

令和 4 年 5 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K05012

研究課題名（和文）定量的サイスミックエミッショントモグラフィの基礎研究

研究課題名（英文）Fundamental research on quantitative seismic emission tomography

研究代表者

三ヶ田 均（Mikada, Hitoshi）

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：10239197

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：地熱地帯や地下の流体資源貯留層近傍において、地表で受動的に観測される地動には地下の流体運動に起因する極めて微小な地震動が含まれている。その振動を利用する受動的探査により、その地下の流体移動の場所や移動方向についての調査が可能であることが確認された。地下に流体運動の想定される場所において、平面的な稠密な観測点配置による受動的観測を実施し、地表の地動ノイズレベルに応じた期間の記録に、地震波干渉法を適用する。流動方向などのパラメータ推定には、全波形逆解析法およびモーメントテンソル解析を適用する。水圧破砕法適用時を含め、受動的観測による地下の地下流体運動推定に役立つ定量的探査手法になると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通常の地下の可視化技術として用いられている地震学的、あるいは電磁気学的探査手法においては、自然電位測定以外、地下の流体運動を直接扱うことはできない。本研究の意図した新しい技術開発により、地下において流体の性質やその挙動を実時間で把握することが可能であることが証明された。この技術を実用化できれば、例えば音聴調査の対象となる地下の配管からの水漏れ、資源工学分野における石油や天然ガス開発の増進回収法の適用や地熱開発における地下の熱水挙動の解明などへの有効利用を期待できる。

研究成果の概要（英文）：Passive geophone monitoring observes a microtremor on the surface, including minor seismic motions caused by subsurface fluid movement in geothermal areas and above subsurface reservoirs of natural fluid resources. We confirmed that passive seismic explorations using the microtremor could investigate the location and direction of subsurface fluid movement. We suggest applying the passive seismic observations with a densely arranged geophone array to cover a subsurface region where fluid motion is expected. The method could locate the subsurface fluid movement using seismic interferometry. We need to acquire the seismic record for the long term corresponding to the noise level of the surface microtremor. Full waveform inversion and moment tensor analysis could estimate parameters such as flow direction. We expect the method to be useful for quantitative exploration for estimating subsurface fluid motion by passive seismic observation, including the application of hydraulic fracturing.

研究分野：探査地震学

キーワード：受動的地震観測 貯留層モニタリング 全波形インバージョン 流体運動 モーメントテンソル解析

1. 研究開始当初の背景

地熱地帯や生産中の石油・天然ガス田のある地域など、地下の流体運動が生じている場所の地震観測では、古来より地動ノイズ振幅が大きいという事実が知られていた。こうした雑微動はこれまで雑音ノイズと考えられ、地震探査や地震観測時の大きな障壁として認識されていた。しかし、近年、コスト削減や地下の状況の時間変化を把握するため、人工震源を用いない受動的な地震観測や地震探査において、この雑微動の発生が地下の流体運動に起因している可能性が指摘されるようになった (例えば、資源工学分野では Gross and Eyal (2007)や Hennings et al.(2012), Erokhin et al. (2014)など)。図1は西シベリアの Lebiashe 油田において、38 点の地震計による 21 日間連続記録を処理して得られた地下の流体移動に起因し発生したと思われる地震波発生の強度分布を油層に該当する 2680m 等深面上に示している。これらの研究により、単なるノイズと考えられてきた微動には、地下の流体運動に起因する地震波信号が相当なエネルギーで重畳していることが判明した。しかしながら、現象のメカニズムについて未知であり、その利用方法や応用研究は進まない状態にあった。

