

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2014-500961  
(P2014-500961A)

(43) 公表日 平成26年1月16日(2014.1.16)

|                         |               |             |
|-------------------------|---------------|-------------|
| (51) Int.Cl.            | F I           | テーマコード (参考) |
| GO 1 V 1/40 (2006.01)   | GO 1 V 1/40   | 2 G 1 0 5   |
| E 2 1 C 39/00 (2006.01) | E 2 1 C 39/00 |             |

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 82 頁)

(21) 出願番号 特願2013-538849 (P2013-538849)  
 (86) (22) 出願日 平成23年11月9日 (2011.11.9)  
 (85) 翻訳文提出日 平成25年7月9日 (2013.7.9)  
 (86) 国際出願番号 PCT/US2011/059967  
 (87) 国際公開番号 W02012/064839  
 (87) 国際公開日 平成24年5月18日 (2012.5.18)  
 (31) 優先権主張番号 61/413, 173  
 (32) 優先日 平成22年11月12日 (2010.11.12)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 510316464  
 シェブロン ユー. エス. エー. インコー  
 ポレイテッド  
 Chevron U. S. A. Inc.  
 アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94  
 583, サンラモン, ボリンガー キャニ  
 オン ロード 6001  
 6001 Bollinger Cany  
 on Road San Ramon, C  
 alifornia 94583, Uni  
 ted States of Ameri  
 ca

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 岩石層の地盤特性を調査するシステム及び方法

(57) 【要約】

ボアホール外部の岩石層を調査する方法及びシステムが提供される。当該方法は、第1の音響源によって第1の周波数の第1の音響波を生成すること、及び、第2の音響源によって第2の周波数の第2の音響波を生成すること、を含む。当該第1及び第2の音響源は、ボアホール内の局所的な領域内に配置される。当該第1及び第2の音響波は、ボアホール外部の交差領域において交差する。当該方法はさらに、第3の周波数の第3の音響波をボアホール内に配置された受信機で受信する。当該第3のせん断音響波は、上記交差領域内の非線形混合領域における非線形混合処理によりボアホール内に戻ってくる。当該第3の周波数は、前記第1の周波数と第2の周波数との差に等しい。

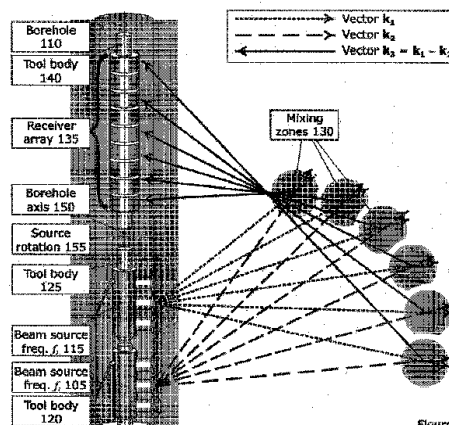


Figure 1

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

ボアホール外部の岩石層の情報を調査するシステムであって、  
第 1 の周波数を有する第 1 の音響圧縮波を生成するように構成された第 1 の音響源と、  
第 2 の周波数を有する第 2 の音響圧縮波を生成するように構成された第 2 の音響源と、  
を備え、  
当該第 1 及び第 2 の音響源は、前記ボアホール内の局所的な領域内に配置され、前記第  
1 及び第 2 の音響波は、前記ボアホール外部の交差領域において交差し、  
前記ボアホール内に配置され、

さらに第 3 の周波数を有する第 3 の音響波を受信する受信機を備え、

前記第 3 のせん断音響波は、前記交差領域内の非線形混合ゾーンにおける非線形混合処  
理によりボアホール内に帰還し、前記第 3 の周波数は、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周  
波数との差に等しい、

システム。

## 【請求項 2】

前記第 1 の音響圧縮波及び前記第 2 の音響圧縮波は音響ビームである、請求項 1 に記載  
のシステム。

## 【請求項 3】

前記第 1 の音響源、前記第 2 の音響源又はその両方は、トランスデューサの線形アレイ  
を備えるように構成される、請求項 1 に記載のシステム。

## 【請求項 4】

前記受信機は、前記ボアホールの壁部に固定されるように構成される、請求項 1 に記載  
のシステム。

## 【請求項 5】

前記第 1 の周波数における前記第 1 の音響波、前記第 2 の周波数における前記第 2 の音  
響波、又はその両方を方位角及び仰角について所定の方向において走査する、請求項 1 に  
記載のシステム。

## 【請求項 6】

コンピュータ読み取り可能な命令を処理するように構成されたプロセッサをさらに備え  
、当該命令は、実行時に、前記プロセッサに、前記帰還する第 3 の音響波を分析させ、非  
線形相互作用が前記ボアホール内での帰還エネルギーとなった場合に、前記岩石層内の前  
記混合領域の位置を決定させる、請求項 1 に記載のシステム。

## 【請求項 7】

前記第 1 の音響源の軸は、前記第 2 の音響源の軸に対して傾斜している、請求項 1 に記  
載のシステム。

## 【請求項 8】

前記第 2 の周波数の前記第 1 の周波数に対する比は、前記非線形混合ゾーンにおける前  
記非線形混合処理の混合係数を最大化するように選択される、請求項 1 に記載のシステム  
。

## 【請求項 9】

時間変動属性又は周波数変動属性又はその両方で、前記第 1 の音響波、前記第 2 の音響  
波、又はその両方を符号化するように構成されたエンコーダをさらに備える、請求項 1 に  
記載のシステム。

## 【請求項 10】

前記受信した第 3 のせん断音響波に対応するデータを記録するように構成された記憶装  
置と、コンピュータ読み取り可能な命令を処理するように構成されたプロセッサと、をさ  
らに備え、

