

物理探査 ニュース

2022 ハイライト

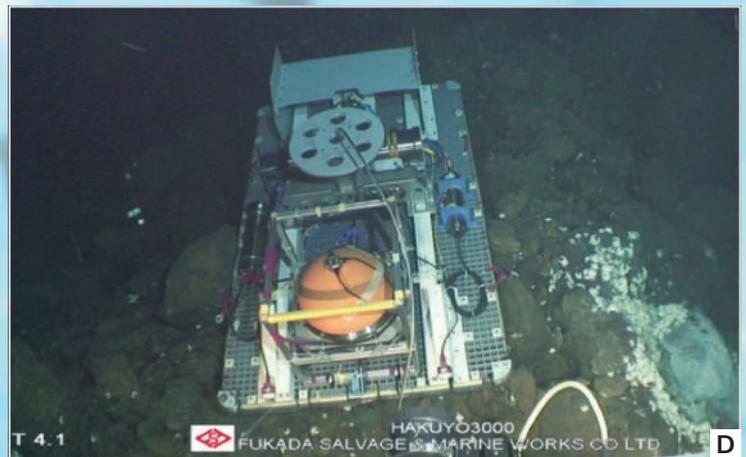


公益社団法人 物理探査学会
The Society of Exploration Geophysicists of Japan

目次

研究の最前線 (53号)	
月や火星での地震探査:小型地震探査システムの開発.....	1
研究の最前線 (55号)	
P波初動波形を用いた震央距離推定	4
現場レポート (54号)	
新潟県陸上震探収録作業について~その1:夜間・深夜収録 と稠密発震による高品質記録の確保.....	7
現場レポート (54号)	
台湾微動観測記 その1 (小アレイ)	9
物探よもやま話 (56号)	
眼底検査の完結編	11
わかりやすい物理探査 (56号)	
GPR その2: 地中レーダ装置	13

Geophysical Exploration News 2022 Highlights



「物理探査ニュース2022ハイライト」は、物理探査学会が年4回発行する「物理探査ニュース」の2022年分から代表的な記事を抜粋したものです。物理探査ニュースはどなたでも学会ホームページ(<http://www.seg-j.org/letter/>)からご覧になれます。

表紙写真説明

- (A) 台湾花蓮市保民宮での微動アレイ探査、花蓮地震調査隊提供 (54号)
- (B) 現場レポート/新潟県陸上震探収録作業について②(54号)
- (C) わかりやすい物理探査/GPRその1:地中レーダの原理(55号)
- (D) 研究の最前線/海底重力計の開発と海底熱水鉱床探査への適用(54号)



月や火星での地震探査： 小型地震探査システムの開発

九州大学 辻 健

1. はじめに

地球外の天体で地震探査を実施し、地下構造を調べることは、理学と工学の両方から求められている。例えば工学分野では、浅部地盤の情報は宇宙資源探査や構造物の建設、ローバー駆動部の設計等で必要となる。また月や惑星では、もともと地下内部に関する情報量が少なく、単純な浅層構造が明らかになるだけでも天体の形成史に関する重要な発見となることもある。

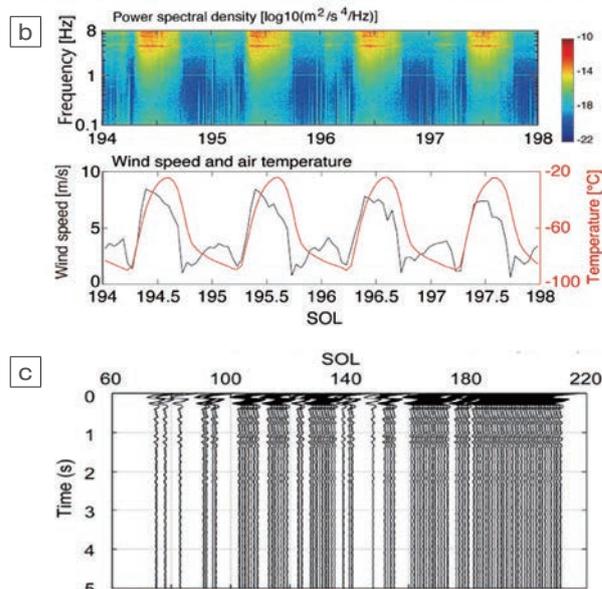
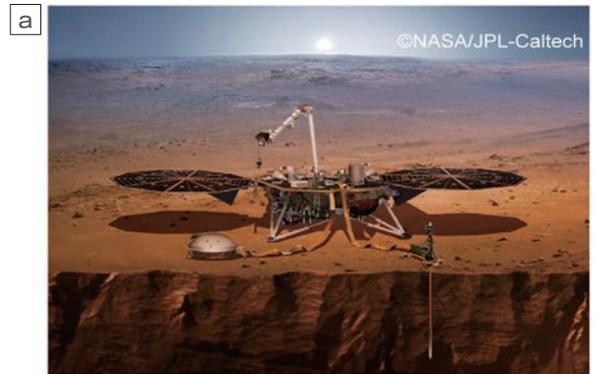
現在、月や火星、タイタンなどの地球外の天体で地震計を設置するプロジェクトが進行、または計画されている^{1,2)}。近年、InSightによって火星に地震計が設置され、火星の地震「火震」を発見するなど多くの成果が得られている³⁾。地震計を設置する主な目的は地震活動の調査であるが、地震計に記録されている微動データを解析することで、地震活動だけではなく地下構造の探査も可能となる。これをパッシブ地震探査と呼び、主に微動に含まれる表面波を用いて、S波速度構造を推定することができる。表面波以外にも、微動から反射波を抽出して地下構造をイメージする方法もある(地震波干渉法)。一方で、加振器を使って人工的に振動を発生させ、地下を伝達した波動場を地震計で記録することで地下構造を探査する方法もある。これをアクティブ地震探査と呼び、月面に着陸したアポロでは、既に行われている。また、今後も宇宙で実施することが検討されている。

本稿では月などの地球外天体での探査を目的として開発された小型のパッシブ・アクティブ探査システムを紹介する。特に近年、我々が開発している地震探査システムと、その結果を紹介する。

2. 調査方法

パッシブ地震探査では、表面波探査が主な探査手法となる。地震計の間を伝わる表面波の伝播速度を周波数ごとに測定することで、分散曲線(位相速度一周波数の関係)を計算し、S波速度を推定できる。月面や火星でも、微動は観測されており^{4,5)}、微動を用いた表面波探査が可能である。

表面波探査を実施するためには、一般的に複数台の地震計を設置する必要がある。また地震計アレイの長さが、可探深度にほぼ相当すると考えて良い。つまり、広い範囲に地震計を展開する方が、地下深部まで探査できることになる。表面波探査の可探深度を議論する際には、地震計が記録できる周波数も重要となる。表面波探査では、観測できる最小周波数に対応する波長の3分の1を、可探深度と考えることができる。つまり、低い周波数まで記録できる広



巻頭図 a) InSight着陸船。
b) InSightで取得された微動のPower spectral densityと、風速・温度の関係。強風時に、微動も強くなる。
c) InSightのデータに地震波干渉法を適用して反射面を抽出した結果。縦軸は往復走時であり、深度に対応する。横軸は火星の日付である⁴⁾。

帯域地震計を利用すれば、深部まで探査できることになる。

広い範囲に地震計を設置するには、ローバーに地震計を搭載し、地表に設置していくのが一般的な方式になると考えられる。しかし地球外の天体では、広域に地震計を展開するのは難しい場合が多い。そこでCenterless Circular Array (CCA)法⁶⁾という表面波探査を用いて、半径1m程度の小型アレイでも深部まで探査できるシステムを考えている⁵⁾。月面に着陸したアポロの地震計データを用いて、我々が検討した結果、月面の微動環境でCCAを行った場合、半径1mの円周上に3~5点地震計を設置すれば表層から深度5~10mまでのS波速度の深度プロファイルを得ることができることが分かった。半径1m程度であれば、着陸船の脚に地震計を設置する方式など、着陸船だけを使っ

て地震計を設置することも可能になると考えられる。

また地震波干渉法という手法を利用すれば、微動データから擬似的なアクティブ地震探査データを構成し、反射法地震探査の解析を実施することもできる。地球上では微動から反射法地震探査データを構築した例が報告されているが、この解析では微動源の位置・特徴が解析結果に大きな影響を与える⁷⁾。そのため、地球外天体の微動の特徴を調べることが、微動から反射法地震探査データを構築する上で重要となる。

火星に着陸したInSight(巻頭図a)に搭載されている地震計は1台であり、一般的な表面波探査(SPACなど)を実施することはできない。一方で、InSight地震計では、3成分(鉛直・水平2成分)の振動を記録しており、それらをうまく利用すれば着陸船直下での地盤探査も実施できる。我々は、鉛直成分または水平成分の微動データに、地震波干渉法を適用することで、火星内部の反射構造を推定した(巻頭図c)⁴⁾。また、微動の強度や到来方向は、火星の風に大きな影響を受けていることが明らかとなった(巻頭図b)。