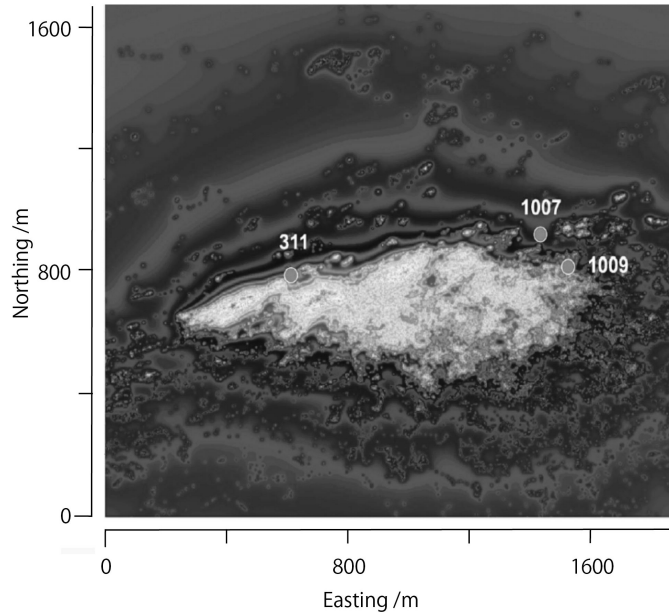


図1 Lebiashe 油田において、21 日間 38 点の地表地震計の連続記録から推定された地下 2680m における地震波発生強度分布図 (明るいほど高強度; Erokhin et al., 2014)。図中 311,1007,1009 は地表における石油生産井の位置を示す。地震波発生強度は油層中の流体運動の強度を示していると推察される。

2. 研究の目的

流体の移動と発生する地震波動を対応させることは、地下の流体移動区域を大雑把に知るための技術にすぎない。受動的に得られる地震動に流体運動に起因する地震動が含まれていることが明らかとなったことから、この現象を利用することで、「受動的に得られる地震波発生強度と地下を流動する流体流量や流速、粘性などの定量的な物理量や、透水係数や孔隙率など地下を構成する物質の状態を結びつけることができる」という仮説を立てることができる。本研究の目的は、この仮説を証明し、現在極めて困難な地下の流体運動の可視化技術の高度化、すなわち流体運動に係るパラメータである地下を流動する流体流量、流速、流体の粘性などの定量的な物理量、そして流体運動の場である地下媒質の透水係数や孔隙率など流体運動の状態を決める物理量推定法として確立することにある。

3. 研究の方法

まず、地下の流体の通路には狭窄部が存

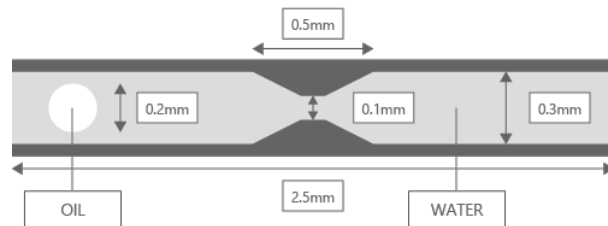


図2 狭窄部を有する浸透流路モデル。水に油滴の含まれる流体が通過することを想定している。

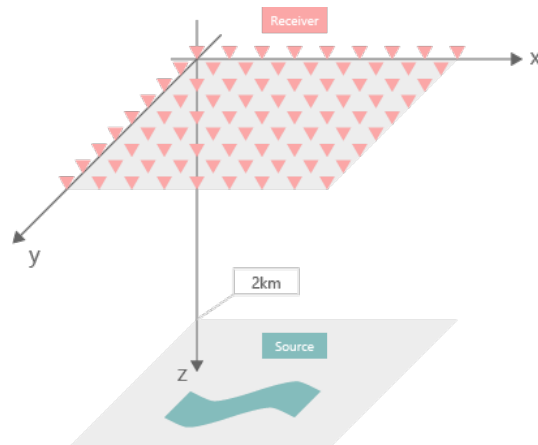


図3 三次元地下構造モデル。2km 深の撓んだ矩形領域(x 方向 1km, y 方向 200m)に図2 の狭窄部を有する浸透流路が 20 億個、ランダムな向きに配置されている。その流路をランダムな時間間隔で油滴が通過すると想定する。地表の 250m の等間隔配置された地震計 81 台で、地震観測を行う。地下を構成する媒質の P 波, S 波速度はそれぞれ 3km/sec, 1.5km/sec を仮定した。

