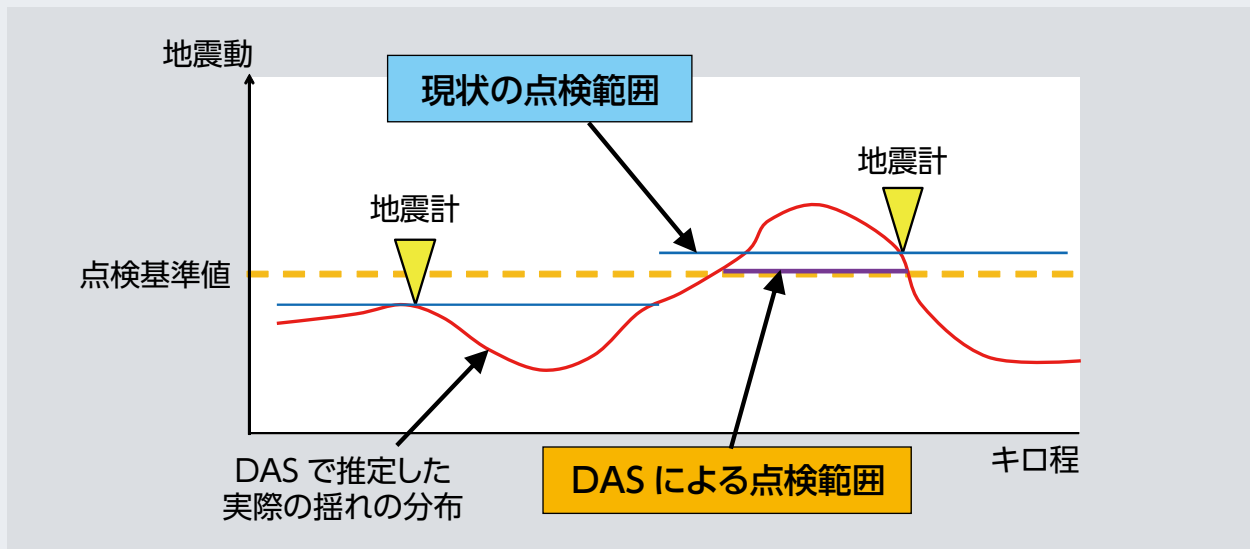


図3 DASを用いた沿線地震動把握による点検範囲の適正化

表1 観測条件一覧

	2022年度	2023年度
観測距離	約75km	約100km
観測期間	1月初旬～2月初旬	2月初旬～3月初旬
観測区間	新八代駅～新大牟田駅	新八代駅～久留米駅
サンプリングレート	500Hz	1000Hz
ゲージ長	10m	5m
空間サンプリングインターバル	5m	5m
総チャンネル数(観測点数)	15082チャンネル	20762チャンネル

ずみを計算する際に対象となる光ファイバー上の距離です。例えば、ゲージ長が10mの場合、10m区間におけるケーブルの伸縮量を計測できます。空間サンプリング間隔は、5mに設定しており、観測距離は約75kmおよび約100kmで、それぞれチャンネル数(観測点数)は、15082点および20762点となります。観測区間には、ラーメン高架橋、橋りょう、トンネル、盛土など多様な鉄道構造物が含まれています。一般に光ファイバーは、これらの構造物上の軌道脇に設置されたケーブルダクト内に敷設されています。一方で、トンネル内では一定間隔ごとに壁面に固定され、吊り下げられる形で設置されています。

## DASで記録した地震および列車振動波形

観測期間中、観測領域周辺で発生した地震活動に伴う地震波形や、走行する新幹線の列車振動など多数の波形を記録しました。一例として、以下のDASで記録されたひずみ速度を示します。

- ・2022年1月19日に熊本県内で発生した地震(Mj3.3)の波形(図4a)
- ・列車振動やトンネル内圧縮波など、地震以外の要因による波形(図4b)