前記命令は、実行されたときに、前記プロセッサに、周波数比と収束角との関係を支配  
する選択規則に従って圧縮速度対せん断速度比を推定させ、又は、前記記憶装置の前記記  
録データを用い、さらに、前記第 1 の周波数の前記第 1 の音響波の生成、前記第 2 の周波

10

20

30

40

50

数の前記第 2 の音響波の生成、前記ボアホールへ帰還する前記第 3 の音響波の受信、及び前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源の配置及び前記第 1 の音響源と前記第 2 の音響源の複数の方向に基づく前記交差領域の位置の特定を繰り返すことにより、前記ボアホール周囲の前記岩石層の非線形特性を推定させる、

請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 1 1】

前記受信した第 3 のせん断音響波に対応するデータを記録するように構成された記憶装置と、コンピュータ読み取り可能な命令を処理するように構成されたプロセッサと、をさらに備え、

前記命令は、実行されたときに、前記プロセッサに、前記記憶装置の前記記録データを用い、さらに、前記第 1 の周波数の前記第 1 の音響波の生成、前記第 2 の周波数の前記第 2 の音響波の生成、前記ボアホールへ帰還する前記第 3 の音響波の受信、及び前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源の配置及び前記第 1 の音響源と前記第 2 の音響源の複数の方向に基づく前記交差領域の位置の特定を繰り返すことにより、岩石層の非線形特性の 3 次元画像又は圧縮波速度対せん断波速度比の 3 次元画像を計算させる、

請求項 1 に記載のシステム。

【請求項 1 2】

ボアホール外部の岩石層の情報を調査する方法であって、

第 1 の音響源によって第 1 の周波数を有する第 1 の圧縮波を生成する工程と、

第 2 の音響源によって第 2 の周波数を有する第 2 の圧縮波を生成する工程と、

を備え、

当該第 1 及び第 2 の音響源は、前記ボアホール内の局所的な領域内に配置され、前記第 1 及び第 2 の音響波は、前記ボアホール外部の交差領域において交差し、

さらに第 3 の周波数の第 3 のせん断音響波を受信する工程を備え、

前記第 3 のせん断音響波は、前記交差領域内の非線形混合ゾーンにおける非線形混合処理によりボアホール内の受信機に帰還し、前記第 3 の周波数は、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との差に等しい、

方法。

【請求項 1 3】

前記第 1 の圧縮波を生成する工程及び前記第 2 の圧縮波を生成する工程は、第 1 の音響ビーム及び第 2 の音響ビームを生成する、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 1 4】

前記第 1 の音響源、前記第 2 の音響源又はその両方を、トランスデューサの線形アレイとして配置する工程さらに備える、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 1 5】

前記受信機を前記ボアホールの壁部に固定する機構をさらに備え、前記受信機は 3 成分受信機アレイを含む、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 1 6】

前記第 1 の周波数の前記音響波、前記第 2 の周波数の前記第 2 の音響波、又はその両方を、方位角、仰角、又はその両方において向きを調整することにより、所定の方向において走査する工程をさらに備える、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 1 7】

前記帰還エネルギーを分析する工程と、非線形相互作用が前記ボアホール内で前記帰還する第 3 の音響波となった場合に、前記岩石層の前記混合領域の位置を決定する工程と、をさらに備える、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 1 8】

前記第 1 の音響源の軸方向を、前記第 2 の音響源の軸方向に対して傾斜するように配置する工程をさらに含む、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 1 9】

エンコーダを用いて、時間変動属性又は周波数変動属性又はその両方で、前記第 1 の音

10

20

30

40

50

響波、前記第 2 の音響波、又はその両方を符号化する工程をさらに備える、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 2 0】

前記混合ゾーンの位置を、前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源の配置及び前記帰還エネルギーの方向に基づいて計算する工程をさらに備える、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 2 1】

複数の方向において前記第 1 の音響波及び前記第 2 の音響波の生成及び受信を繰り返すことにより、圧縮速度対せん断速度比、前記ポアホール周辺の岩石層の非線形特性、又はその両方を推定する工程をさらに備える、請求項 2 0 に記載の方法。

【請求項 2 2】

前記非線形混合ゾーンにおける前記非線形混合処理の混合係数を決定する工程と、前記混合係数を最大化するために、前記第 2 の周波数と前記第 1 の周波数との比を選択する工程と、をさらに備える、請求項 1 2 に記載の方法。

【請求項 2 3】

音響信号源からのコード化信号を用いてポアホール外部の岩石層の情報を調査するシステムであって、

時系列として配列された第 1 の複数のパルスを用意する第 1 の音響信号を生成するように構成された第 1 の音響源であって、前記第 1 の複数のパルスは時間的に分離されており、各パルスは中心周波数での第 1 の変調信号を用意し、2 つの連続するパルスの中心周波数は異なっている、第 1 の音響源と、

時系列として配列された第 2 の複数のパルスを用意する第 2 の音響信号を生成するように構成された第 2 の音響源であって、前記第 2 の複数のパルスは時間的に分離されており、2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第 1 の複数のパルスにおける 2 つの対応するパルスの中央間の時間間隔と同様であり、開始時刻差は前記第 2 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻と前記第 1 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻との間で提供され、各パルスは第 2 の変調信号を用意すると共に前記第 2 の複数のパルスにおける各パルス内の前記第 2 の変調信号の中心周波数は前記第 1 の複数のパルスにおける対応するパルスに対する前記第 1 の変調信号の前記中心周波数の選択された分数である、第 2 の音響源と、