在し、その狭窄部を通過する多相流により流体通路壁面に応力変化が発生し、地震動を発生させるというモデル (図 2) を考えた。このモデルから発生する地震動を、深度 2km のある平面領域にランダムに分布させた 20 億箇所の狭窄部からランダムに発生させ、地表 81 箇所の地震計でこの地震波を観測する (図 3)。図 2 のモデルの流路に 220Pa/10mm の圧力差を与え、y 方向全体で 22MPa の圧力差を与えている。流路を通過する流体の物理量は、水および油の密度それぞれ  $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $8.5 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ , 動粘性係数を  $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , 壁面の接触角として  $70^\circ$  を与えている。

モーメントテンソル解の推定は、Kumagai (2009)による円筒の動径方向体積変化による解を利用する。デカルト座標系の z 軸方向の円筒の体積変化によるモーメントテンソル  $\mathbf{M}(t)$  は次式で示される。

$$\mathbf{M}(t) = \frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \mu \begin{pmatrix} \frac{\lambda}{\mu} + \cos^2 \theta \cos^2 \phi + \sin^2 \phi & \sin^2 \theta \sin \phi \cos \phi & \sin \theta \cos \theta \cos \phi \\ \sin^2 \theta \sin \phi \cos \phi & \frac{\lambda}{\mu} + \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \cos^2 \phi & \sin \theta \cos \theta \sin \phi \\ \sin \theta \cos \theta \cos \phi & \sin \theta \cos \theta \sin \phi & \frac{\lambda}{\mu} + \sin^2 \theta \end{pmatrix} \Delta V_c(t)$$

ここで、 $\theta, \phi$  は  $xz$  平面上での z 軸からの偏角,  $xy$  平面上での x 軸からの偏角,  $\Delta V_c(t)$  は円筒の体積変化である。ある震源位置に関し、得られた波形の全波形逆解析を通じ、 $\theta, \phi$  を推定することで、流体の移動方向を得る。

#### 4. 研究成果

地震波干渉法を用いてその震源を推定する (図 3)。と、元の平面領域を推定可能であることを確認した。地動ノイズが存在しなければ、7 秒程度の観測で、震源領域を推定することが可能である。いくつかの S/N 比に関し、地表のある一点で得られる波形を図 4 に示す。この波形に対し

