

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22149

研究課題名（和文）スロー地震学の地下流体エネルギー開発分野への展開

研究課題名（英文）Expansion of slow slip microearthquake into the field of subsurface fluid energy utilization

研究代表者

森谷 祐一（Moriya, Hirokazu）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：60261591

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,900,000 円

研究成果の概要（和文）：Groningenガスフィールドで計測された連続波形データを対象として解析を行い、十数イベントが検出された。震源深度がおよそ3kmと浅いと考えられにも関わらず、継続時間が30秒程度のイベントが含まれていた。震源深度が3km～5km程度の場合、き裂のせん断すべりは数ms、継続時間も数秒であることが一般的であることから、本解析で検出されたイベントは、通常のAEと比べてゆっくりとせん断すべりを起こすような発生メカニズムを有していると推定された。一方、対象フィールドの速度構造が比較的低速度の層から構成されていることもあり、Q値等を考慮した詳細な検討が必要であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、地下流体エネルギー開発の分野で未知の現象とされてきた低周波地震の物理現象に正面から取り組む挑戦的な研究である。低周波イベントには明瞭なP波S波も存在せず、一般的な地震学の手法でその発生位置を探ることさえ難しい。低周波イベントの理解は、貯留層のより深い理解のみならず、新たな貯留層モニタリングの手法を確立することを意味する。従来は本分野の貯留層モニタリングは微小地震計測に頼ることが多かったが低周波イベントが、スロー地震と同様に大規模な地震の前駆現象であった場合は、本分野で問題となっている誘発地震の発生リスクの評価や予測等に用いることができる。

研究成果の概要（英文）：The seismic events, which were considered to be slow events, were detected by analyzing continuous waveform data measured in the Groningen gas field. Despite the depth of the earthquake source is thought to be around 3km-5km, events with a time duration around 30 seconds were included. When the source depth is about 3 km, the shear slip of the crack is generally several ms and the time duration of detected waveforms is several seconds general. Therefore, the event detected in this analysis seemed that the shear slip was more slowly than the normal AE. On the other hand, since the velocity structure of the field is composed of relatively low-velocity layers, it was found that detailed examination is required in consideration of such as the Q value.

研究分野：地下計測工学

キーワード：スロースリップ地震 ゆっくり滑り

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震学の分野で近年最も研究されているのがスロー地震という通常の地震よりもゆっくり断層が動く現象である。スロー地震は巨大地震の関連性が示唆されることから、JSPS 新学術研究領域「スロー地震学」として採用もされている。スロー地震はノイズに似た低周波の不明瞭な弾性波として観測される。この様な低周波イベントは、地熱開発・非在来型資源開発・二酸化炭素地下貯留等の地下流体エネルギー開発分野でも観測される事例がある。これらの分野では地下に流体を圧入し、透水性向上を図る。その際に発生する誘発微小地震がモニタリング手法や、貯留層の情報源として主に解析・研究されてきており、低周波イベントはほぼ見過ごされてきた。

自然地震分野でのスロー地震学の理解の蓄積と、誘発有感地震等の本分野の深刻な問題を受け、低周波イベントの理解を通して、さらに貯留層内現象の深い理解が必要である。しかし、貯留層内や地下開発程度の地下フィールドでは、スロースリップを起こす様なプレート境界はもちろん存在せず、いくつかの仮説(き裂の共振、間隙水圧の流動)はあるが、どの様なメカニズムとして低周波イベントが発生するかは理解されておらず、エネルギー開発工程との関連や、誘発有感地震との関連も分かっていない。

2. 研究の目的

本研究では、貯留層内で発生する低周波地震を時間周波数解析により解析し、その物理現象の解明を試みる研究である。

3. 研究の方法

本研究で対象とする微小地震は、オランダ Groningen ガスフィールドで 2017 年 12 月 ~ 2018 年 1 月に観測された微小地震である。図 1 に観測点配置を示す。データは、各坑井内の 4 つの深度に設置された微小地震計で得られたもので 200Hz のサンプリング周波数で連続的記録された信号である。本研究では波形の 2 乗値を求め、その最大値とエンベロープ(図 2)に着目することでスロー地震の検出を試みた。ここでは、1-5Hz の帯域を通過するフィルターで前処理を行った連続信号につ