観測期間中、熊本県およびその周辺のプレート沈み込み帯では多数の地震が発生しました。図4aは、線路沿線から数十km以内の地点で発生した地震(Mj3.3)に対するDASひずみ速度

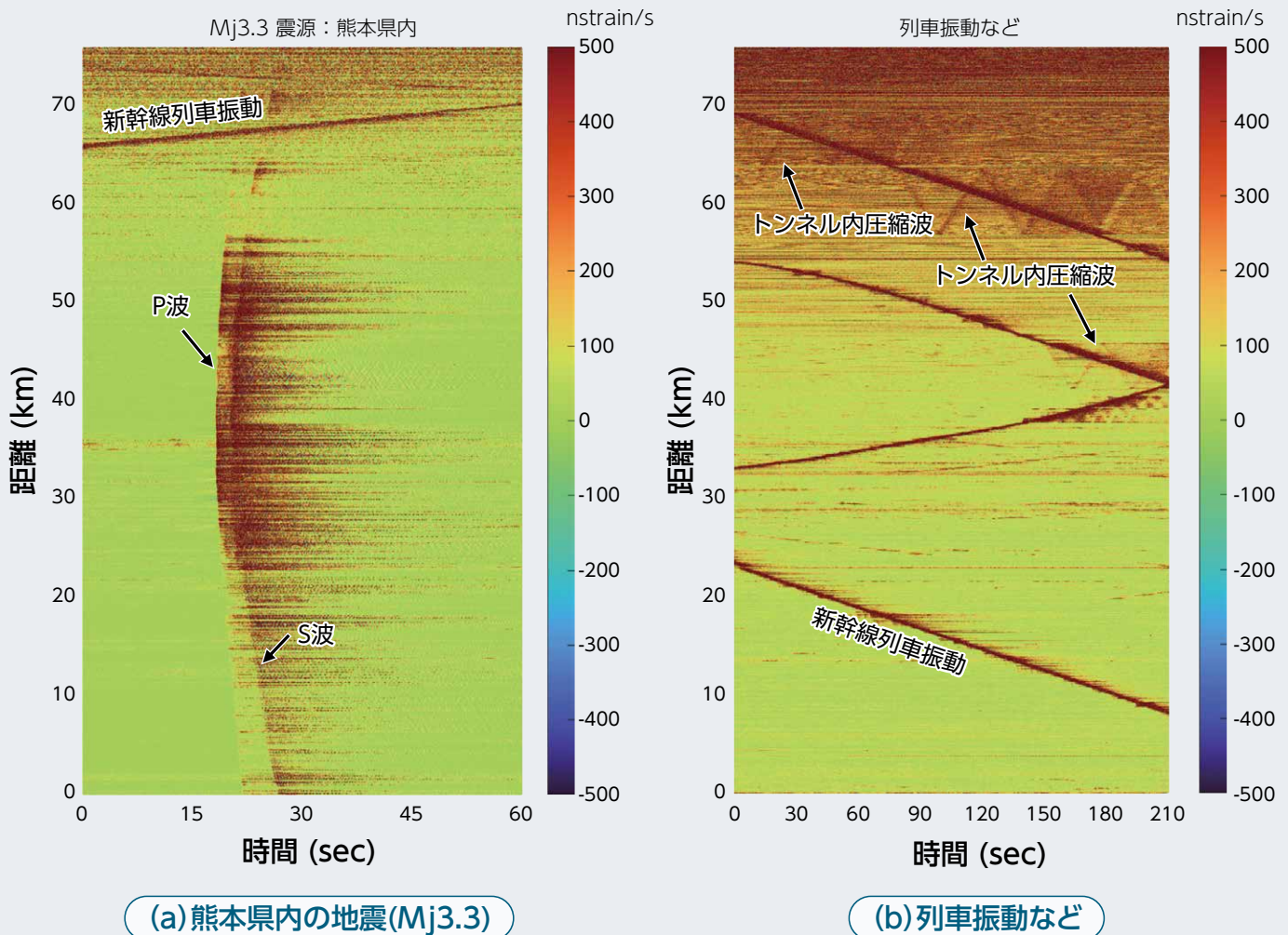


図4 DASで取得した各種ひずみ速度波形

波形です。各チャンネルのデータは1-10Hzの帯域でフィルター処理を行っており、色の濃淡はひずみ速度の大きさです。ほとんどのチャンネルで明瞭なP波およびS波の到達が確認できます。一方、キロ程55-64kmおよび66-70km付近では、波形振幅が相対的に小さく表示されています。これは、トンネル内で光ファイバーが壁面に部分的に吊り下げられているため、地盤とのカップリングが弱まり、地震動への感度が低下していることを示唆します。また、震源に最も近い区間(約45km付近)では最大のひずみ速度が記録され、光ファイバーの両側方向へ地震波が伝播する様子が確認できます。

観測期間中には数百本に及ぶ新幹線列車の