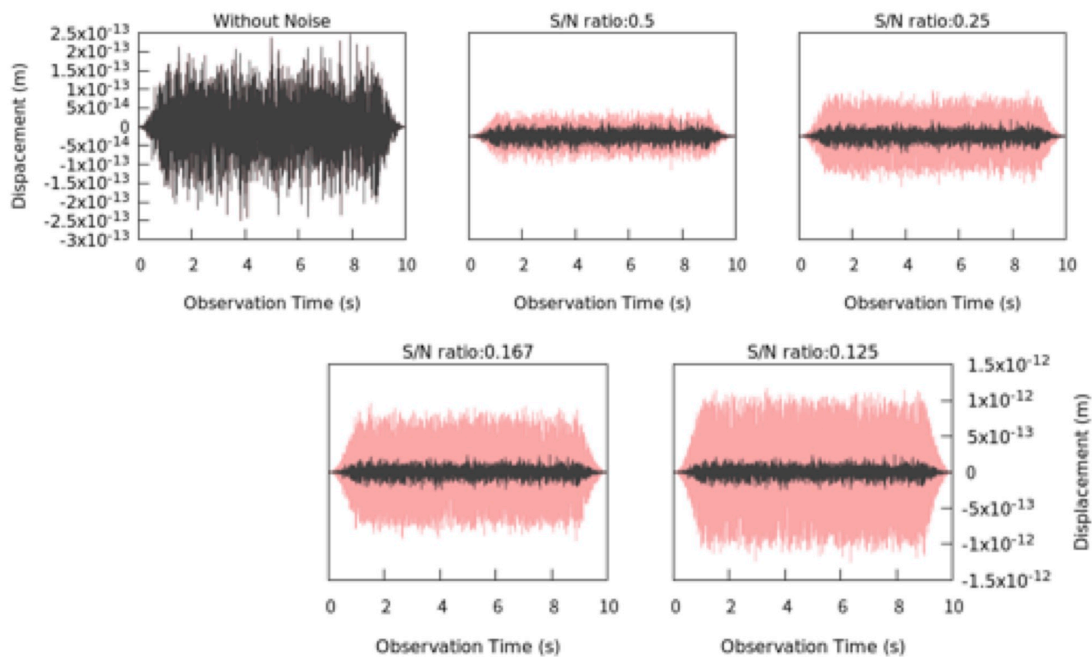


図 4 地表の1点で得られる地震波形 (黒線) および加える白色ノイズ (ピンク線)。信号よりノイズが高振幅となるケースを想定している。

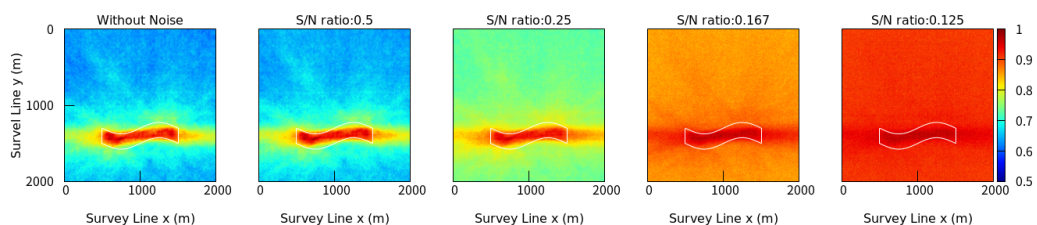


図 5 観測時間 10 秒の波形に関し地震波干渉法を適用し、逆伝播処理を行なった結果得られる地下 2km の水平面における地震波発生強度分布図。ノイズレベルの上昇とともに像が暈けること、そして観測時間を増加させる必要があることがわかる。

地震波干渉法を適用し、地下 2km の水平面に関し逆伝播法を適用すると、その水平面における地震波の発生強度を推定することができる(図 5)。図 3 の地下構造モデルで与えた地下の貯留層が、流体の運動という観点から可視化できることを示している。

一つの流路に Ricker 波形で体積変化  $\Delta V_c(t)$  を与え、全波形逆解析法を適用した際の結果を図 6 に示す。今回の全波形逆解析では時間領域の繰り返し計算を行っており、低周波側での波形解析にやや不一致が認められたが、周波数領域の計算では改善されることが知られており、ほぼ満足のできる結果を得られたと考えられる。

以上より、地下を流動する液体により地震波が発生すること、そしてその地震波を用い、液体流動箇所同定だけではなく、地震波発生強度と地下を流動する流体の流量や流速、粘性などの定量的な物理量を結びつけることができるという、当初の仮説の検証を行うことができた。今後の地下の流体資源開発など、地下における流体の運動の可視化に寄与する成果であると考えられる。

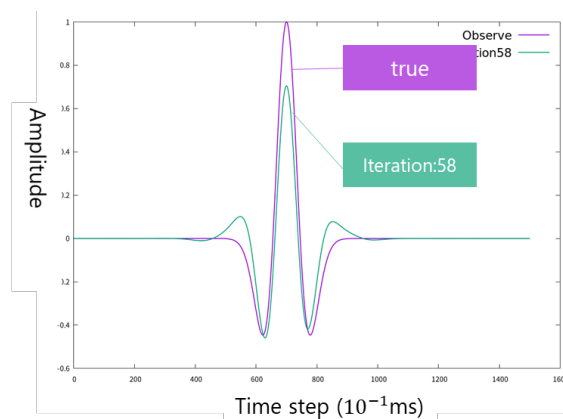


図 6 モデルに与えた  $\Delta V_c(t)$  (紫色) と全波形逆解析の結果得られた波形。低周波側でやや不一致が見られ、サイドローブの振幅がやや大きくなっていることがわかる。