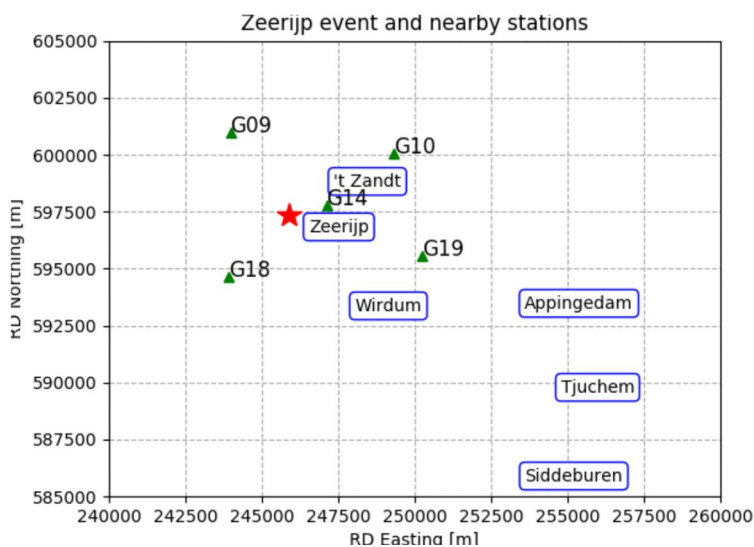
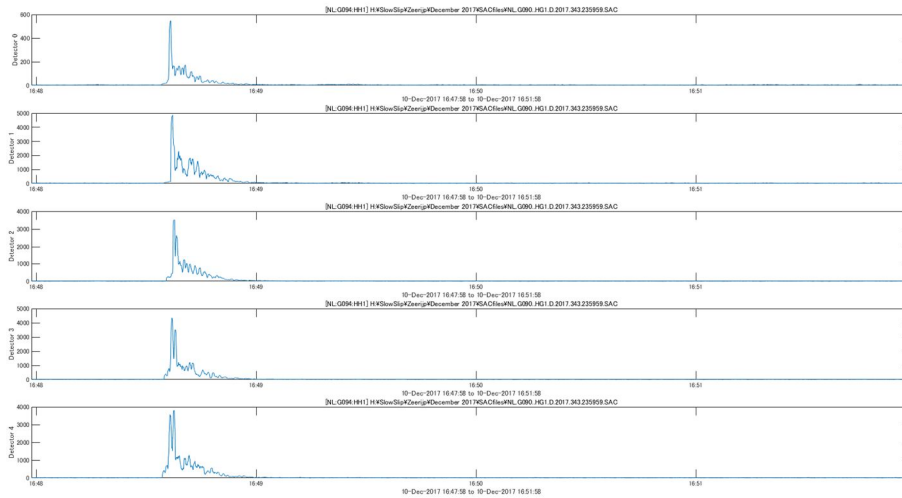
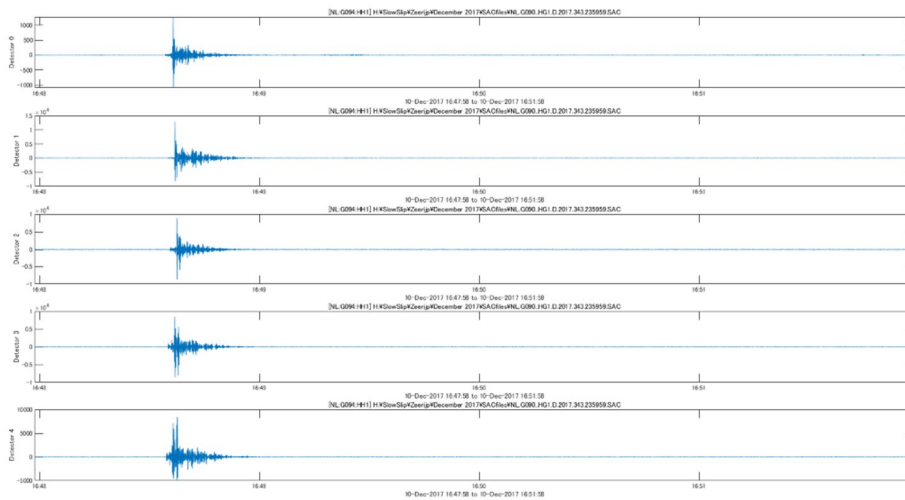


図 1: Groningen ガスフィールドの観測点配置。

いて、0.4 秒の移動時間窓を用いて波形の 2 乗値を計算し、1s の時間窓による移動平均値を行うことにより波形のエンベロープを求め、最大値が閾値を超えるイベントを自動解析により検出した。また、観測データの時間周波数分布を解析することにより周波数成分の時間変化を解析した。波形検出では、位相限定相関関数を用いた波形検出法と自動分類法についても検討した。自動検出されたイベントについては個々に目視で観察し、イベントが、深部に設置したセンサーに最初に到来していることを確認し、地表からのノイズ(鉄道や自動車によると考えられる信号)との区別をした。センサーは坑井内の複数の深度に設置されており、地下より到来したイベントは到来時刻が異なるため地表からのノイズと判別可能である。



