

カーボンニュートラルの達成に不可欠！ CO₂ 地中貯留の連続モニタリングに向け超小型震源装置の開発

1. 発表者：

辻 健（東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻 教授）
辻 修平（研究当時：九州大学 大学院工学研究院 地球資源システム工学 学術研究員）
木下 順二（九州大学 大学院工学研究院 技術専門員）
池田 達紀（九州大学 大学院工学研究院 地球資源システム工学 助教）
Ahmad Ahmad（九州大学 大学院工学研究院 地球資源システム工学 博士課程）

2. 発表のポイント：

- ◆ 4cm のモータを用いた超小型震源装置を開発し、装置からの振動（モニタリング信号）を約 1km 伝達させることに成功しました。
- ◆ 震源装置の小型化実現により、多数の装置の定常的設置が可能となり、連続的に地中貯留した CO₂ をモニタリングできるようになり、安全な操業につながります。
- ◆ 今回開発した超小型震源装置を用いることで、モニタリングコストを大幅に低減できる可能性があります。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の辻健教授らの研究グループは、cm スケールの超小型震源装置を開発し、連続的に CO₂ 貯留層をモニタリングするシステムを構築しました。超小型震源装置は、その振動エネルギーは微弱でも、連続的に信号（振動）を発振し、それらを足し合わせることで信号のエネルギーを増大させ、信号を遠地まで伝達させることができます。震源部に 4cm のモータを用いた場合には、1 km 程度離れた地点にもモニタリング信号が伝達することがわかりました。つまり、CO₂ を貯留する地層（深度 1 km 程度）をモニタリングできると考えられます。これまでのモニタリングでは大きさ数 m の大型震源装置が利用されてきましたが、連続的に貯留 CO₂ をモニタリングすることはコストの面で現実的ではありませんでした。

今回開発した超小型震源装置を定常的に設置すれば、連続的かつ安価に CO₂ 貯留層をモニタリングでき、CO₂ の漏洩につながるような急な CO₂ の移動も検出できると考えられます。

本研究成果は、2022 年 9 月 14 日（米国東部夏時間）に米国地震学会の「Seismological Research Letters」に掲載されました。

4. 発表内容：

CO₂ 地中貯留は、地層に CO₂ を貯留し、大気中への CO₂ の排出を削減するプロジェクトです（図 1）。国際エネルギー機関（IEA）は、地球の気温上昇を 1.5 度以内に抑えるために、CO₂ 回収・貯留（CCS）で約 15% の CO₂ を削減する必要があるとしています。しかしこの IEA のシナリオを実現するためには、世界中の約 6000 箇所で大規模な CO₂ の地中貯留を行う必要があります。日本もこの CO₂ 地中貯留により、2050 年までに 1.2~2.4 億トンもの CO₂ を減らそうとしています。これを実現するためには、240 本~480 本の井戸を掘削して、CO₂ を地層に圧入する必要があります。つまり日本にも CO₂ 貯留サイトが分布するようになるかもしれません。その際、複数の CO₂ 貯留サイトをモニタリングして CO₂ の漏洩や地震を防止し、安全を担保する必要があります。これまで一般的に用いられてきたモニタリング手法では大型の震源

装置を利用し（図 2 a）、1 回のモニタリング調査に 1 億円単位のコストが必要でした。そのため、モニタリング調査を繰り返し実施し、貯留 CO₂ の挙動を連続的に捉えることは困難で、急な CO₂ の漏洩などに対応できない恐れがありました。そこで既存のモニタリングシステムに加えて、連続的に CO₂ の挙動をモニタリングする手法の開発が求められていました。

本研究グループが開発した小型震源装置では、振動エネルギーは小さいものの、周波数変調させた波を連続的に発振し、それを重合することで信号（振動）を遠地まで伝達させることができます。当初は約 10kg の偏心オモリを用いた震源装置を開発しました（図 2b）。その震源装置の信号の伝達距離を測定したところ、震源装置から水平距離 80km の地点にも信号が伝達していることが明らかとなりました。つまり約 10kg の偏心オモリを用いた震源装置では、貯留した CO₂ をモニタリングするにはエネルギーが強すぎることになります。

そこで本研究では、直径 4cm のモータで約 10g の偏心オモリを回転させる超小型震源装置を開発しました（図 2c、3）。この装置を、Portable Active Seismic Source（PASS）と呼んでいます。PASS で発信した波形を地震計や光ファイバー型の地震計（Distributed Acoustic Sensing：DAS）で記録したところ、4cm の小型モータを搭載した PASS でも水平方向に約 1 km も信号が伝播することが明らかとなりました（図 4）。また 3 ヶ月間の連続運転を実施したところ、地盤の時間変化をモニタリングすることにも成功しました。