3. アクティブ地震探査

地球上では加振器として、パイロサイズやエアガンが、一般的に用いられている。しかし宇宙環境で大型の震源装置を利用するのは困難であるため、我々は小型モーター型の震源装置や、ピエゾ型の震源装置、落下型の震源装置を開発してきた。モーター型とピエゾ型の加振器では、周波数変調させた波を連続的に発振する。繰り返し同じ波形(Chirp)を発振し、それを重合することで、発振波形のS/Nを向上させる。そのため、小型モーターやピエゾ素子といった小型加振器でも地下深部までの探査が可能になる⁸⁾。

3.1 極小アレイを用いたアクティブ地震探査

アクティブ地震探査で、地下浅部を探査する場合には、加振器と複数の地震計を一つのアレイに装着する方法が考えられる(図2)。例えば、比較的大型のローバーであれば、加振器と地震計から構成される長さ1mほどの線状アレイを設置できる。この場合には、ローバー単独で探査を実施することが可能である。図2に示すアレイでは、1mの極小アームの両端にモーター型加振器を設置し、その間に地震計を8台設置している⁹⁾。加振器は、月面とのカップリングを担保する(加振器が月面で滑らず、振動を月内部に伝える)機構を有している。一方で、地震計は、アームからの振動が地震計に伝わらないように、アームとデカップルする機構を備えている。

この加振器と地震計を装着した1mアレイを用いて、砂浜で野外フィールド試験を行った。2種類のモーター型の加振器で、50~300Hz程度の振動を発振し、表面波解析を適用して得られた分散曲線が図3aである。それぞれのモーターが得意とする周波数幅で安定した分散曲線が得

られ、各分散曲線が連続していることも確認できた。この分散曲線に対してインバージョンを適用することで、深度1.5m程度までのS波速度構造を求めることが可能となった(図3b)。

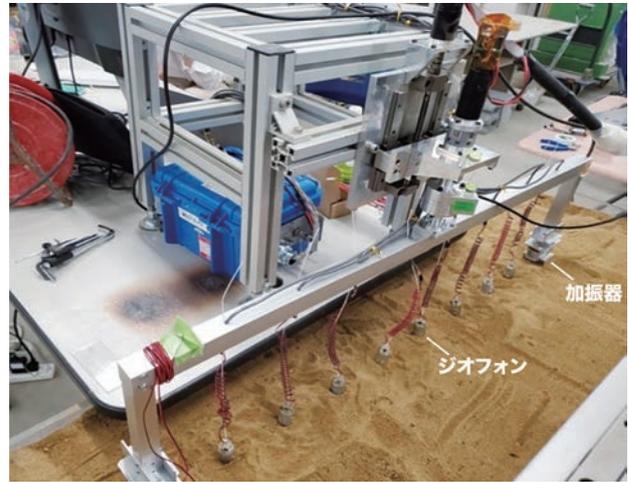


図2 加振器と複数の地震計が設置された極小地震計アレイ、アームの長さは1mである。

3.2 大型アレイを用いたアクティブ地震探査

加振器と地震計を切り離して設置する場合には、加振器と地震計の距離(オフセット)を長くすることが可能となり、より深くまで探査できる。特に屈折波はオフセットが長くなると記録することができない。さらに反射法地震探査の場合でも、加振器と地震計の距離が長くなれば、深い深度まで地震波速度を推定でき、高い精度の反射断面図を構築できる。

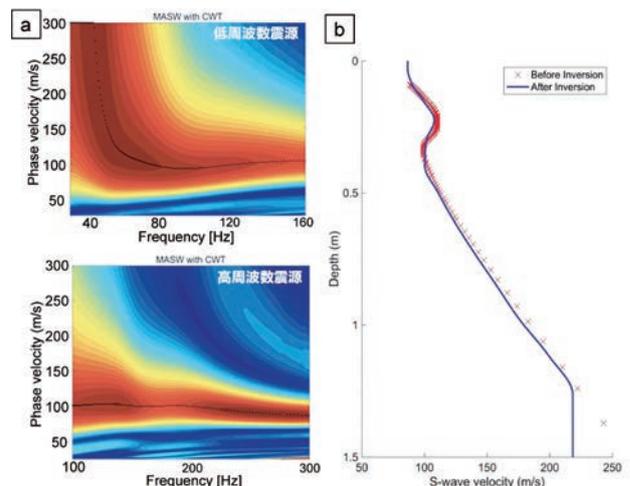


図3 1mの極小アレイを使って表面波探査を実施した結果
a) 2種類のモーターを同時に利用して得られた分散曲線。
b) S波速度プロファイル。

この方式では、大きな加振器を用い、長い距離を振動が伝播するのが望ましい。現在、我々が作成している小型震源システム(Portable Active Seismic Source; PASS)は全体で10cm程度のサイズであるが、発振振動

(Chirp)を重合すれば数100mも信号が伝播することが分かっている(図4)¹⁰⁾。

地震探査では、地震計を複数設置する必要があり、一般的に大掛かりなシステムとなってしまふ。しかし、PASSから同じ波形を連続して発振できる場合には、1台の地震計をローバーで移動させながら、PASSからの制御された振動を記録することで、多点の地震計で記録した場合と同等のデータ(Shotギャザー)を得ることができる(図5のローバー)。つまり1台のPASSと1台の地震計であっても、屈折法地震探査や反射法地震探査、さらには表面波地震探査の実施が可能となる。

表面波は、地表を平面的に伝播する。そのため1台のPASSから発振された表面波を空間的に展開された複数台の地震計で記録することにより、三次元的なS波速度構造を推定することができる。既に地上では、同様の震源システムと多点の地震計に対して表面波探査を適用し、空間的なS波速度構造をマッピングした事例がある。

さらに光ファイバーケーブルを地震計として利用する技術Distributed Acoustic Sensing (DAS)や、レーザー型地震計の利用により、地震計の数を増やすことができ、反射法地震探査や屈折法地震探査の実施が容易になると考えられる(図5)。光ファイバーの地球外天体への敷設は、ローバーで実施可能と考えられる。特に、月面では風がないので、光ファイバーケーブルを月面に設置するだけで、品質の高いデータの取得が期待できる。このDASを用いたシステムであれば、データの転送や時刻同期などが容易となり、宇宙での地震探査の可能性が広がると考えられる。



図4 小型震源装置PASSの写真。白いケースに振動子が内蔵されている。サイズは1辺10cm程度。

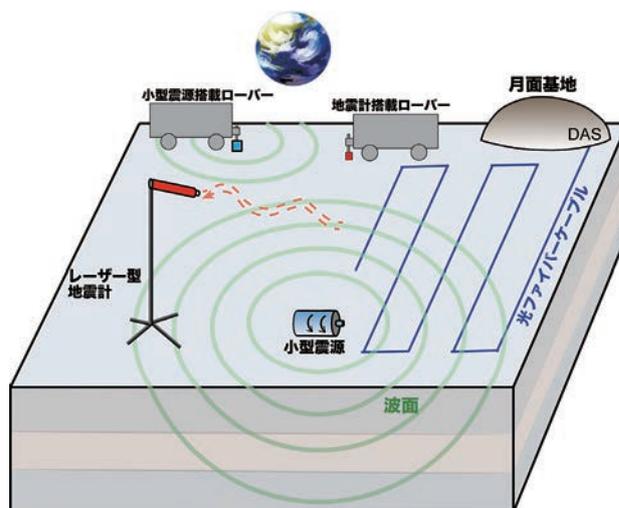


図5 PASS等を用いた宇宙空間での地震探査。

4. 最後に

ここでは近年、話題になることの多い地球外天体での地震探査について簡単に整理した。地震探査は自由度が大きく、環境や対象に応じて適当な探査手法を考え、加振器と地震計のジオメトリをデザインする必要がある。宇宙空間では限られたリソースで探査する必要があり、その探査装置と解析手法に開発要素が残っている。またDASなどの新規技術が宇宙でも利用できるようになれば月面に長大で稠密な地震計アレイが設置され、地球上と同等の探査結果を得ることも現実的になってきていると思われる。

<参考文献>

- 1) Tanimoto, T., et al., J. Geophys. Res., 113(E8), 2008.
- 2) Lognonné, P. et al., Nat. Geosci., 13, 213-220, 2020.
- 3) Giardini D et al., Nature Geoscience, 3, 205-212, 2020.
- 4) Suemoto, Y. et al., Geophys. Res. Lett. 47, 2020.
- 5) 折田まりな 他, SEGJ144回学術講演会, 2021.
- 6) Cho, I., et al., Geophys. J. Int. 165, 236-258, 2006.
- 7) Tsuji, T. et al., Interpretation 4, SQ1-SQ11, 2016.
- 8) Tsuji, T. et al., Scientific Reports, 11, 19120, 2021.
- 9) Tsuji, T. et al., Proc. The 13th SEGJ Int. Symp. 11-14, 2018.
- 10) 辻 健 他, SEGJ第145回学術講演会, 2021.