を備え、

前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源は、前記ポアホール内に配置されており、前記第 1 及び第 2 の音響信号の軌跡が前記ポアホールの外部にある交差領域において交差するように制御可能であり、

前記ポアホール内に配置された受信機であって、前記ポアホールに帰還する帰還信号を検出するように構成され、前記受信信号は、前記非線形交差領域内の非線形混合領域において、前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号を含む、受信機と、

雑音、線形相互作用プロセスにより生成される信号、又はその両方から抽出するように、前記非線形混合プロセスによって生成された前記信号に対してデータ処理を行うように構成されたプロセッサと、

をさらに備える、

システム。

【請求項 2 4】

前記複数のパルスにおける 2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔が各パルスの継続時間よりも大きい、請求項 2 3 に記載のシステム。

【請求項 2 5】

前記プロセッサは、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を、波形認識法を用いて抽出するように構成される、請求項 2 3 に記載のシステム。

【請求項 2 6】

前記プロセッサは、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を、前記非線形混

10

20

30

40

50

合プロセスが起こる前記領域における非線形混合の選択規則に従って、前記非線形信号の予測特性に基づいて、バンドパスフィルタを用いて抽出する、請求項 2 3 に記載のシステム。

【請求項 2 7】

前記プロセッサは、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を、前記非線形混合プロセスが起こる前記領域における非線形混合の選択規則に従って、前記信号の予測特性に従って設計されるテンプレート信号を用いて前記検出信号を相関処理することにより抽出する、請求項 2 3 に記載のシステム。

【請求項 2 8】

前記非線形混合プロセスによって生成される前記信号は、時系列に構成され時系列に到達する第 3 の複数のパルスを備え、2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第 1 の複数のパルスにおける 2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔と同様であり、

前記第 3 の複数のパルスの各パルスは、前記第 1 の複数のパルス及び前記第 2 の複数のパルスのうちの対応する各パルスにおいて、前記第 1 の中心周波数と前記第 2 の中心周波数との差に等しい第 3 の中心周波数を有する第 3 の変調信号を含み、

前記第 3 の複数のパルスの各パルスの前記受信器における到達時刻は、前記第 1 の音響源から前記混合領域の中央までの前記伝播時間及び前記混合領域の前記中央から前記受信器までの前記伝播時間の合計によって前記第 1 の複数のパルスの対応するパルスの生成に対して遅延した時刻である、

請求項 2 3 に記載のシステム。

【請求項 2 9】

前記プロセッサは、

複数の混合ゾーンにおいて生成された信号を得るための開始時刻差の範囲及び周波数分数  $d$  の範囲に対し、前記第 1 の信号の生成及び前記第 2 の信号の生成を繰り返すように前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源を制御し、

前記ボアホールに帰還した前記受信信号の検出を繰り返すとともに、雑音、線形相互作用プロセスによって生成された信号、又はその両方から、前記非線形混合プロセスによって生成された前記信号を抽出するように当該受信信号に対するデータ処理を繰り返すように前記受信機を制御する、

請求項 2 3 に記載のシステム。

【請求項 3 0】

前記混合ゾーンにおける非線形相互作用により生成される前記信号は、前記第 2 の音響源の第 2 の複数のパルスと前記第 1 の音響源の第 1 の複数のパルスとの間の開始時間差が前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と前記第 2 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間との伝播時間差に等しい場合にのみ生成され検出される、請求項 2 3 に記載のシステム。

【請求項 3 1】

雑音若しくは線形相互作用プロセスによって生成された信号又はこれらの両方からの非線形混合プロセスによって生成された前記信号の識別性を向上させるために、前記第 1 の複数のパルスの数を増加させ、前記第 2 の複数のパルスの数を増加させる、請求項 2 3 に記載のシステム。

【請求項 3 2】

前記第 1 の信号は、複数のパルスの和を含み、各パルスは包絡線関数と変調信号関数との積に等しい信号振幅を有する、請求項 2 3 に記載のシステム。

【請求項 3 3】

前記第 1 の信号  $u_1(t)$  は以下の形式であり、

【数 2 0】

$$u_1(t) = \sum_n E1_n(t - T_n) * \exp(i2\pi * f_n * (t - T_n)) * \exp(i\zeta_n)$$

10

20

30

40

50

ここで、

$E_{1n}(t - T_n)$  は、前記第 1 の複数のパルスのうち  $n$  番目のパルスの正又は負の振幅を有する包絡線に対応し、

$\exp(i 2 \pi * f_n * (t - T_n))$  は、前記第 1 の複数のパルスのうち  $n$  番目のパルスにおける前記第 1 の変調信号に対応し、

$f_n$  は、前記  $n$  番目のパルスにおける前記変調信号の中心周波数であり、

$t$  は、信号時間であり、

$T_n$  は、前記  $n$  番目のパルスが生成される時間であり、

$\phi_n$  は各パルス  $n$  の位相であり、 $\exp(i \phi_n)$  は各パルス  $n$  の位相期間である、

請求項 2 3 記載のシステム。

10

【請求項 3 4】

前記第 2 の信号は、複数のパルスの和を含み、各パルスは包絡線関数と変調信号関数との積に等しい信号振幅を有する、請求項 2 3 に記載のシステム。

【請求項 3 5】

前記第 2 の信号  $u_2(t - \delta)$  は以下の形式であり、

【数 2 1】

$$u_2(t - \delta) = \sum_n E_{2n}(t - (T_n + \delta)) * \exp(i 2 \pi * d * f_n * (t - (T_n + \delta))) * \exp(i \zeta_n)$$