(a)エンベロープ



(b)波形

図 2：検出されたイベントのエンベロープと波形例．

4．研究成果

オランダ Groningen ガスフィールドの連続取得波形データ（2017 年 12 月～2018 年 1 月）の観察を行った．イベントの検出は，包絡線の最大値が，複数の観測点であらかじめ与えた閾値を超えるような信号を検出した．図 3 に検出された波形，エンベロープ，移動時間 FFT 例を示す．また，図 4 にパワースペクトル例を示す．エンベロープを用いた方法により，約 10 のイベントが自動的に検出された．地表からの突発的な雑音（自動車や鉄道によるものと考えられる）が多いため，P 波と S 波を検出できる波形については，P 波，S 波の到来時刻を検出し，より深部に設置したセンサーでの到来時刻が早いことを目視検出し，地下で発生したイベントであることを確認した．

図 5，6 はイベントの周波数中央値と最大振幅，イベントエネルギーとの関係を示している．また，図 7，8 は周波数中央値の異なるイベントを示している．観測された波形の時間-周波数分布ならびにパワースペクトルをみると，信号のエネルギーは 8～32Hz で卓越している．イベントエネルギー（信号の 2 乗平均値）は，大きくなるほど中心周波数は低くなる傾向があり，これは，せん断すべり継続時間が長い，すなわちせん断すべりによる破壊面積がより大きいほどコーナー周波数が低周波になるという現象によるものと考えられる．周波数中央値の異なるイベント

を比較すると、周波数中央値の比較的高いイベントでは、P波振幅が相対的に大きくなっており、そのコーダ波のためにS波の到来が不明確になっている。このようなイベントは、マグマのような流体が地下き裂中を貫入していくような際に観測されることが知られているが、今回観測されたこのようなイベントは、継続時間は30s程度であり他のイベントとほぼ同じであることからせん断すべりに起因するイベントであり、せん断すべり面の方向に起因してP波振幅が相対的に大きくなっていると考えられる。