P波初動波形を用いた震央距離推定 ～地下不均質構造の地域性の考慮による 高精度化と早期地震警報での利用～

産業技術総合研究所 岡本 京祐

1. はじめに

S波による大きな揺れが到達する前に警報を発する、いわゆる緊急地震速報では、単独観測点にP波が到達した時点で即時的に震央位置・距離の推定を行い、その情報を後に続く複数観測点を用いた高度な中枢処理に引き渡して、震源決定や震度予測がなされます。また、鉄道システムでは、大きな揺れが到達するまでの間に即時的な減速・停止が重要なため、沿線や海岸線に配置された単独の地震観測点のみを用いて即時的に警報を発するシステム(早期地震警報)が備わっています。特に高速で走行する新幹線では1秒でも早く判断を行うことが重要です。具体的には、早期地震警報では、単独観測点を用いてP波初動の2秒間から、即時的に震央位置・マグニチュードを推定します。この推定において、特に震央位置は、マグニチュード決定のほか、その後の即時的な被害予測でも参照される情報のため重要です。しかし、単独観測点から求められる震央距離には誤差が多く含まれており、早期地震警報の精度を下げる一因となっています。本研究は単独観測点処理による警報

の即時性という利点は残しつつも、震央距離推定精度の向上、ひいては早期地震警報の信頼性向上を目指しました。受賞対象となった論文Okamoto and Tsuno (2019)、ならびに岡本・津野(2017)に基づいて簡単に研究内容を紹介します。なお、本研究は、筆者が(公財)鉄道総合技術研究所に在籍していた際に主に行ったものです。

2. 早期地震警報の仕組み

早期地震警報では、P波初動とその直後の2秒間の包絡線 y に対して、式1を最小二乗法によりフィッティングし、係数 A 、 B を求めます (Odaka et al., 2003)。

$$y = B \exp(-At) \quad (1)$$

ここで、 t はP波到着時からの経過時間です。震央距離が長くなるほど、高周波成分の減衰によりP波の立ち上がりが緩やかとなり、小さな B 値が観測される関係を利用して、震央距離を求めます。近年は、 B 値に代わり、より短時間のP波成長挙動から震央距離を推定できる C 値(山本ほか、

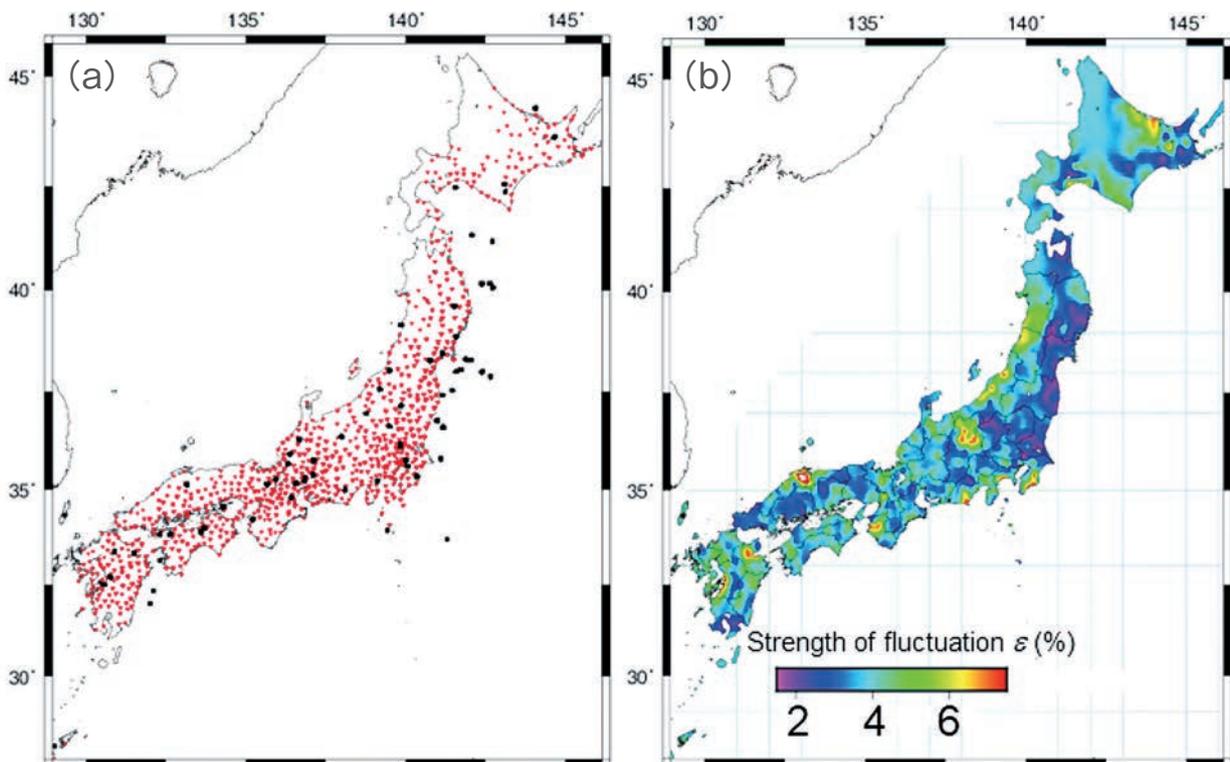


図1 (a) 解析対象の地震(●)と、観測点(▲)の分布。
(b) 不均質構造のゆらぎ強度 ε の空間分布。

2012)が提案されています(式2)。

$$y = Ct \quad (2)$$

C値はより純粋にP波の立ち上がりを評価できるため、P波初動2秒間を用いるB値に比べ、同0.5秒間のみを用いた震央距離の推定が可能です。C値と震央距離(Δ)の関係を示した経験式(式3、以下、C- Δ 式)に基づいて震央距離を求めます。

$$\log C = \chi \log \Delta + \kappa \Delta + \eta \quad (3)$$

この式中の、係数 χ は幾何減衰に関する項、 κ は伝播に伴う特性を示す係数、 η は震央距離に依存しない係数です。

3. 震央距離推定精度の向上

従来、全国一律にC- Δ 式(および、B- Δ 式)の係数は決められていましたが、地域ごとに係数を最適化することで、震央距離推定精度を向上させることを試みました。

最初に、ボルン近似に基づく理論P波の合成を用いて、P波初動の特性を検討しました。検討の結果、地下不均質構造の違いがC値と震央距離の関係性を変化させることを明らかとなりました。そのため、まず、K-NET観測点と複数の地震を用いて(図1a)、日本全国の地下不均質構造の特徴

量を抽出し、不均質構造の地域性を確認しました(図1b)。ここで示された特徴量は、地震波速度構造のゆらぎ強度 ε です。図1bにおいて、 ε が小さい地域ほど寒色系で示されています。K-NETで実際に観測されたP波初動0.5秒間の波形を用いて、ボルン近似に基づく理論波形により逆解析することで ε を求めました。この結果からは、特に東北地方太平洋側では不均質構造のゆらぎ強度が弱く、日本海側では反対にゆらぎ強度が強いなどの特徴が分かります。ゆらぎ強度 ε ごとにC値と震央距離の関係を表したものが図2です。ゆらぎ強度 ε が弱い地域から得られるC値ほど、大きな値を示す傾向を明らかとしました。

C- Δ 式(式3)の各係数のうち、幾何減衰には地域ごとの差がないと想定されるため、 χ は不変と考えます。また、C値推定に用いるP波初動0.5秒間は一次散乱波が卓越するため、震源近傍と観測点近傍といった限られた範囲の不均質構造の影響を強く受けます。一方で、多重散乱波の影響は少ないので、伝播経路上の不均質構造の影響は比較して限定的です。そのため、震央距離には依存しない係数 η を変化させることにより、C値の地域性を説明することを考えました^{*注1}。その結果が図2に点線で示した各曲線です。それぞれの曲線が異なった係数 η で特徴づけられており、ゆらぎ強度 ε に応じた地域ごとのC- Δ 式を示しています。

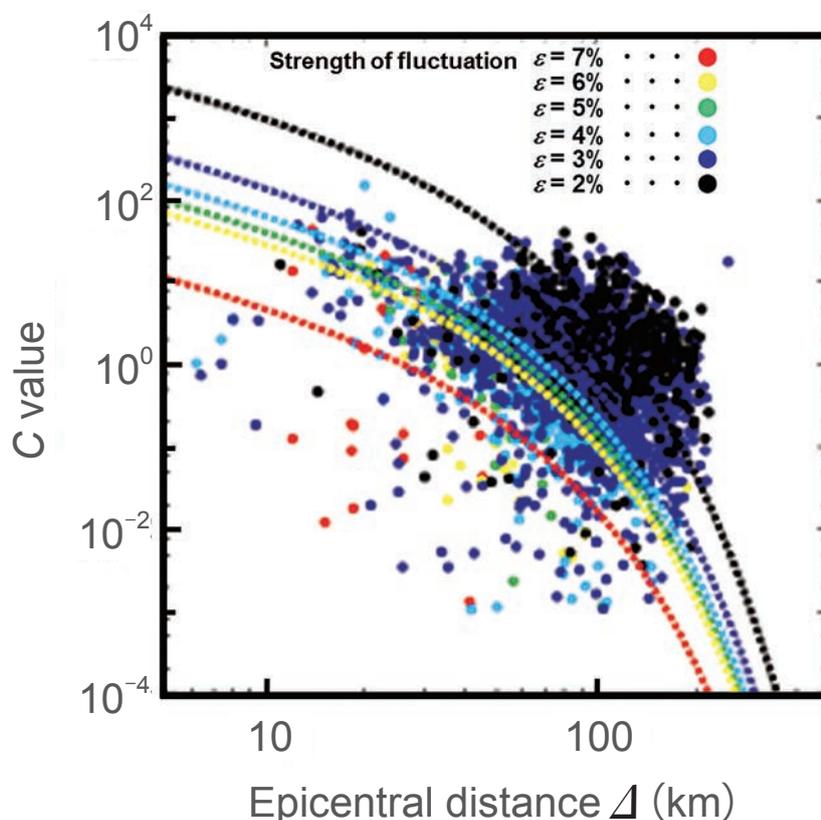


図2 ゆらぎ強度 ε により区分されたC値と震央距離(Δ)の関係。点線は各 ε に対して最適化されたC- Δ 式。

地域ごとに最適化されたC- Δ 式を用いて震央距離を推定しました(図3)。これにより、従来の全国一律の係数を用いる場合には、実際の震央距離に対して23%程度あった誤差を、17%程度にまで低下させることができました。単独観測点による警報の即時性という利点は残しつつも、震央距離推定精度の向上が可能なことを示しました。