ここで、

20

$E_{2n}(t - (T_n + \delta))$  は、前記第 2 の複数のパルスのうち  $n$  番目のパルスの包絡線に対応し、

$\exp(i 2 \pi * d * f_n * (t - (T_n + \delta)))$  は、前記第 2 の複数のパルスのうち  $n$  番目のパルスにおける前記第 2 の変調信号に対応し、

$d * f_n$  は、前記第 2 の複数のパルスの中の前記  $n$  番目のパルスの前記変調信号の周波数であり、

$d$  は、選択された周波数比であり、

$t$  は、信号時間であり、

$(T_n + \delta)$  は、前記第 3 2 複数のパルスにおける  $n$  番目のパルスがブロードキャストされる時間であり、

30

$\delta$  は、前記第 2 の音響源のブロードキャストの開始時間と前記第 1 の音響源のブロードキャストの開始時間との差であり、

$\phi_n$  は各パルス  $n$  の位相であり、 $\exp(i \phi_n)$  は各パルス  $n$  の位相期間である、

請求項 2 3 に記載のシステム。

【請求項 3 6】

非線形混合プロセスにより生成される前記信号は、第 3 の複数のパルスの数にわたって、各パルスの包絡線関数と各パルスについての変調信号関数との積を合計したものに比例する、請求項 2 3 に記載のシステム。

【請求項 3 7】

非線形混合プロセスによって生成される前記信号  $u_3(t)$  は以下の形式であり、

40

【数 2 2】

$$u_3(t) \propto \sum_n E_{3n}(t - (T_n + T)) * \exp(i 2 \pi * (1 - d) * f_n * (t - (T_n + T))) * \exp(i \zeta_n)$$

ここで、

$E_{3n}(t - (T_n + T))$  は、前記第 1 の信号及び前記第 2 の信号の非線形混合によって生成される前記信号  $u_3$  の第 3 の複数のパルスの包絡線であり、

$\exp(i 2 \pi * (1 - d) * f_n * (t - (T_n + T)))$  は、前記第 3 の複数のパルスの中の  $n$  番目のパルスにおける前記第 3 の変調信号に対応し、

$(1 - d) * f_n$  は、前記第 1 の複数のパルスの  $n$  番目のパルス内の前記第 1 の変調信

50

号の中心周波数  $f_n$  及び前記第 2 の複数のパルスの  $n$  番目のパルス内の前記第 2 の変調信号の中心周波数  $d * f_n$  間の差異である前記第 3 の複数のパルスにおける  $n$  番目のパルス内の前記変調信号の周波数であり、

$d$  は、選択された周波数比であり、

$t$  は、信号時間であり、

$(T_n + T)$  は、前記第 3 の複数のパルスにおける  $n$  番目のパルスが前記受信機に到達する時間であり、

$T$  は、前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と当該混合ゾーンから前記受信機までの伝播時間との合計の伝播時間であり、

$n$  は各パルス  $n$  の位相であり、 $\exp(i \cdot n)$  は各パルス  $n$  の位相期間である、

請求項 23 に記載のシステム。

【請求項 38】

前記プロセッサは、前記非線形混合プロセスにより生成された信号を、前記検出信号をテンプレート信号で相関処理することにより抽出し、前記テンプレート信号は、複数のパルスの和を含み、各パルスは包絡線関数と変調信号関数との積に等しい信号振幅を有する、請求項 23 に記載のシステム。

【請求項 39】

前記プロセッサは、前記非線形混合プロセスにより生成された信号を、前記検出信号をテンプレート信号で相関処理することにより抽出し、前記テンプレート  $u_s$  は、以下の形式であり、

【数 23】

$$u_s(t) = \sum_n W_n(t - T_n) * \exp(i2\pi * g(f_n) * (t - T_n)) * \exp(i\zeta_n)$$

ここで、

$W_n(t - T_n)$  は前記テンプレート信号における  $n$  番目のパルスの振幅包絡線であり、

$\exp(i2\pi * g(f_n) * (t - T_n))$  は、前記テンプレート信号の複数のパルスのうち  $n$  番目の変調信号に対応し、

$g(f_n)$  は前記テンプレートの前記複数のパルスにおける  $n$  番目のパルス内の前記変調信号の選択された関数であり、

$t$  は伝播時間であり、

$T_n$  は前記複数のパルスにおける  $n$  番目のパルスが前記受信器に到達するとシミュレートされた時間であり、

$n$  は各パルス  $n$  の位相であり、 $\exp(i \cdot n)$  は各パルス  $n$  の位相期間である、

請求項 23 に記載のシステム。

【請求項 40】

前記プロセッサが、

前記非線形混合プロセスによって生成された信号を、音響波の非線形相互作用の選択規則に従って、前記信号の予測特性に従って設計されるテンプレート信号を用いて前記検出信号を相関処理することにより抽出し、

前記第 2 の複数のパルス及び前記第 1 の複数のパルス間の複数の開始時刻差  $\tau$  に対し、及び、前記第 2 の複数のパルスにおける各パルス内の前記変調信号の前記中心周波数及び前記第 1 の複数のパルスにおける対応する各パルス内の前記変調信号の前記中心周波数間の複数の周波数比  $d$  に対し、各開始時刻差  $\tau$  及び各周波数比  $d$  に対して、前記テンプレート信号と前記検出信号との間の相関処理を繰り返して、各開始時間差  $\tau$  及び各周波数比  $d$  について非線形相互作用信号を含む相関処理信号  $M(t, \tau, d)$  を生成する、

ように構成された、請求項 23 に記載のシステム。

【請求項 41】

前記プロセッサは、前記信号  $M(t, \tau, d)$  内で、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\tau$ 、及び