PASS は超小型で低コストであるため、CO₂ 貯留サイトに多数の PASS を定常的に設置することができます。また PASS は低電圧（12V バッテリー）でも駆動することができ、アクセスの悪い場所にも設置できます。それにより、空間解像度の高いモニタリングを連続的に実施することができ、急な CO₂ の動き（漏洩など）を捉えることができるようになると考えられます。さらに震源装置を地中に埋めることもできるため、風雨などの地表の影響（ノイズ）を低減させることが可能です。なお 4cm のモータでは振動エネルギーが十分でない場合には、モータと偏心オモリのサイズを大きくして、エネルギーを強くすることもできます。また、さまざまな発振機構を有する PASS を開発しており、CO₂ を貯留する地層の状態に応じて使い分けることもできます。

現在は、超小型震源装置 PASS を汎用化させる取り組みを行なっています。複数の民間会社（JX 石油開発株式会社、石油資源開発株式会社など）とも、PASS の CO₂ 地中貯留での利用に向けた共同研究を実施しています。今後、本格的に実施される予定の CCS プロジェクトで、PASS を利用した連続モニタリングシステムを構築することを目指しています。

さらに超小型震源装置 PASS は CO₂ 地中貯留だけでなく、地熱開発、石油・天然ガスなどのエネルギー資源でのモニタリングや、堤防やトンネルなどの土木建造物のモニタリングにも利用することができます（図 5）。近年、課題となっているトンネル工事の崩落の危険モニタリングにも利用できると考えられます。震源装置が小型化したことで、ドローンに PASS を搭載した探査やモニタリングも可能になりました。また PASS があれば、月や火星などの宇宙環境でも比較的容易に地震探査を実施でき、地下の構造や物性を調べることができるため、PASS の宇宙化に向けた共同研究も実施しています。

謝辞

本研究は、科研費「人工建造物の振動を利用した超高密度震源による地震探査とモニタリング手法の開発（課題番号：20H01997）」の支援により実施されました。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Seismological Research Letters」（オンライン版：9月14日）

論文タイトル：4 cm portable active 1 seismic source (PASS) for meter- to kilometer-scale imaging and monitoring of subsurface structures

著者：Takeshi Tsuji*, Suhei Tsuji, Junji Kinoshita, Tatsunori Ikeda, Ahmad B. Ahmad

DOI 番号：10.1785/0220220049

アブストラクト URL：<https://doi.org/10.1785/0220220049>

6. 問い合わせ先：

<研究に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻

教授 辻 健（つじ たけし）

<報道に関すること>

東京大学 大学院工学系研究科 広報室

九州大学 広報室

7. 添付資料：

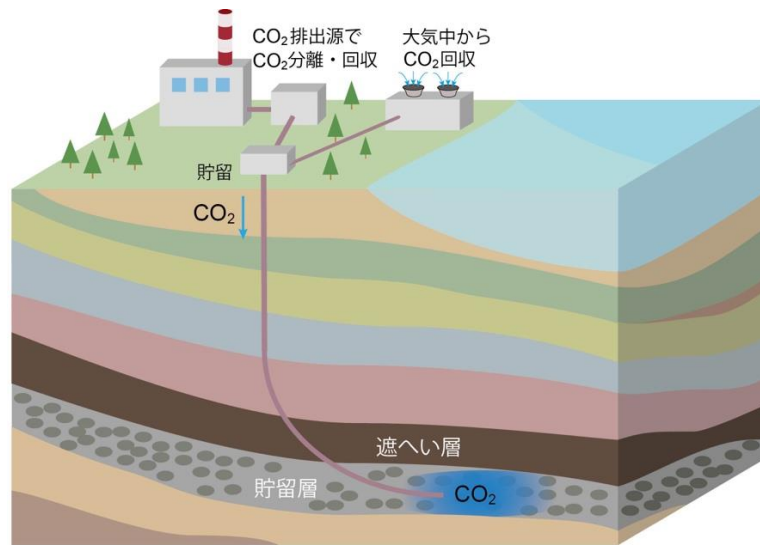


図 1. CO₂ 地中貯留の概略図。

一般的な地下構造探査に利用されている震源装置

a

m スケール

強いエネルギーで、移動しながら発振することで高い空間解像度ではあるが、不連続的なモニタリングになる

↓ 連続したモニタリングに向けた試み

震源装置 m スケール

b

2019年

約 10kg の偏心オモリを利用
約 80km まで信号が伝達

今回の研究で開発した
超小型震源装置 cm スケール

c

約 10g の偏心オモリを利用
約 1km まで信号が伝達

→ 小型化

図 2. (a) これまで一般的に利用されている m スケールの震源装置（バイブロサイス；地球科学総合研究所）と、(b) 過去の研究で開発した m スケールの震源装置、(c) 今回開発した cm スケールの超小型震源装置（PASS）。