4. 今後の展望

不均質構造の地域性を考慮することで、早期地震警報における震央距離推定精度が向上することを明らかにしました。解析に用いる地震の違い(例えば深度の違い)により推定される不均質構造のゆらぎ強度 ϵ が変化することや、地震波伝播経路の影響を完全には無視することはできないこと、地域分けを観測点位置に基づいて行うのか、震源位置に基づいて行うか(早期地震警報内では震源位置は未知であるが)など、実際の運用に際しては複数の課題が残

されています。それらを解決することでより実利用が近づくと考えます。

*注1 余談ですが、多重散乱が支配的なP波コーダ後半部分は伝播経路上の不均質構造の影響を大きく受けるため、より長時間のP波コーダを使うような解析では、この仮定はできないと思われま

<参考文献>

- Odaka, T., K. Ashiya, S. Tsukada, S. Sato, K. Ohtake, and D. Nozaka. 2003. A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93, 526-32.
- Okamoto, K., and Tsuno, S. 2019. Accuracy improvement in the estimation of epicentral distance inferred from initial P-waves by considering local heterogeneity. *Exploration Geophysics*, 50, 159-171.
- 岡本京祐・津野靖士, 2017. P波伝播の地域性を考慮した早期地震警報の高精度化手法, 鉄道総研報告, 31, 11-16.
- 山本俊六・野田俊太・是永将宏, 2012. P波初動部の立ち上がり特性に着目した震央距離推定手法, 鉄道総研報告, 26, 5-10.

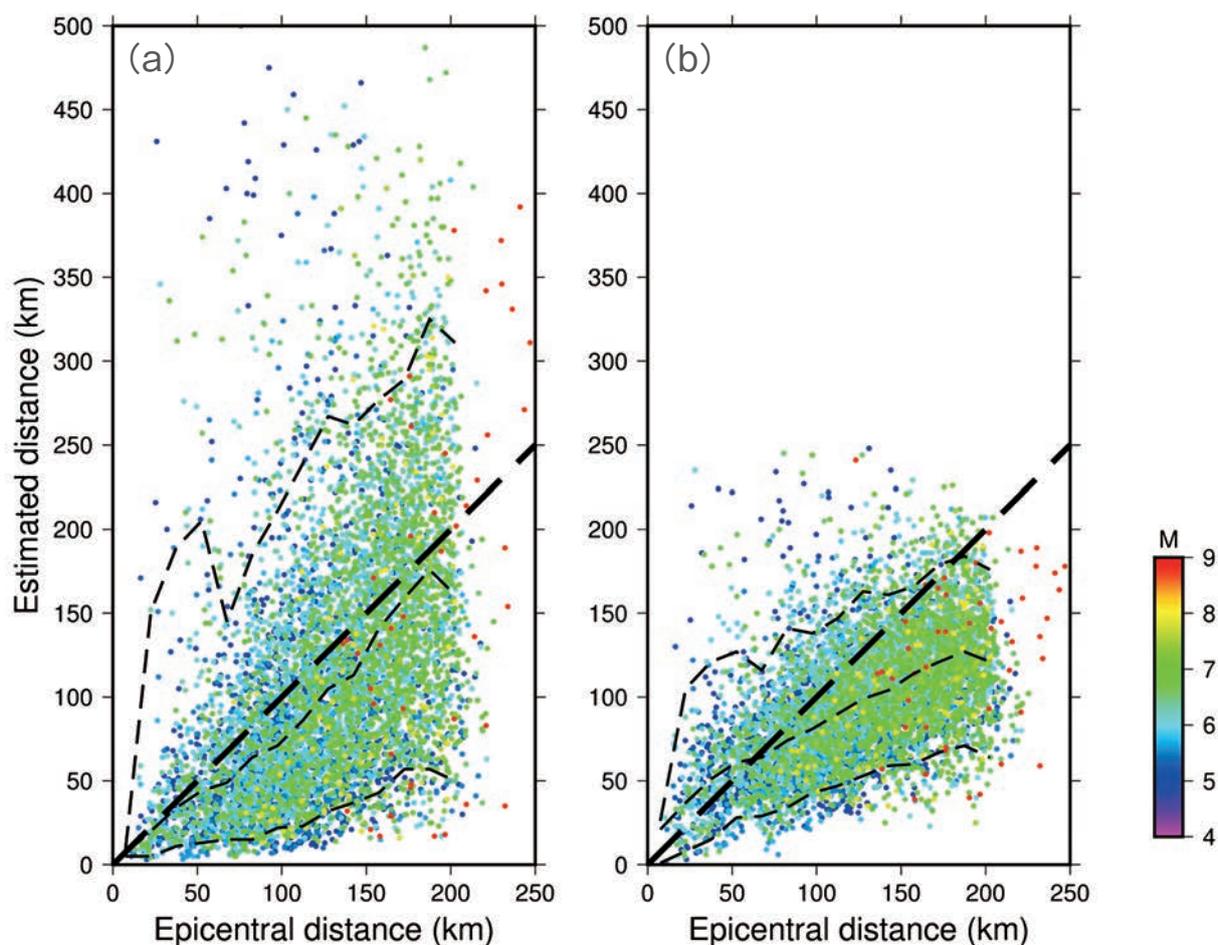


図3 実際の震央距離(横軸)と推定された震央距離(縦軸)の関係。
 (a)不均質構造の地域性を考慮しなかった結果と(b)考慮した結果。
 破線は下から、10%、50%、90%のパーセンタイルを示す。
 点の色は地震のマグニチュードに対応する。

新潟県陸上震探収録作業について ～その①：夜間・深夜収録と稠密発震による 高品質記録の確保

株式会社INPEX 技術本部 技術推進ユニット 堂垂 達也

1. はじめに

当社は2019年9月～12月の約3か月半、新潟県中越地域の陸上において新規二次元震探収録作業(以下、本作業)を実施した(図1)。当社内におけるこれまでの震探収録の経験から、当地域は深部のイメージングが困難な地域と認識されていたが、社内の技術検討の結果、ノイズレベルに応じた発震プログラムの最適化や稠密収録の導入によって品質の改善が見込めることが示唆され、およそ10年ぶりに当地域で震探収録を実施することとなった。

本記事では、本作業にて新たに取り入れた震探収録における工夫について紹介したい。



図1 収録作業の様子(夜間収録)

2. 事前ノイズ観測に基づく 発震プログラムの最適化

【事前ノイズ観測】

収録対象地域におけるノイズレベルの把握を目的として、本収録前の2019年4月に事前ノイズ観測を実施した。事前ノイズ観測においては計画測線上の代表15地点で昼夜休日を含む連続54時間のノイズ観測を実施した。

ノイズ観測の結果、夜間(19時～翌6時)におけるノイズレベルが日中に比べ10dB以上低下するとともに、朝夕の通勤時間帯(9～10時、16～18時)にノイズレベルがピークとなるといった時間的な傾向を把握出来た(図2)。

また、市街地や幹線道路周辺の観測点において定期的にノイズレベルが上がるといった空間的傾向も把握出来た。

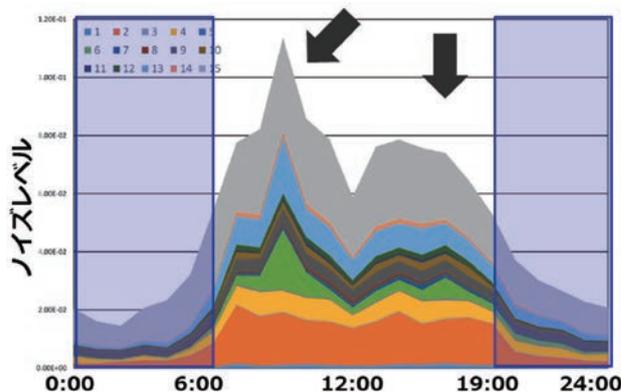


図2 事前ノイズ観測結果

【発震プログラムの最適化】

ノイズ観測の結果、深夜帯では大きくノイズレベルが低下することが確認できたため、可能な限り深夜に発震を実施する方針となった。一方で、収録地域には市街地や工場などの施設が点在していることから、近隣住民への影響を考慮する必要があった。そこで本作業においては、民家や施設などの構造物から発震点までの距離を基に発震時間帯を表1に示す3つの時間帯に区分することで近隣住民への影響を低減させる発震プログラムを設定した。