10

20

30

40

50

周波数比  $d$  の全ての値を検索し、前記非線形混合プロセスによって生成された信号の発生に対応する相関処理された帯域制限スパイク信号の存在に関し、到着時間  $T_{NL}$ 、開始時間差  $\Delta t_{NL}$ 、及び周波数比  $d_{NL}$  を決定する、請求項 40 に記載のシステム。

【請求項 42】

前記非線形プロセスによって生成される帯域制限スパイク信号が前記相関処理信号  $M(t, \Delta t, d)$  内で発生する場合に、前記決定された開始時間差  $\Delta t_{NL}$  は、前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と前記第 2 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間との差に実質的に等しい、請求項 41 に記載のシステム。

【請求項 43】

前記非線形プロセスによって生成される帯域制限スパイク信号が前記相関処理信号  $M(t, \Delta t, d)$  内で発生する場合に、前記決定された到着時間  $T_{NL}$  は、前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と当該混合ゾーンの中心から受信機までの伝播時間との合計の伝播時間に実質的に等しい、請求項 41 に記載のシステム。

10

【請求項 44】

ポアホール外部の岩石層の情報を調査する方法であって、

時系列として配列された第 1 の複数のパルスを備える第 1 の音響信号を第 1 の音響源によって生成し、前記第 1 の複数のパルスは時間的に分離されており、各パルスは中心周波数での第 1 の変調信号を備え、2 つの連続するパルスの中心周波数は異なっており、

時系列として配列された第 2 の複数のパルスを備える第 2 の音響信号を第 2 の音響源によって生成し、前記第 2 の複数のパルスは時間的に隔たれており、2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第 1 の複数のパルスにおける 2 つの対応するパルスの中央間の時間間隔と同様であり、開始時刻差は前記第 2 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻と前記第 1 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻との間で提供され、各パルスは変調信号を備えると共に前記第 2 の複数のパルスにおける各パルス内の前記変調信号の中心周波数は前記第 1 の複数のパルスにおける対応するパルスに対する前記変調信号の前記中心周波数の選択された分数  $d$  であり、前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源は、前記ポアホール内に配置されており、前記第 1 及び第 2 の音響信号の軌跡が前記ポアホールの外部にある交差領域において交差するように制御可能であり、

20

前記ポアホール内に配置された受信機によって、前記ポアホールに帰還する検出信号を受信し、当該検出信号は、前記非線形交差領域内の非線形混合領域において、前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号を含み、

30

プロセッサによって、前記受信信号に対するデータ処理を行い、雑音、線形相互作用プロセスにより生成される信号、又はその両方から、前記非線形混合プロセスによって生成された前記信号を抽出する、

方法。

【請求項 45】

前記第 1 の音響信号の生成は、前記第 1 の複数のパルスにおける 2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔が各パルスの継続時間よりも大きくなるように前記第 1 の音響信号を生成することを含む、請求項 44 に記載の方法。

40

【請求項 46】

前記プロセッサによって、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を、波形認識法を用いて抽出する、請求項 44 に記載の方法。

【請求項 47】

前記プロセッサによって、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を、前記非線形混合プロセスが起こる前記領域における非線形混合の選択規則に従って、前記非線形信号の予測特性に基づいて、バンドパスフィルタを用いて抽出する、請求項 44 に記載の方法。

【請求項 48】

前記プロセッサによって、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を、前記非

50



線形混合プロセスが起こる前記領域における非線形混合の選択規則に従って、前記信号の予測特性に従って設計されるテンプレート信号を用いて前記検出信号を相関処理することにより抽出する、請求項 4 4 に記載の方法。

【請求項 4 9】

前記非線形混合プロセスによって生成される前記信号は、時系列に配置された時間的に分離された第 3 の複数のパルスを備え、2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第 4 4 の複数のパルスにおける 2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔と同様であり、

前記第 3 の複数のパルスの各パルスは、前記第 1 の複数のパルス及び前記第 2 の複数のパルスのうちの対応する各パルスにおいて、前記第 1 の中心周波数と前記第 2 の中心周波数との差に等しい第 3 の中心周波数を有する第 3 の変調信号を含み、

前記第 3 の複数のパルスの各パルスの前記受信器における到達時刻は、前記第 1 の音響源から前記混合領域の中央までの前記伝播時間及び前記混合領域の前記中央から前記受信器までの前記伝播時間の合計によって前記第 1 の複数のパルスの対応するパルスの生成に対して遅延した時刻である、請求項 4 4 に記載の方法。

【請求項 5 0】

前記帰還信号の前記受信機による検出を繰り返すために、前記第 1 の信号の生成工程及び前記第 2 の信号の生成を繰り返し、複数の混合ゾーンにおいて生成された信号を得るために開始時刻差の範囲及び周波数分数  $d$  の範囲に対し、雑音、線形相互作用プロセスによって生成された信号、又はその両方にわたって前記非線形混合プロセスによって生成された前記信号を抽出するために、前記受信信号のデータ処理の実行を繰り返す、請求項 4 4 に記載の方法。

【請求項 5 1】

前記混合ゾーンにおける非線形相互作用により生成される前記信号を、前記第 2 の音響源の第 2 の複数のパルスと前記第 1 の音響源の第 1 の複数のパルスとの間の開始時間差が前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と前記第 2 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間との伝播時間差に等しい場合にのみ検出する、請求項 4 4 に記載の方法。

【請求項 5 2】

ノイズ若しくは線形相互作用プロセスによって生成された信号又はこれらの両方からの非線形混合プロセスによって生成された前記信号の識別性を向上させるために、更に、前記第 1 の複数のパルスの数を増加させ、前記第 2 の複数のパルスの数を増加させる請求項 4 4 に記載の方法。