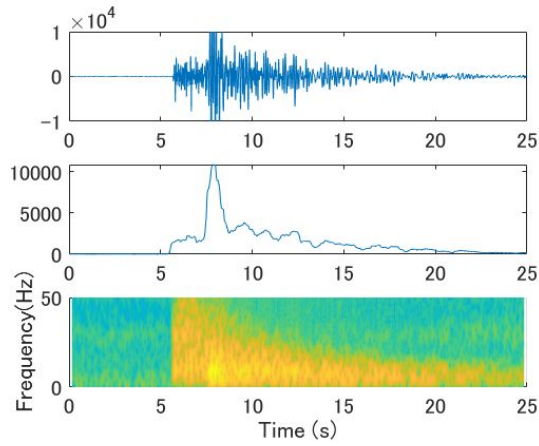


図3：検出された波形，RMS 信号，移動時間窓 FFT

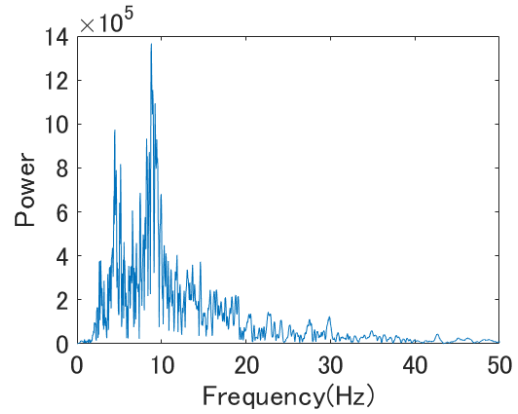


図4：パワースペクトル

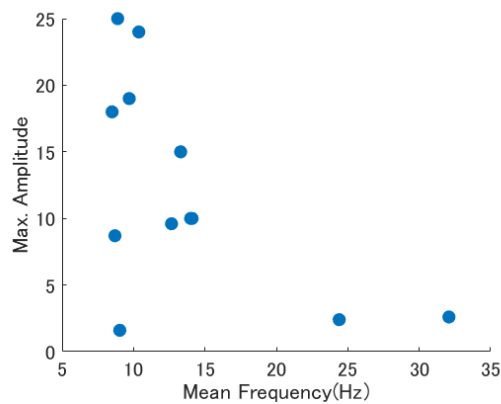


図5：周波数中央値と最大振幅の関係

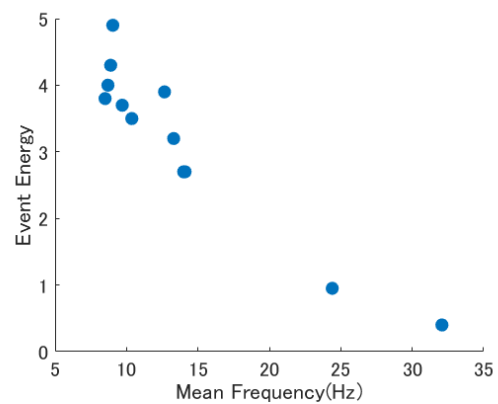


図6：周波数中央値とイベントエネルギー

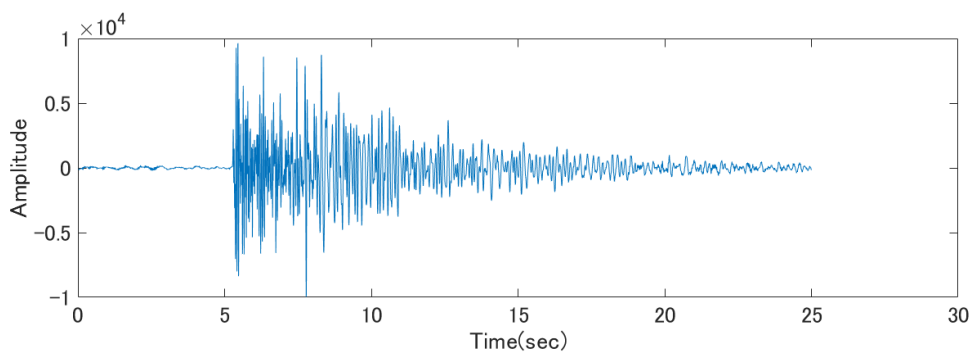


図7：周波数中央値が12.7Hzのイベント。

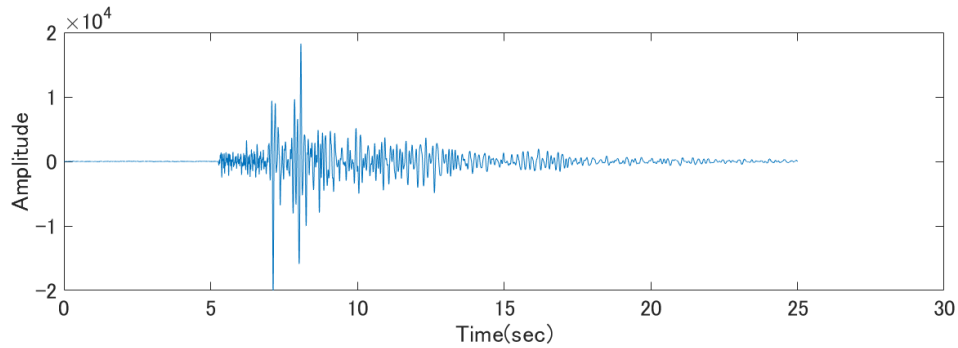


図 8 : 周波数中央値が 8.5Hz のイベント .

センサーの特性が評価できていないためコーナー周波数を正確に検出することは困難であったが、ハスケルの断層モデルを仮定し、イベントの周波数中央値をコーナー周波数に置き換えてせん断すべり時間を推定すると 0.1~0.03s 程度となる。本フィールドのようにイベントが比較的浅部で発生する場合、せん断すべり時間は数 ms~数十 ms 程度であると考えられることから、比較すると長い継続時間となる。これより、検出されたイベントのうち周波数中央値の低いイベントは、スロースリップイベントであるとも推定される。一方、検出されたイベントの P 波と S 波の到来時刻差を観察すると 1.5~2.5 秒であった。地殻内で一般的な弾性波速度を与えると、震源距離は 10~20km となり、ガス貯留層が分布する位置と考えられる震源距離(3km~5km)と大きな差が生じる。このため本フィールドの弾性波速度は、地殻内で一般的な弾性波速度と比べると 1/3 程度の低速度であると推測される。波動伝搬層が低速度の場合、その周波数特性は、カットオフ周波数が比較的低いローパスフィルター特性を有している可能性がある。検出されたイベントがスロースリップイベントである可能性について詳細な議論をするには、伝搬媒質の Q 値を考慮して検討する必要がある。

以上のように本研究では、スロースリップイベントと思われるイベントが複数観測された。一方、対象フィールドの速度構造が複雑であり、観測された信号が伝搬媒質の周波数特性に強い影響を受けている可能性があるため、物理現象をより詳細に検討するには Q 値を考慮した解析が必要であることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Moriya Hirokazu	4. 巻 14
2. 論文標題 Identification of Similar Seismic Waves Using the Phase-Only Correlation Function and Wavelet Transform	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 4527 ~ 4527
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en14154527	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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	椋平 祐輔 (Mukuhira Yusuke) (60723799)	東北大学・流体科学研究所・助教 (11301)	

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