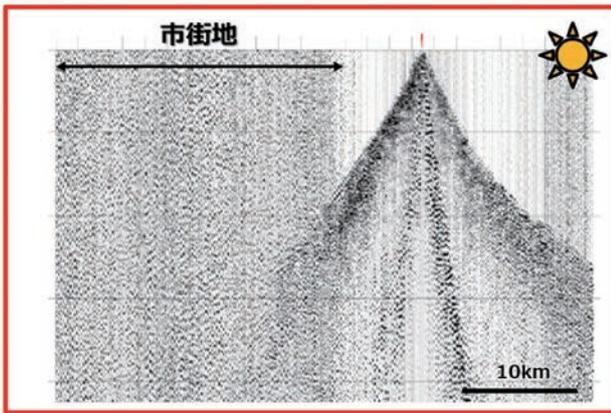
表1 本収録における作業時間帯

作業区分	時間帯	構造物からの距離
日中作業	10時～16時	150m以下
夜間作業	19時～22時	150～300m
深夜作業	22時～翌4時	300m以上

また、ノイズレベルの高い区間の前後においてはバイブレータの発震回数を標準パラメータから増加させることで記録品質の向上を図った。

事前ノイズ観測結果と机上作業及び度重なる現地踏査を組み合わせることで発震プログラムを最適化したことにより、過半数の発震点で夜間及び深夜作業を実施することが出来、高品質な記録の取得に成功した。(図3)

日中発震記録 (11:00 AM)



深夜発震記録 (3:00 AM)

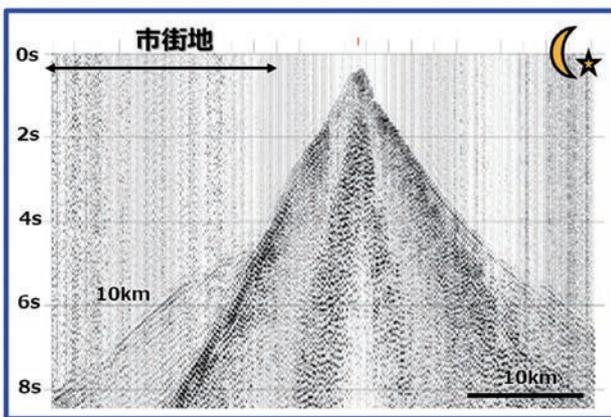


図3 日中発震記録と深夜発震記録の比較

3. 稠密受発震の実施

本作業においては、従来の収録仕様では受発震間隔が概ね20~40m程度だったのに対し、発震間隔10m、受振間隔5mといった、稠密受発震の収録仕様を採用した。稠

密受発震を採用することによってCMPあたりの重合数が飛躍的に増加しS/Nの改善やデータ処理品質の精度向上が期待できるためである。

本稿では稠密受発震の成果の一例として表面波ノイズ抑制の精度向上を紹介する。本作業において5m間隔で受振した記録と20m間隔の受振仕様となるように間引いた記録に対するF-Kフィルタを用いた表面波抑制処理の精度を比較した結果を図4に示す。従来の収録仕様(20m間隔)ではF-Kフィルタを適用しても低速度の表面波ノイズがエイリアシングを起こしてしまい十分にノイズを抑制できていないのに対し、本作業の収録仕様(5m)では、表面波ノイズのエイリアシングが抑えられ、効果的にノイズが抑制されていることが確認できる。

この様に、本作業では稠密受発震によって重合数の増加によるノイズ低減効果に加え、ノイズ抑制処理の精度向上を達成することで従来の収録結果と比べ、高品質の震探断面を得ることが出来た。

4. おわりに

本作業は、当社にとっておよそ10年ぶりの国内陸上での震探収録であったが、従来難地域とされていた中越地域において、夜間作業や稠密受発震といった技術的な工夫を行うことによって、従来の収録結果を上回る品質の震探データを収録することに成功した。当社では2020年にも新潟県の下越地域において震探収録を実施し、本作業で効果を確認した技術的な工夫に継続して取り組むとともに、収録地域に応じた新たな工夫を加えて高品質な記録の収録をめざした。(その②へ続く)

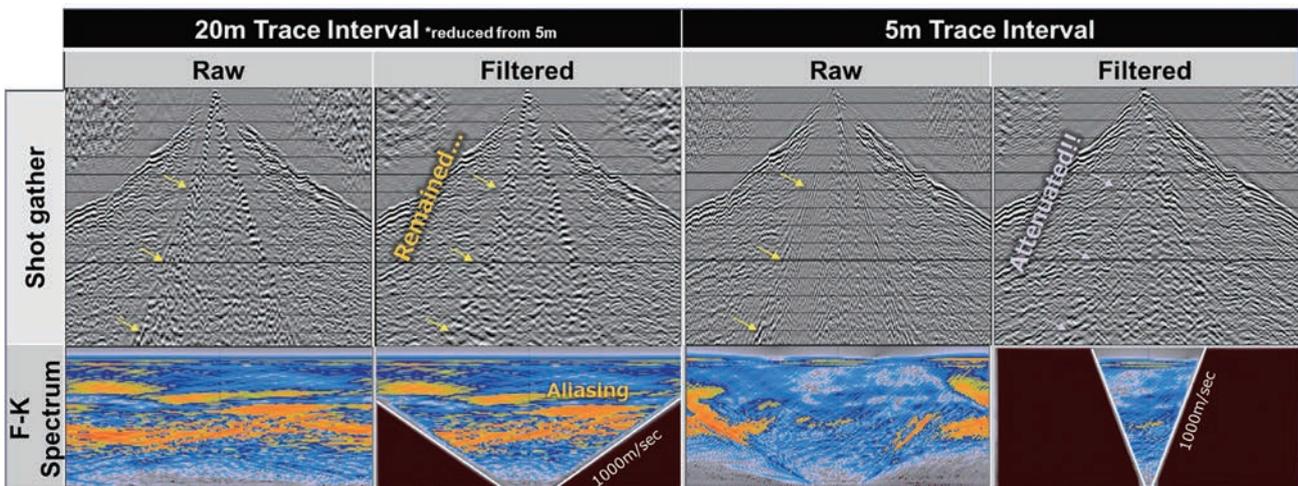


図4 稠密収録による表面波ノイズの抑制効果 (Seino et.al., 2020)

台湾微動観測記 その1(小アレイ)

産業技術総合研究所 長 郁夫

2018年花蓮地震

2018年2月に台湾で発生した花蓮(かれん)地震(Mw 6.4)の調査のため、京都大学防災研究所の山田真澄氏がとりまとめた花蓮市内の微動観測に同行しました。この地震は死者17名、ビル4棟の倒壊など多くの被害をもたらしましたが、ビルの倒壊理由(地盤、地表断層、震源過程等)が判然としませんでした。そこで山田氏は地盤調査のため日本から6名、台湾から6名の研究者を募り微動観測を行いました(図1)。



図1 微動観測隊員(2列目左端が山田氏)

花蓮(図2)は台湾東部最大の都市です。港があって魚が美味しく、背後には富士山より高い中央山脈が迫ります。大理石の断崖絶壁で有名な太魯閣(たろこ)峡谷まで30kmで、ナイトマーケット「東大門夜市」の近くには繁華街を東西に区切るように米崙(みるん)断層が走ります。大地のダイナミクスを感じます。地盤はさぞ複雑なことでしょう。倒壊したビルの周辺は特に軟弱だったのでしょうか?

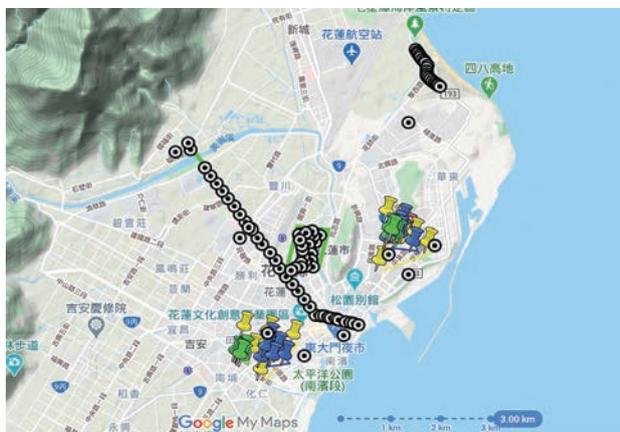


図2 花蓮市の微動観測地点(ピン、マーカー等)

観測計画

観測には産総研の3成分サーボ加速度計6台と鳥取大学からお借りした4台で合わせて10台を手分けして持参

しました。これをどう使うか皆で話し合いました。「浅部構造(小アレイ)を面的(3D)に」、「断層を挟む測線沿い(2D)に」、「地震基盤(大アレイ)も」、などいろいろな希望が出ました。その結果、欲張りにも全部やろう(図2)ということに。もちろん実現性は現地の状況によるので、まずは初日にテストをしてから内容を確定する流れとなりました。

現地テスト

旅程は2018年10月の1週間でした。移動を除くと観測は4日間、うち初日は朝から機材チェック、午後は「小アレイ」の現場テストとなりました。

私はこれまで国内で半径0.6mの極小アレイと半径7-8mの三角アレイをセットで観測してきましたので「ぜひ花蓮でも」と思っていたのですが、現場判断で中止となりました。三角アレイは通常、道路の両側にそれぞれ1台と2台の地震計を設置しています。しかし、花蓮郊外は車両通行が多くて、赤コーンを置いても猛スピードで突っ込んでくるので、道路の横断すままならず、「地震計が轢かれるのも時間の問題!危険過ぎる」と断念しました。