【請求項 5 3】

前記第 1 の信号の生成は、複数のパルスの和である第 1 の信号を生成することを含み、各パルスは包絡線関数及び変調信号関数の積に等しい信号振幅を有する、請求項 4 4 に記載の方法。

【請求項 5 4】

前記第 1 の信号の生成は、以下の形式の第 1 の信号  $u_1(t)$  を生成することを含む。

【数 2 4】

$$u_1(t) = \sum_n E1_n(t - T_n) * \exp(i2\pi * f_n * (t - T_n)) * \exp(i\zeta_n)$$

ここで、

$E1_n(t - T_n)$  は、前記第 1 の複数のパルスのうち  $n$  番目のパルスの正又は負の振幅を有する包絡線に対応し、

$\exp(i2\pi * f_n * (t - T_n))$  は、前記第 1 の複数のパルスのうち  $n$  番目のパルスにおける前記第 1 の変調信号に対応し、

$f_n$  は、前記  $n$  番目のパルスにおける前記変調信号の中心周波数であり、

$t$  は、信号時間であり、

$T_n$  は、前記  $n$  番目のパルスが生成される時間であり、

10

20

30

40

50

$n$  は各パルス  $n$  の位相であり、 $\exp(i \zeta_n)$  は各パルス  $n$  の位相期間である、請求項 4 4 に記載の方法。

【請求項 5 5】

前記第 2 の信号の生成は、複数のパルスの和である第 2 の信号を生成することを含み、各パルスは包絡線関数及び変調信号関数の積に等しい信号振幅を有する、請求項 4 4 に記載の方法。

【請求項 5 6】

前記第 2 の信号の生成は、以下の形式の第 2 の信号  $u_2(t - \delta)$  を生成することを含み、

【数 2 5】

$$u_2(t - \delta) = \sum_n E2_n(t - (T_n + \delta)) \cdot \exp(i2\pi \cdot d \cdot f_n \cdot (t - (T_n + \delta))) \cdot \exp(i\zeta_n)$$

10

ここで、

$E2_n(t - (T_n + \delta))$  は、前記第 2 の複数のパルスのうち  $n$  番目のパルスの包絡線に対応し、

$\exp(i2\pi \cdot d \cdot f_n \cdot (t - (T_n + \delta)))$  は、前記第 2 の複数のパルスのうち  $n$  番目のパルスにおける前記第 2 の変調信号に対応し、

$d \cdot f_n$  は、前記第 2 の複数のパルスのうちの前記  $n$  番目のパルスの前記変調信号の周波数であり、

20

$d$  は、選択された周波数比であり、

$t$  は、信号時間であり、

$(T_n + \delta)$  は、前記第 3 2 複数のパルスにおける  $n$  番目のパルスがブロードキャストされる時間であり、

$\delta$  は、前記第 2 の音響源のブロードキャストの開始時間と前記第 1 の音響源のブロードキャストの開始時間との差であり、

$n$  は各パルス  $n$  の位相であり、 $\exp(i \zeta_n)$  は各パルス  $n$  の位相期間である、請求項 4 4 に記載の方法。

【請求項 5 7】

前記非線形混合プロセスによって生成される前記信号は、複数のパルスの和を含み、各パルスは包絡線関数と変調信号関数との積に等しい信号振幅を有する、請求項 4 4 に記載の方法。

30

【請求項 5 8】

非線形混合プロセスによって生成される前記信号  $u_3(t)$  は以下の形式であり、

【数 2 6】

$$u_3(t) \propto \sum_n E3_n(t - (T_n + T)) \cdot \exp(i2\pi \cdot (1 - d) \cdot f_n \cdot (t - (T_n + T))) \cdot \exp(i\zeta_n)$$

ここで、

$E3_n(t - (T_n + T))$  は、前記第 1 の信号及び前記第 2 の信号の非線形混合によって生成される前記信号  $u_3$  の第 3 の複数のパルスの包絡線であり、

40

$\exp(i2\pi \cdot (1 - d) \cdot f_n \cdot (t - (T_n + T)))$  は、前記第 3 の複数のパルスのうち  $n$  番目のパルスにおける前記第 3 の変調信号に対応し、

$(1 - d) \cdot f_n$  は、前記第 1 の複数のパルスの  $n$  番目のパルス内の前記第 1 の変調信号の中心周波数  $f_n$  及び前記第 2 の複数のパルスの  $n$  番目のパルス内の前記第 2 の変調信号の中心周波数  $d \cdot f_n$  間の差異である前記第 3 の複数のパルスにおける  $n$  番目のパルス内の前記変調信号の周波数であり、

$d$  は、選択された周波数比であり、

$t$  は、信号時間であり、

$(T_n + T)$  は、前記第 3 の複数のパルスにおける  $n$  番目のパルスが前記受信器に到達

50

するときの時間であり、

T は、前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と当該混合ゾーンから前記受信機までの伝播時間との合計の伝播時間であり、

n は各パルス n の位相であり、 $\exp(i \phi_n)$  は各パルス n の位相期間である、請求項 44 に記載の方法。

【請求項 59】

前記プロセッサによって、前記非線形混合プロセスによって生成される前記信号を、前記検出信号をテンプレート信号で相関処理することにより抽出し、前記テンプレート信号は、複数のパルスの和を含み、各パルスは包絡線関数と変調信号関数との積に等しい信号振幅を有する、請求項 44 に記載の方法。

10

【請求項 60】

前記プロセッサによって、前記非線形混合プロセスにより生成された信号を、前記検出信号をテンプレート信号で相関処理することにより抽出する工程をさらに備え、前記テンプレート  $u_s$  は、以下の形式であり、