#### 引用文献

- Erokhin, G.N., Baranov, V.D., Kremlev, A.N., Gapeev, D.N., Smirnov, I.I., and Rodin, S.V. (2014). Small microseismic surface acquisition system case study, 76th EAGE Conference and Exhibition-Workshops, 297-299. doi:10.3997/2214-4609.20140576
- Gross, M.R., and Eyal, Y. (2007). Throughgoing fractures in layered carbonate rocks, Geol. Soc. Am. Bull., **119** (11-12): 1387-1404. doi:10.1130/0016-7606
- Hennings, P., Allwardt, P., Paul, P., Zahm, C., Reid Jr., R., Alley, H., Kirschner, R., Lee, B., and Hough, E. (2012). Relationship between fractures, fault zones, stress, and reservoir productivity in the Suban gas field, Sumatra, Indonesia, AAPG Bulletin, **96** (4), 753-772. doi:10.1306/08161109084
- Kumagai H. (2009). Source quantification of volcano seismic signals. In Encyclopedia of complexity and systems science. Edited by: Mayers RA, Mayers RA . New York: Springer.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kayama, K., Mikada, H., and Takekawa, J.	4. 巻 69
2. 論文標題 Dispersion of flexural waves in a borehole with a tensile fracture in an anisotropic stress environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Prospecting	6. 最初と最後の頁 598-607
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/1365-2478.13071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tamura, R., Mikada, H., and Takekawa, J.	4. 巻 2020
2. 論文標題 Time-Lapse Monitoring of Variation of Pore Fluids Distribution and Reservoir Properties Using FWI in Foam-Assisted EOR	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of EAGE 2020 Annual Conference & Exhibition Online, Dec 2020	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3997/2214-4609.202011391	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwata, M., Mikada, H., and Takekawa, J.	4. 巻 43
2. 論文標題 Hydrodynamic analysis on flow accelerated corrosion of carbon steel piping with orifice structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions - Geothermal Resources Council	6. 最初と最後の頁 1093-1099
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tamura, R., Mikada, H., and Takekawa, J.	4. 巻 -
2. 論文標題 Feasibility Study of Time-Lapse Monitoring of Foam-Assisted EOR Using RTM	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 81st EAGE Conference and Exhibition	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3997/2214-4609.201900741	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Watanabe, H. Mikada and J. Takekawa	4. 巻 22
2. 論文標題 Microseismic analysis for kinematic parameters of subsurface permeable flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The 22nd International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics (RAEG 2018)	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3997/2352-8265.20140235	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計6件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Iwata, M., Mikada, H., and Takekawa, J.
2. 発表標題 Hydrodynamic analysis on flow accelerated corrosion of carbon steel piping with orifice structure
3. 学会等名 Geothermal Resources Council (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tamura, R., Mikada, H., and Takekawa, J.
2. 発表標題 Feasibility Study of Time-Lapse Monitoring of Foam-Assisted EOR Using RTM
3. 学会等名 81st EAGE Conference and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Iwata, M., Mikada, H., and Takekawa, J.
2. 発表標題 Numerical description of flow channel in pipe conduits considering solid-fluid phase shift with Lattice Boltzmann Method
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊旺智, 三ヶ田 均, 武川順一
2. 発表標題 流体流動に伴う微小地震波を利用した貯留槽内部流体性状の推定可能性の研究
3. 学会等名 一般社団法人資源・素材学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Watanabe, A., Mikada, H., Takekawa, J.
2. 発表標題 The estimation possibility of reservoir property from micro seismic wave caused by fluid flow
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mikada, H.
2. 発表標題 Micro-seismic emission due to subsurface fluid flow
3. 学会等名 Seoul National University Geophysics Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	武川 順一	京都大学・工学研究科・准教授	
	(Takekawa Junichi)		
	(70463304)	(14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------