急遽、「半径7.8mの三角アレイ」を「地震計2台で構成される2点(直線)アレイ」で代用しては? という大胆な案が浮上りました。それなら道路の片側だけ使って設置できるのでだいぶ安全になります。

しかし、2点アレイは微動の波動場の影響でバイアスが生じる可能性があるため、常識的には推奨されません。しかし、私は「何とかできるのでは?」と思っていました。少なくとも国内では、2点アレイによるたった15分間のデータであっても「そこそこの(程度問題にて、ここが重要)」結果が得られていたからです。これは単なる直観ではなく、数百個のアレイの統計でした。具体的には、「20%程度の誤差を許容できるならば2点アレイの結果の3/4は適切」という結果が得られていました(Cho 2020, doi: 10.1093/gji/ggz454; Cho et al., 2021, doi: 10.1093/gji/ggab149)。

しかし、そうは言っても、「台湾でも大丈夫?」と聞かれるとやはり不安です。そこで、全地震計を5m間隔で直線的に並べて長時間の記録を取りました(図3)。2点アレイで問題のない地震計間隔や記録時間を改めて確認しておきたかったからです。夜にホテルに戻ってデータを解析すると、国内と同様に15分程度のデータでも十分安定した分散曲線が得られました。もしも1/4の結果が怪しくても、3/4が適切ならば、大量に観測すれば2D/3D地盤構造の概観程度ならば把握できると期待できます。

ヒゲ付き極小アレイによる稠密観測

もちろん、2点アレイのバイアスのリスクを完全に除外することはできません。そこで、リスクヘッジのために「ヒゲ付き極小アレイ」(小アレイ)の利用を思い立ちました(図4)。

「ヒゲ」は長波長側(低周波数側)を担当する長さ5mと10mの2つの2点アレイ(15mの2点アレイも自動的に追加される)から成ります。ヒゲの「毛根」にあたる部分に



図3 リニアアレイによるテスト。夕方だったため、多くの参加者が蚊に苦しんだ。



図4 ヒゲ付き極小アレイ

極小(三角)アレイを置いて、短波長側(高周波数側)を担当させることにしました。こうすれば少なくとも高周波数側は3点アレイなので波動場によるバイアスがありません。よって、それぞれの結果がスムーズにつながれば、間接的ですがヒゲの結果にバイアスがないことが担保されます(図5)。

加えて、いくつかの地点では大きな三角アレイを実施してヒゲの結果を直接検証しました。さらに、多数の定常的な強震観測地点でも同様に観測しました。これらの地点ではPS検層がなされているので解析精度の検証が可能となります。

というわけで、6名ずつの2グループに分かれ、それぞれ1地点ごとにヒゲ付き極小アレイで15分間の観測を行っては少し移動するという作業を繰り返しました。このアレイは道路の片側に設置できるのでとてもラクです(図4)。本観測3日間のうち2日間をこれに費やしました。その結果、全部で60地点以上の記録が得られました(図2の2重丸印)。

このように「2点アレイ」の利用には慎重さが必要です。しかし、上述の通ように、結果を担保する手段がある限り、とても使える道具となります。ここでは約5kmの測線に沿う2D断面の評価や被害甚大地域でのAVS30のマッピングが可能となりました。それらの結果については山田氏の報告(Yamada et al. 2020, doi: 10.1785/0120200063)をご一読下さい。

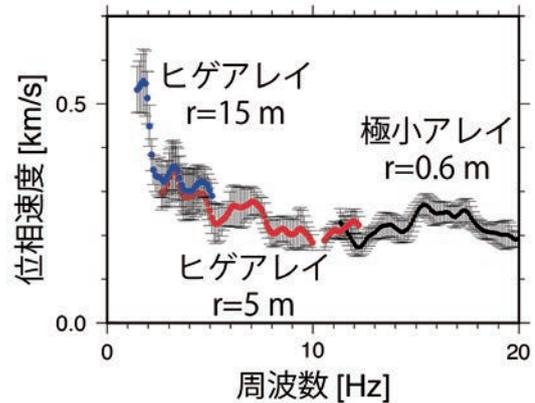


図5 位相速度分散曲線例。誤差棒は標準偏差

余談

こういう市街地の観測にはいくつか特典があります。まず、商店街の人が話しかけてくれます。最初は、慣れない台湾語のせいか「怒られてるの?」と感じましたが、実はどれも楽しいおしゃべりだったようです(図6)。また、コンビニがあってトイレに行けることや蚊がいないことも市街地ならではの特典です。でも最も嬉しいのは、ランチやおやつを選択肢が増えることかもしれません(図7)。

今回は、本観測3日間のうちの1日分をまるまる使って行なった大アレイ観測について報告します。



図6 観測中に商店街の店主と記念撮影。左の二人は観測手伝いの高雄大学学生。



図7 人気店「周家蒸餃」の餃子と小籠包

「眼底検査と路面下空洞探査」 のその後

川崎地質(株) 鈴木 敬一

物理探査ニュースNo.42号に「眼底検査と路面下空洞探査」と題する駄文を書かせていただいた。そこでは眼の内部を診断する眼底検査と、物理探査の一手法である路面下空洞探査とはよく似ているという主旨だったが、その後の経過もよく似ているように思われるので、再度紙面をお借りして報告させていただく。

筆者が眼底検査を受けた経緯はNo.42号をご覧いただきたいが、病名は加齢黄斑変性という名称である。網膜の裏側に水が溜まり、空洞ができることにより、その部分の視力が低下する症状が現れる疾患である。この空洞を非破壊で調べる方法が眼底検査と呼ばれる。眼底検査は、光干渉断層計という赤外線による反射法探査である。

写真1に網膜の裏側にできた空洞の画像を示す。画像の中央やや上の、半月状に黒く見える部分が水のたまった空洞部である。No.42号ではカラー画像であったが、ここではグレースケールになっている。画像の端から端までの長さは3mmであり、縦横比は1:1である。画像の上側が眼球側で、下が眼球の外側になる。

治療開始直後は飲み薬による投薬を行っていたが、改善がみられないので治療方針を変えることにした。それについては後述するが、方針を変えたことで担当医師も変更となった。変更となった医師は、カラー表示よりグレースケールを好むようである。反射法地震探査や地中レーダでは、波形の強弱をカラーやグレースケールで表示するが、どの方法を採用するかは技術者により好みが変わるようであり、医療の現場でも同様であることがわかる。

閑話休題。さて治療の方針であるが、投薬だけでは改善がみられないので、根本的な治療に移行することになった。この疾患は、毛細血管からの漏水が、網膜の裏側に溜まることにより空洞ができる。そこでこの漏水を

止める治療を行うのである。この治療法はビスサイン療法といわれるものである。レーザー光線に反応する薬剤を、点滴により投与し、眼底の毛細血管から出てきたところをレーザー光線で焼いて、漏水を止める方法であり、止水処理と呼ぶことにする。治療自体は点滴以外の痛みなどの苦痛はないが、この治療には大きな問題がある。薬剤を投与すると、皮膚が敏感になり、普通の赤外線に曝されるだけでやけどをしてしまうことである。その効果は丸々2日続くとのことで、日光だけでなく、こたつの赤いヒーターやハロゲンランプの光などでもやけどするそうである。そのため治療は夕方、暗くなりかけたところに行われる。治療後は病院で少し休憩して、完全に暗くなってから帰宅する。念のため暗くても日傘をさして外を歩く。日光に当たるとやけどするとは、日光に当たると灰になってしまうといわれる吸血鬼ドラキュラのようである。帰宅後は丸々二日間、外出ができない。いまのように在宅勤務の方法が確立されていなかったので、木曜日の夕方に治療し、金曜日は有給休暇をとることでやりすごした。この治療を行ったのが2019年5月9日のことである。その1週間後の5月16日の眼底検査の結果が**写真2**である。

写真1と比べると明らかに空洞が小さくなっていることが確認できる。路面下に生じた空洞も、原因がたとえば上水道の漏水の場合は、止水する必要があるが、この疾病でも同様である。路面下の空洞の場合は、下水道の老朽化や、インフラ建設時の締固め不足など様々な原因があるが、その場合も同様に根本的な原因を突き止めて、適切な対応をすることが重要なことと同じである。

約1か月半後の6月20日の眼底検査結果が**写真3**である。空洞部分はほとんどなくなっていることが確認できる。

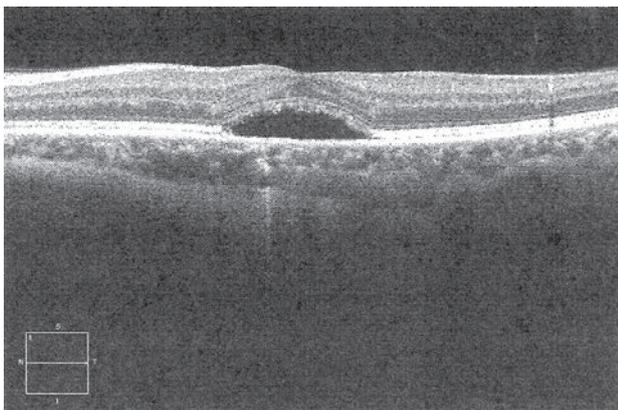


写真1 止水処理前の画像 (2019年4月18日)