【数 27】

$$u_s(t) = \sum_n W_n(t - T_n) \cdot \exp(i 2\pi \cdot g(f_n) \cdot (t - T_n)) \cdot \exp(i \zeta_n)$$

ここで、

ここで、 $W_n(t - T_n)$  は前記テンプレート信号における n 番目のパルスの振幅包絡線であり、

20

$\exp(i 2\pi \cdot g(f_n) \cdot (t - T_n))$  は、前記テンプレート信号の複数のパルスのうち n 番目の変調信号に対応し、

$g(f_n)$  は前記テンプレートの前記複数のパルスにおける n 番目のパルス内の、前記変調信号の選択された関数であり、

t は伝播時間であり、

$T_n$  は前記複数のパルスにおける n 番目のパルスが前記受信器に到達することをシミュレートした時刻であり、

n は各パルス n の位相であり、 $\exp(i \phi_n)$  は各パルス n の位相期間である、請求項 44 に記載の方法。

30

【請求項 61】

前記プロセッサによって、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を、音響波の非線形相互作用の選択規則に従って、前記信号の予測特性に従って設計されるテンプレート信号を用いて前記検出信号を相関処理することにより抽出し、前記第 2 の複数のパルス及び前記第 1 の複数のパルス間の複数の開始時刻差 に対し、及び、前記第 2 の複数のパルスにおける各パルス内の前記変調信号の前記中心周波数及び前記第 1 の複数のパルスにおける対応する各パルス内の前記変調信号の前記中心周波数間の複数の周波数比 d に対し、各開始時刻差 及び各周波数比 d に対して、前記テンプレート信号と前記検出信号との間の相関処理を繰り返して、各開始時間差 及び各周波数比 d について非線形相互作用信号を含む相関処理信号  $M(t, \text{ 、 } d)$  を生成する、請求項 44 に記載の方法。

40

【請求項 62】

前記プロセッサによって、前記信号  $M(t, \text{ 、 } d)$  内で、到着時間 t、開始時間差、及び周波数比 d の全ての値を検索し、前記非線形混合プロセスによって生成された信号の発生に対応する相関処理された帯域制限スパイク信号の存在に関し、到着時間  $T_{NL}$ 、開始時間差  $\tau_{NL}$ 、及び周波数比  $d_{NL}$  を決定する、請求項 61 に記載の方法。

【請求項 63】

前記非線形プロセスによって生成される帯域制限スパイク信号が前記相関処理信号  $M(t, \text{ 、 } d)$  内で発生する場合に、前記決定された開始時間差  $\tau_{NL}$  は、前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と前記第 2 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間との差に実質的に等しい、請求項 62 に記載の方法。

50

## 【請求項 6 4】

前記非線形プロセスによって生成される帯域制限スパイク信号が前記相関処理信号 M ( t、 d ) 内で発生する場合に、前記決定された到着時間  $T_{NL}$  は、前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と当該混合ゾーンの中心から受信機までの伝播時間との合計の伝播時間に実質的に等しい、請求項 6 2 に記載の方法。

## 【請求項 6 5】

ポアホール外部の岩石層の情報を調査するシステムであって、

第 1 の周波数を有する第 1 の音響信号を生成するように構成された第 1 の音響源と、  
第 2 の周波数を有する第 2 の音響信号を生成するように構成された第 2 の音響源と、  
を備え、

10

前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源は、前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号が前記ポアホール外部の交差領域において交差し、前記第 2 の音響信号と前記第 1 の音響信号との間で開始時間の差が設けられるように、前記ポアホール内に配置及び設置され、

前記ポアホール内に配置され、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との差に等しい周波数を有する前記ポアホールへの帰還信号を受信するように構成されており、前記検出信号は、前記非線形交差領域内の非線形混合領域において、前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成される受信機と、

前記検出信号を記録し、前記検出信号を記憶装置に記憶し、また、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響源の位置、前記受信機の位置、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角を含む測定パラメータを記憶するように構成された記録システムと、

20

をさらに備えるシステム。

## 【請求項 6 6】

前記第 1 の音響信号のブロードキャストの開始時間と前記第 2 の音響信号のブロードキャストの開始時間との間の開始時間差の範囲を走査し、前記開始時間差の範囲が前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響信号とが実質的に同時に前記混合ゾーンに到達する時間差を含むようにする、請求項 6 5 に記載のシステム。

## 【請求項 6 7】

前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響信号との相互作用から得られる受信信号が逆の極性を持つように、前記第 1 の音響信号又は前記第 2 の音響信号の位相を制御するように構成されたハードウェア、ソフトウェア又はその両方をさらに備える、請求項 6 5 に記載のシステム。

30

## 【請求項 6 8】

前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響信号との相互作用から得られる逆の極性を有する信号が、雑音、線形相互作用から生じる信号、又はその両方に対して、前記非線形相互作用によって生成される信号を強化するために結合される、請求項 6 7 に記載のシステム。

## 【請求項 6 9】

前記非線形相互作用によって生成される前記検出信号の少なくとも一部が、前記第 1 の音響信号の振幅と前記第 2 の音響信号の振幅との積に比例する、請求項 6 5 に記載のシステム。

40

## 【請求項 7 0】

非線形相互作用により生成される前記信号の期待帯域の周囲に狭い周波数帯域幅を維持するために、時変周波数バンドパスフィルタを検出信号に適用する時変バンドパスフィルタ装置をさらに備え、前記狭い周波数帯域幅は、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との差の周囲で選択される、請求項 6 5 に記載のシステム。

## 【請求項 7 1】

前記第 1 の音響信号は、時系列として配列された第 1 の複数のパルスを含み、前記第 1 の複数のパルスは時間的に分離されており、各パルスは中心周波数における変調信号を含み、2 つの連続するパルスの中心周波数は異なっており、