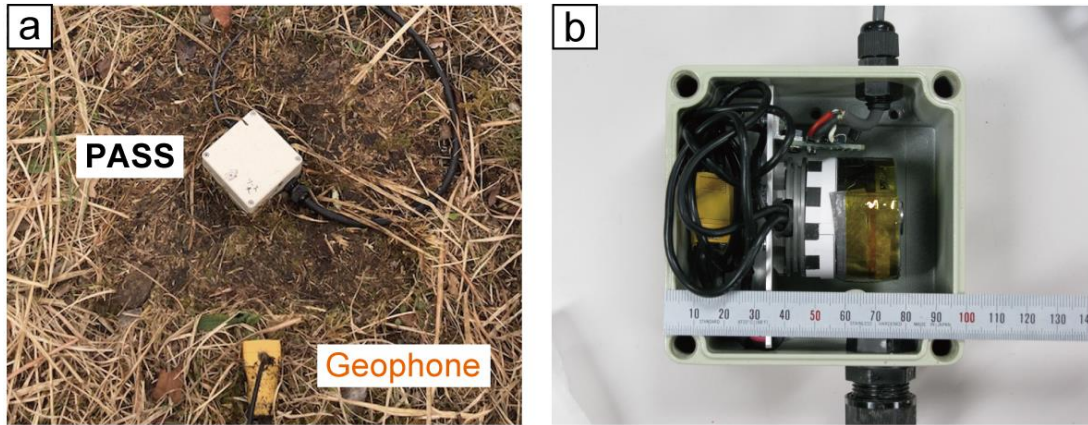


図3. 超小型震源装置 PASS の写真。(a) 外部の写真、(b) 内部の写真。

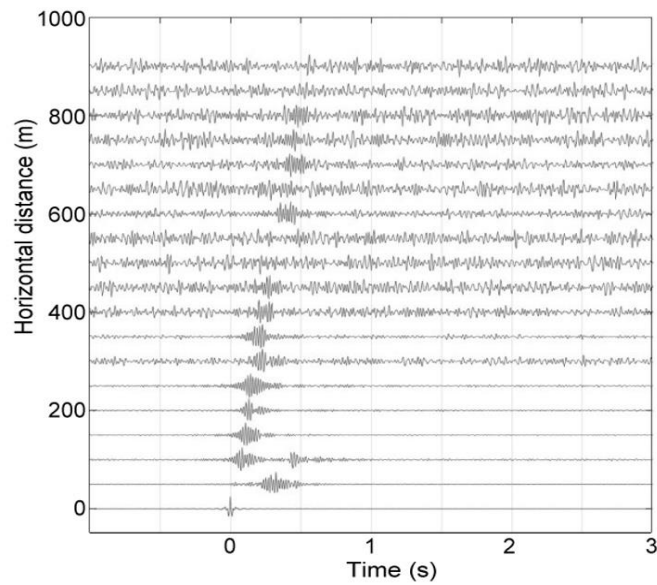


図4. 超小型震源装置 PASS で発振した信号を記録した結果。横軸は発振してからの時間、縦軸は PASS と地震計の距離。

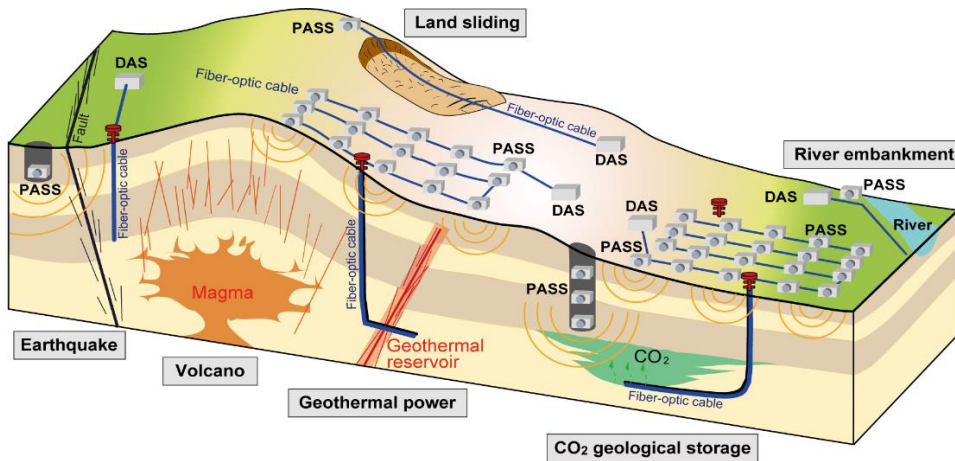


図5. 超小型震源装置 PASS を利用したモニタリングの概要図。CO₂ 地中貯留だけでなく、さまざまな対象に利用できる。