写真2 止水処理直後の画像 (2019年5月16日)

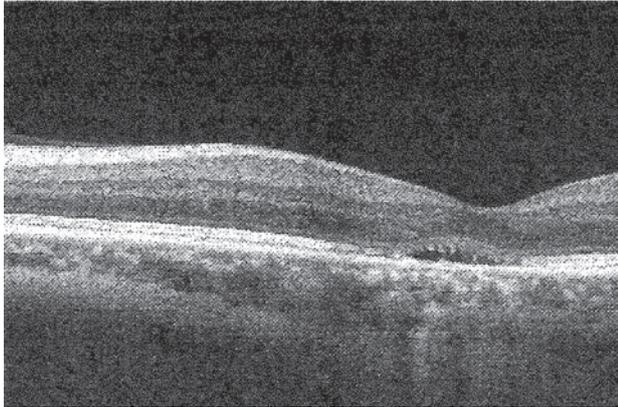


写真3 止水処理1か月半後の画像(2019年6月20日)

写真1の状態ではほとんど視力がない状態であったが、写真3の状態では視力が0.3~0.4程度に回復した。現在は飲み薬による投薬と、3か月に1回の眼底検査を行って、再度空洞の成長がないかをモニタリングしている。3年以上経過した現時点では写真3の状態を保っている。一度、このように網膜に変状をきたすと完全には元に戻らないようであるが、通常の生活に支障のない程度であるため、モニタリングを行って、症状の悪化の早期発見に努めている。

路面下空洞探査の場合も同様で、ひとたび空洞が発生すると空洞が成長し、浅部に移動することにより、道路陥没などの被害が生じる。そのため、定期的な路面下空洞探査が重要である。対策工実施後にその効果を確認する、あるいは空洞のできやすい地盤条件もあるため、対策工を実施した後も継続的なモニタリングは重要である。

現在は、写真3の状態では落ち着いているが、再発した場合、止水処理を再度行うのか、あるいは別の治療法を行うのか、それを考えると憂鬱である。別の治療法とは、眼球に注射をして薬剤を投与する方法である。眼球には神経がないから痛くないといわれても、怖い気持ち

は取り除けないからである。

結論

やはり眼底検査は、路面下空洞探査に似ていた。

物理探査と医療診断

物理探査は医療の検査と比較されることがある。医療CTの画像などは非常に鮮明で、物理探査で得られる画像と比較すると、医療分野が優れているように見える。しかし、単純に比較することには問題がある。医療の場合、人体や患部にソースやセンサーの配置の自由度が高く、人体内部の物性や構造がある程度わかっている。しかし、物理探査の場合はセンサーの配置などの自由度が低く、物性の取りうる値も広いうえ、未知のパラメータが医療に比べると多い。そのあたりが画像の鮮明さの違いとして現れる原因のひとつと考えられる。

写真4は歯科医院で撮影した筆者の下顎部を中心とした三次元CT画像である。右下の青い矩形で示した断面が、左下の青い矩形に相当する。黄色と緑色もそれぞれの断面を示している。被せ物や詰め物あるいは骨や歯の部分非常に鮮明に確認できる。よく見ると金属製の被せ物の角のところで回折波が見える。赤い点線で囲ったところは歯根の周囲が劣化し、歯槽膿漏の手前の状態である。しかし、ここのところは見慣れないとよくわからないし、そういわれて初めて気が付くような違いである。専門家である医師の判断が重要であることはいまでもない。その後、適切な治療が施され、大事には至っていない。

医療分野の画像を比較してみたが「物理探査と医療診断は似て非なるもの」という感じがする。

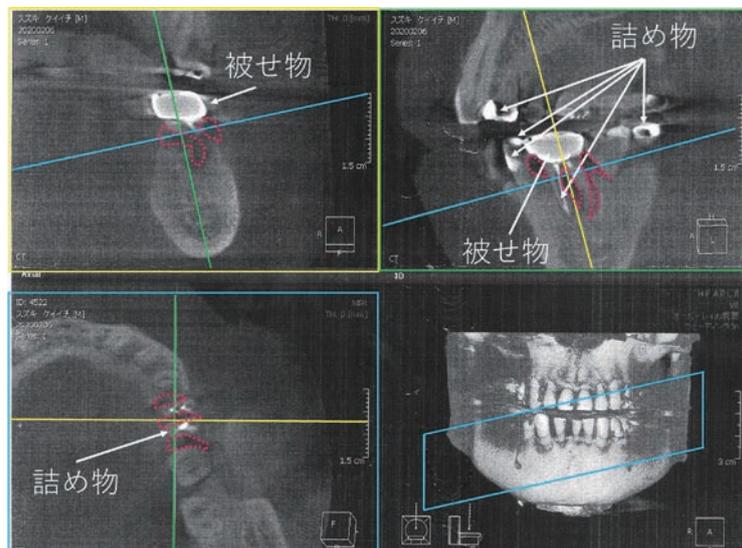


写真4 下顎部のCT画像

東北大学 佐藤 源之

1. はじめに

GPR手法紹介の第2回目ではレーダ装置の仕組みを説明します。「GPRはパルスを電波で地中に放射し、反射波を受信する」と言えばGPRがわかった気もしますが、無線機器としてのGPRは非常に特殊で電波の専門家からすると不可解な装置です。

2. GPRの周波数

我が国で電波を発する全ての機器は、電波法に基づく無線局免許を取得しなければなりません。無線局免許を持たずスマートホンを使うと電波法違反になります。と言っても、スマホの無線局免許を持っている人はいないはず。それはスマホの技術基準適合証明：通称「技適」を製造メーカーが取得することで、ユーザーの無線局免許取得を免除する特例があるからです。ところが現状でGPRは「技適」できません。それはGPRの使用する周波数帯域に原因があります。

電波法では既存の無線局に干渉を起こさない場合に限り、無線局免許申請の許可を判断します。図1はGPR装

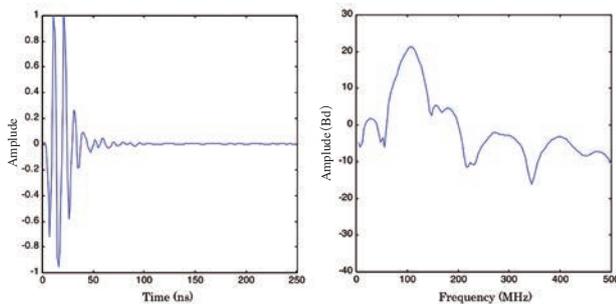


図1 GPR装置の放射する電波波形とそのスペクトル

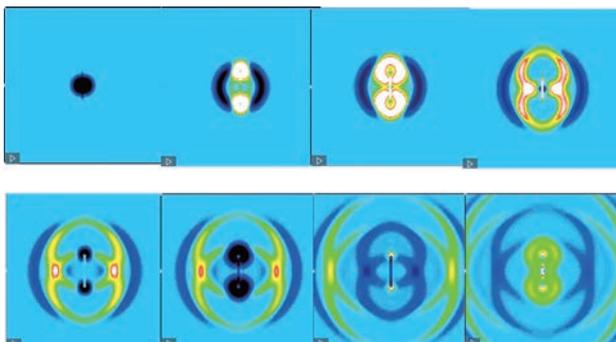


図2 パルス励振したダイポールアンテナからの過渡放射電界

置の放射する電波波形とそのスペクトルの例です。このGPR装置は直流付近から2GHz付近まで広く周波数帯域を占拠しています。これに対して、例えば携帯電話では10~20MHz(4Gまで)、デジタルテレビ放送では6MHzの周波数帯域しか使用しません。

無線工学では比帯域幅という基準で、システムの動作周波数を表します。携帯電話やデジタルテレビ放送の比帯域幅が1%程度であるのに対し、GPRは25%以上という桁違いの比帯域幅を持つため、アンテナを含む高周波装置の設計が極めて特殊です。25%以上の比帯域幅をもつ無線機器は一般にUWB(Ultra Wide Band)システムと呼ばれます。

3. GPRアンテナからの電波放射

GPRアンテナはパルスを送信し反射波を受信します。最も単純なアンテナは金属の棒2本の間に送信電源を接続するダイポールアンテナです。図2にFDTD法でシミュレーションしたパルス電圧を印加したダイポールアンテナからの過渡放射電界を示します。パルス電圧はアンテナ素子に電流を誘起しますが、電流はアンテナ素子の先端で反射を受けて反対方向に流れます。これを繰り返し電流が素子の上を同じ周期で往復することで共振が強まります。一方、電流が一方向に流れるとき放射電界が形成されますが、電流が向きを変えるたびに電界の極性が逆転します。その結果、アンテナ共振周波数に対応する振動波形が現れます。これをGPRではリングングと呼びます。アンテナは共振を利用して効率よく電波を放射することの見返りとして、信号が長く尾を引くリングングを起こすため、レーダとしての性能を悪化させます。その対策としてGPRでは意図的にアンテナ共振を下げて、リングングを起こさないようにします。このことは、アンテナからの電波放射を起こしにくくするという、本来の目的と相反する設計をしているのです。