通過も記録されています。図4bは、DASで取得したひずみ速度波形を10-40Hzの帯域でフィルタリングした結果です。距離8-23km, 42-54km, 55-69km付近では下り列車, 33-41km付近では上り列車の通過に伴う振動が確認できます。また、トンネル区間の一部(特に42-47kmおよび58-63km)では、列車がトンネルに進入・退出する際に発生する圧縮波が観測されており、これはトンネル内を伝播する空気圧波を反映します。これらの結果から、DASによって鉄道沿線における地震動の空間分布のみならず、列車振動や列車位置、トンネル内の圧縮波など、さまざまな信号を同時に取得できることが明らかとなりました。

## DASを用いた早期震源決定手法の開発

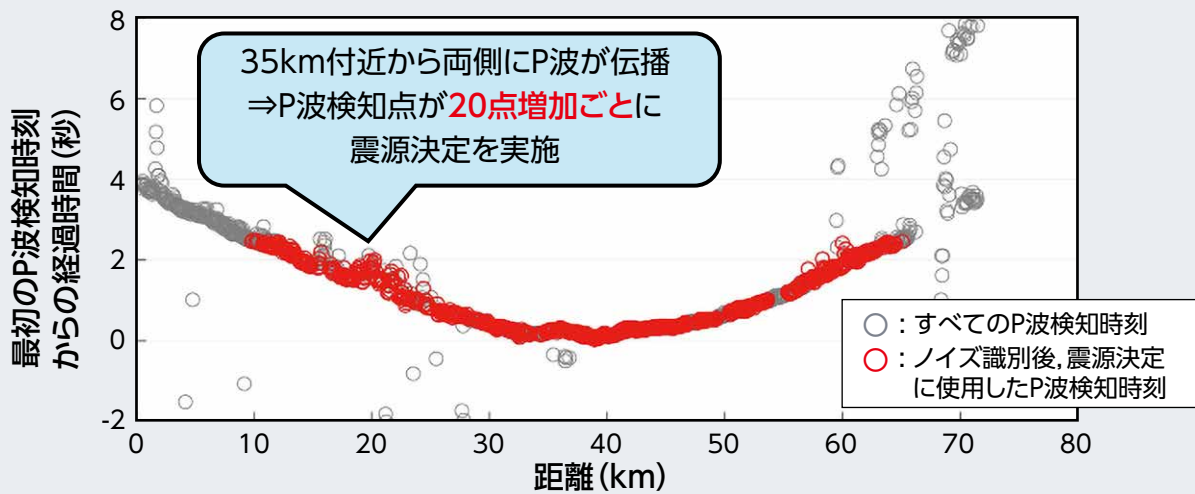
既設の光ファイバーを利用して取得したDAS地震観測データを用い、地震検知後に複数の観測点情報を統合して震源を迅速に推定する手法を構築しました<sup>6)</sup>。その処理の概要を以下に示します。

- (a) STA/LTA<sup>例えば7)</sup>を10チャンネルごとに連続的に計算を実施します。
- (b) STA/LTAによりP波が検出されたチャンネル数が合計100点に達した時点で、