ダイポールアンテナと送信機とのインピーダンス整合をよくするためにアンテナ素子を三角形にしたボータイアンテナがGPRでは広く使われています。図3は私たちが設計・製作した抵抗装荷型のクロス・ボータイアンテナです(佐藤、斎藤、2022)。アンテナ端部と周囲のアース面の間に抵抗を接続することでアンテナを流れる電流が熱となって消散しますが、電流の反射を減らすことで共振を抑制しリングングを防ぐことができます。更にボータイアンテナを直交する2組にすることで偏波方向

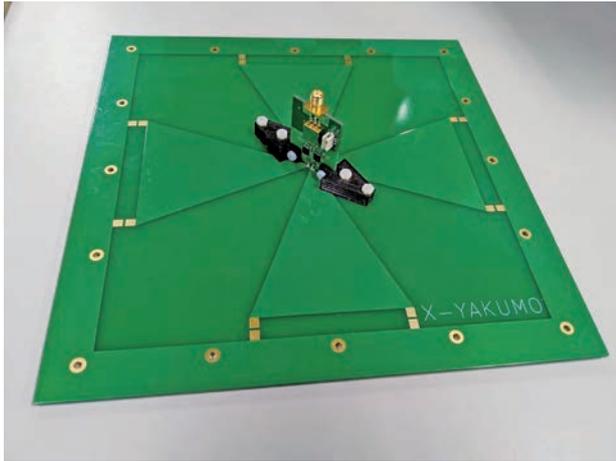


図3 クロス・ダイポールアンテナ

の切り替えもできます。

GPRの送信出力を上げるとより深い地下を見ることができのでしょうか。答えは否です。埋設管をGPRで見ると、周囲の土壌には礫などが含まれています。GPRの送信波は埋設管だけでなくその他の物質からも反射し、埋設管からの反射波に重畳します。こうした不要反射波をレーダ技術ではクラッタと呼びます。クラッタは目的とする埋設物を見えにくくする主要原因ですが出力を上げても埋設管からの反射強度とクラッタの比は変わらないのでGPR波形に変化は現れません。つまり深く見えるようにはならないのです。一方、GPRでは計測対象は地下にあり動くことはありません。同一地点で繰り返し同じ波形を送信し、受信波を平均化(スタッキング)することでランダムに発生するノイズを抑圧しS/N(信号/雑音)比を向上できます。GPRは微弱な電波でもS/N比の高いデータが取得できます。これに加え、アンテナに近いとアンテナから放射された電波が空中より地面に吸い込まれる現象が見られます(佐藤, 2022)。これはGPRにとっては非常に好ましい特性であり、空中に漏洩する電波は送信電波のうちごく微量です。電波法には「微弱無線局」という規定があり、放射電磁界強度が弱い場合には無線局の免許の取得が必要ありません(総務省)。現状で我が国におけるGPRはこの例外規定で運用しています。しかし近い将来、制度の整備をめざす目的で物理探査学会は「地中レーダに関する最新動向調査」を実施し、総務省に技術的な協力をしています。

4. レーダ方式

送信アンテナにインパルス電圧を印加し、反射波を受けた受信アンテナの受信電圧をA/D変換器でデジタル化して記録するのがインパルスレーダです。インパルス電圧の代わりに連続した正弦波を送信に利用するレーダにはSF-CWとFM-CW方式と方式があります。次式で示

すフーリエ変換によって時間領域波形 $f(t)$ とそのスペクトル $F(\omega)$ は数学的に等価変換できます。

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \Leftrightarrow f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)e^{+j\omega t} d\omega$$

インパルスレーダは受信信号を時間領域波形として取得しますが、SF-CWレーダでは離散的な周波数を送信し、受信信号の振幅と位相を計測することで周波数スペクトル $F(\omega)$ を取得し、フーリエ逆変換によって時間領域波形 $f(t)$ を得ます。この方法はベクトルネットワークアナライザ(VNA)と同じです。VNAは小型化、低廉化が進み大学の研究室レベルでも利用できるようになっていますが、計測速度が遅いため現場計測の利用には注意が必要です。VNAを利用したGPR装置でデータ取得の密度が粗くレーダプロファイルが不完全な例を多く見たことがあります。

図4は東北大学が開発したGPR装置(X-Yakumo)です(佐藤、斎藤, 2022)。図3のクロス・ポータアンテナを送受信4対装備し、全ての送受信アンテナ間のレーダ波形16個を一度に計測するMIMO (Multiple Input Multiple Output) 型のレーダです。送信機にデジタルシンセサイザを利用したSF-CW方式で、Pinダイオードスイッチで送受信アンテナならびに偏波を切り替え、検波回路の出力をAD変換器で取り込みPCで記録します。

FM-CWレーダは地震探査で利用されるチャープ信号と同じであり一般のレーダではよく使われる方式ですが、地中レーダでは周波数帯域が広いいため使用例はあまりありません。



図4 GPR装置の構成例(東北大学X-Yakumo)

5. 埋設管検知への応用

地中レーダの最も一般的な応用である埋設管検知の事例を紹介します。東北大学川内キャンパスで老朽化した水道管を更新する工事が行われましたが、設計図面と違う位置に埋設管のあるケースが多く見られました。そこで工事前に試掘で埋設管の位置を確認することになりましたが、私たちは、それに先立ちGPRによる位置確認を



図5 東北大学構内の埋設管更新工事現場

提案し、工事業者の皆さんと現場を回った結果ほぼすべての位置で埋設管を見つけました。GPRで検知した埋設管の位置は非常に正確で、試掘工事の効率を上げることができました。

図5はこうした埋設管の一例で、新たに铸铁管が埋設されました。埋設後のGPR計測結果を図6に示します。電波速度を $0.08[m/ns]$ とし、時間を深度に換算しています。深度80cm付近に埋設管からの反射波が典型的な双曲線カーブとして見えます。この波形にマイグレーション処理を施し正しい地下構造の形状に再構成したのが図7です。双曲線が一点に収束して画像化されています。

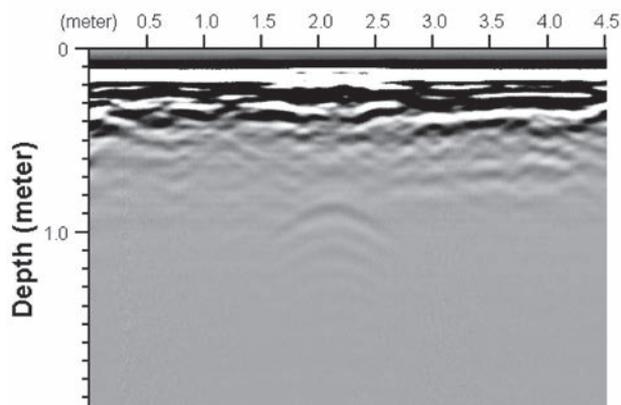


図6 埋設管を計測したGPRプロフィール

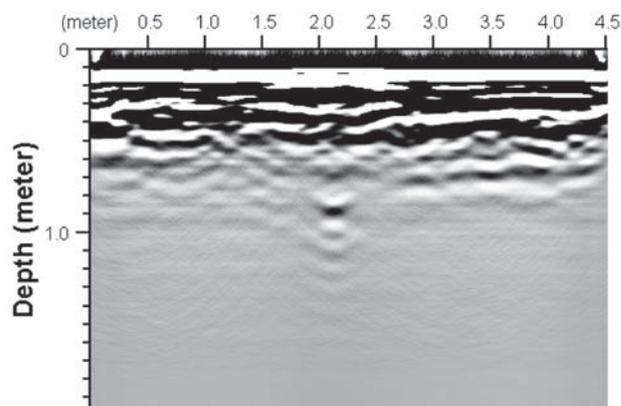


図7 図6にマイグレーション処理を行った結果

6. おわりに

GPR装置の中身を見る機会はありませんが、意外とシンプルな構成です。しかしその設計には電磁気学に基づく複雑な理論が利用されています。アンテナと送受信波形は電磁界散乱現象を理解することでより多くの情報を得ることができます。レーダ波形は単なる画像ではなく物理情報を豊富に含んでいます。

【参考文献】

総務省電波利用ホームページ 微弱無線局 <https://www.tele.soumu.go.jp/j/ref/material/rule/>
 佐藤 源之, 齋藤 龍真(2022):フルポーラリティ計測可能な 地中レーダ装置の開発、信学技報 122(3, AP2022-1)
 物理探査学会(2022):地中レーダに関する最新動向調査
 佐藤 源之(2022):、地中レーダ(GPR)アンテナの電磁界的考察と計測法の提案 電子情報通信学会論文誌 J105-B,11巻
 大内和夫編著(2017)「レーダの基礎」9章地中レーダ(佐藤源之)コロナ社

物理探査ニュース 2022 ハイライト 2023年(令和5年)1月発行

編集・発行 公益社団法人物理探査学会
 〒101-0031 東京都千代田区東神田1-5-6 東神田MK第5ビル2F
 TEL: 03-6804-7500 FAX: 03-5829-8050
 E-mail: office@segj.org.jp
 ホームページ: <http://www.segj.org>

著作権について

本ニュースの著作権は、原則として公益社団法人物理探査学会にあります。本ニュースに掲載された記事を複製したい方は、学会事務局にお問い合わせ下さい。なお、記事の著者が転載する場合は、事前に学会事務局に通知いただければ自由にご利用いただけます。