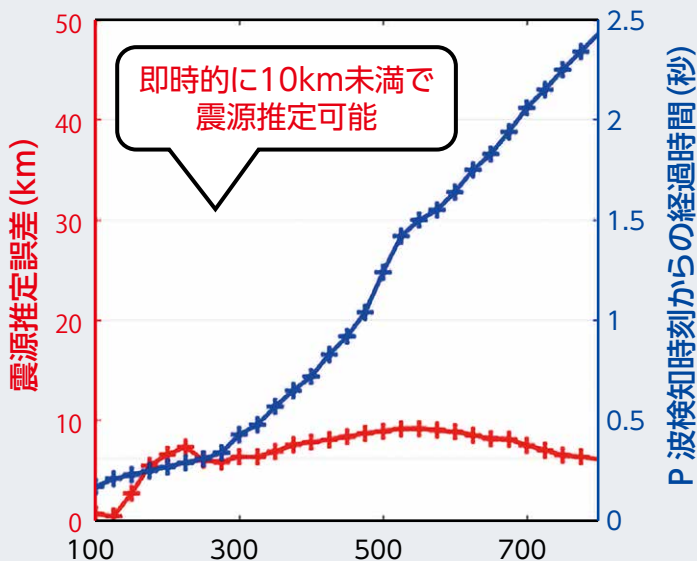
- hypomh<sup>8)</sup>を用いて初回の震源決定を実施
- (c) (b)で取得した震源位置を初期値として保存
- (d) P波検知チャンネル数が20点増加するごとにhypomhによる震源再推定
- (e) 上記の手順(c)～(d)を繰り返す、最終的にP波検知チャンネル数が800点に達するまで逐次的に震源推定を継続

熊本県内で発生したMj3.3の地震(図4a)に本手法を適用した結果、複数の観測点で明瞭にP波を検知しました(図5a)。最初のP波検知か

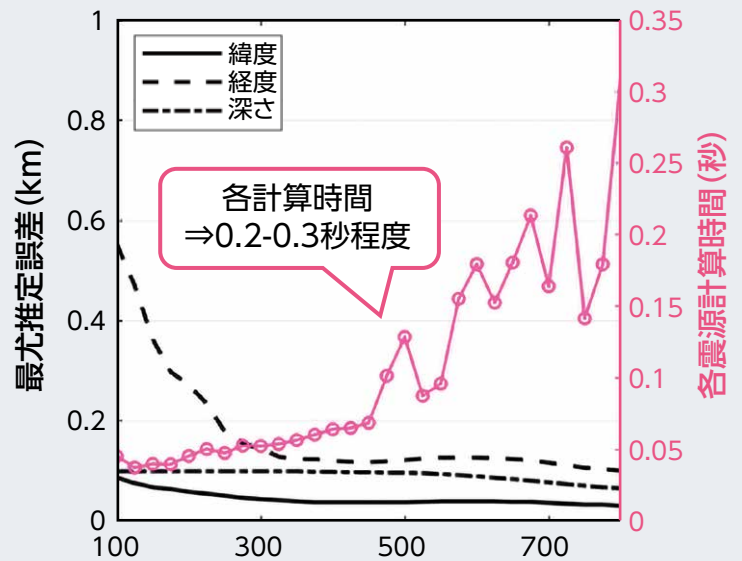
図5 DASを用いた早期震源決定手法の適用結果



(a) P波検知時刻



(b) 震源推定誤差と経過時間



(c) 最尤推定誤差と各計算時間

ら約1秒以内に得られた到達時刻データのみを用いた場合でも、震源位置を5km程度の誤差で推定できました(図5b)。その後、若干推定誤差が増大するものの、最初の検知から約2.5秒後には再び5km程度の精度で震源が決定されました。一方、使用するP波検知点が増えると計算量も増加しますが、各ステップにおける計算時間はおおむね0.3秒未満であり、リアルタイム処理が十分可能な水準です(図5c)。なお、震源推定誤差が一時的に増加した(P波検知数約500点付近)のは、光ファイバーがほぼ

南北方向に配置されているため、東西方向の位置推定が不安定になったことが原因と考えられます。開発手法は、従来の単点観測による震源推定法(C- $\Delta$ 法や主成分分析法)と比較して、同等の即時性を維持しつつ、はるかに高精度な震源決定が可能であることを示しています。

## まとめと今後の展望

鉄道分野へのDAS応用を目指し、九州新幹線沿線の通信用既設光ファイバーを活用して地震観測を実施しました。DASによる高時間・高空間分解能のリアルタイム観測を活用することで、早期地震警報の高度化や、地震直後における鉄道沿線の揺れ分布の即時把握が可能です。これにより、点検区間の効率的な選定や列車の運行制御(引き抜き判断など)を支援する情報提供につながり、鉄道の防災対応力の一層の向上が期待されます。さらに、DASは地震動に限らず、土砂流入、落石、雪崩、倒木など、ほかの災害関連現象の検知にも応用可能と考えられ、今後はこれらを総合的に監視・判定できる複合型防災モニタリングシステムへの発展が期待されます。RRR

### STA/LTA

STA/LTA (Short-Term Average / Long-Term Average) 法は、短時間窓と長時間窓の平均振幅の比を算出することで、P波のように急激な振幅変化を伴う波形の到来を検出する手法です。本研究では、短時間窓を0.5秒、長時間窓を10秒として振幅比を計算しました。

### hypomh

複数の観測点で得られたP波到達時刻を用いて最尤推定法により震源位置を求める手法です。最尤推定とは、観測データが得られる確率(尤度)を最大化するようにモデルパラメーター(ここでは震源)を推定する手法です。

## 文献

- 1) Hartog, A.: An introduction to distributed optical fibre sensors. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.
- 2) Ide, S., Araki, E., & Matsumoto, H.: Very broadband strain-rate measurements along a submarine fiber-optic cable off Cape Muroto, Nankai subduction zone, Japan. *Earth, Planets and Space*, 73(1), 63. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01385-5>. 2021.
- 3) Ajo-Franklin, B. J., Dou, S., Lindsey, J. N., Monga, I., Tracy, C., Robertson, M., Tribaldos, R. V., Ulrich, C., Freifeld, B., Daley T., & Li, X.: Distributed Acoustic Sensing Using Dark Fiber for Near-Surface Characterization and Broadband Seismic Event Detection, *Scientific Reports*, 9(1), 1328. <http://doi.org/10.1038/s41598-018-36675-8>. 2019.
- 4) 内藤昌平, 藤原広行, 中村洋光, 鈴木晴彦, 櫻井健, 小西千里, 小川直人, 武部真樹: 複数の光ファイバおよびインテロゲータを用いたDAS試験観測による地盤モニタリング性能比較, *日本地震工学会論文集*, 25(4), 4\_206-4\_219, 2025年.
- 5) Katakami, S., S. Noda, M. Korenaga, E. Araki, N. Takahashi, and N. Iwata. Potential of earthquake strong motion observation utilizing a linear estimation method for phase cycle skipping in distributed acoustic sensing, *J. Geophys. Res.: Solid Earth* 129, e2023JB027327. <https://doi.org/10.1029/2023JB027327>. 2024.
- 6) Katakami, S., M. Korenaga, N. Iwata, E. Araki, N. Takahashi, S. Noda. Immediate and High-Precision Hypocentral Determination for Earthquake Early Warning Applications Using Distributed Acoustic Sensing. *Bulletin of the Seismological Society of America*; 115 (1): 174-190. doi: <https://doi.org/10.1785/0120240184>. 2025.
- 7) Allen, R. V.: Automatic earthquake recognition and timing from single traces, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 68, 1521-1532. 1978.
- 8) Hirata, N., and M. Matsu'ura.: Maximum likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique, *Phys. Earth Planet. Inter.* 47(1), 50-61. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(87\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0031-9201(87)90066-5). 1987.