50

前記第 2 の音響信号は、時系列として配列された第 2 の複数のパルスを含み、前記第 2 の複数のパルスは時間的に分離されており、2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第 1 の複数のパルスにおける 2 つの対応するパルスの中央間の時間間隔と同様であり、開始時刻差は前記第 2 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻と前記第 1 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻との間で提供され、各パルスは変調信号を備え、前記第 2 の複数のパルスにおける各パルス内の前記第 2 変調信号の中心周波数は前記第 1 の複数のパルスにおける対応するパルス内の前記第 1 変調信号の前記中心周波数の選択小部分 (selected fraction) であり、

前記開始時間は、前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号が前記混合領域において交差するように制御される、

10

請求項 65 に記載のシステム。

【請求項 72】

前記複数のパルスにおける 2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔が各パルスの継続時間よりも大きい、請求項 71 に記載のシステム。

【請求項 73】

前記検出信号を複数のパルスを含むテンプレート信号と相関処理するように構成されたプロセッサをさらに備え、前記複数のパルスは、時系列に配置されるとともに時間的に分離されており、2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第 1 の複数のパルスにおける 2 つの対応するパルスの中央間の時間間隔と同様であり、前記複数のパルスにおける各パルスは、前記非線形混合ゾーンにおける非線形相互作用によって生成される前記信号を含む相関信号を得るために、前記第 1 の複数のパルス及び前記第 2 の複数のパルスの対応する各々のパルス内に、前記第 1 の変調信号の中心周波数と前記第 2 の変調信号の中心周波数との差に等しい中心周波数を有する変調信号を含む、請求項 71 に記載のシステム。

20

【請求項 74】

複数の検出信号を受信するように構成された複数の受信機を備え、前記プロセッサは、多次元フィルタリング法 (multi-dimensional filtering)、反射伝播時間差分析及びスタッキング法 (time move out analysis and stacking)、又はその両方を、前記複数の受信機によって受信される前記複数の検出信号に適用するように構成される、請求項 73 に記載のシステム。

30

【請求項 75】

前記受信機は、ハイドロフォン、多成分検出器、又はその両方を備え、前記検出信号は、前記ハイドロフォンによって検出される圧両信号、前記多成分検出器によって検出される多成分信号、又はその両方を含む、請求項 73 に記載のシステム。

【請求項 76】

前記プロセッサは、前記検出信号に対するホドグラム分析を実行するように構成される、請求項 75 に記載のシステム。

【請求項 77】

前記プロセッサは、ホドグラム分析を、垂直せん断 SV 信号、水平せん断 SH 信号、及び圧縮 P 信号を含む前記 3 つの検出された成分信号に適用するように構成される、請求項 76 に記載のシステム。

40

【請求項 78】

前記プロセッサは、多次元フィルタリング、反射伝播時間差分析及びスタッキング法、又はその両方を、前記 3 つの検出器によって受信される前記 3 つの検出された成分信号に適用するように構成され、又は、多次元フィルタリング、反射伝播時間差分析及びスタッキング法、又はその両方を、前記ハイドロフォンにより検出される前記圧力信号に適用するように構成される、請求項 77 に記載のシステム。

【請求項 79】

非線形相互作用により生成される前記信号の期待帯域の周囲に狭い周波数帯域幅を維持するために、時変周波数バンドパスフィルタを検出信号に適用する時変バンドパスフィル

50

タ装置をさらに備え、前記狭い周波数帯域幅は、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との差の周りで選択される、請求項 77 に記載のシステム。

【請求項 80】

前記プロセッサは、前記第 1 の音響源、前記第 2 の音響源、前記受信機を制御し、信号対雑音比を改選するために、前記第 1 の音響信号の生成、前記第 2 の音響信号の生成、前記検出信号の受信、前記時変周波数バンドパスフィルタの適用、前記検出信号と前記テンプレート信号との相関処理、前記ホドグラム分析の適用、及び信号の前記結合を複数回繰り返すように構成される、請求項 79 に記載のシステム。

【請求項 81】

前記プロセッサは、前記開始時間差を変化させ、圧縮モード P、垂直せん断モード S V、及び水平せん断モード S Hを含む異なる伝播信号モードを分離するために、3つの検出信号の各々について、前記第 1 の音響信号の生成、前記第 2 の音響信号の生成、前記検出信号の受信、前記時変周波数バンドパスフィルタの適用、前記検出信号と前記テンプレート信号との相関処理、及び前記ホドグラム分析の適用を繰り返すように構成される、請求項 79 に記載のシステム。

10

【請求項 82】

前記プロセッサは、前記開始時間差を変化させ、前記第 1 の信号の生成、前記第 2 の信号の生成、前記検出信号の受信、前記時変周波数バンドパスフィルタの適用、及びハイドロフォンにより検出される信号の前記テンプレート信号との相関処理を複数回繰り返すように構成される、請求項 79 に記載のシステム。

20

【請求項 83】

前記プロセッサは、前記第 1 の音響源、前記第 2 の音響源、及び前記受信機を制御して、前記第 1 の音響信号の複数の方位角及び仰角、前記第 2 の音響信号の複数の方位角及び仰角、又は前記受信機の位置を走査し、また、前記第 1 音響信号の生成、前記第 2 音響信号の生成、前記検出信号の受信、前記時変周波数バンドパスフィルタの適用によるフィルタ信号の取得、及び前記成分信号を圧縮モード P、垂直せん断モード S V、及び水平せん断モード S Hを含む異なる伝播信号モードを含む異なる伝播信号モードに分離するための前記 3つの検出された成分信号に対する前記ホドグラム分析、を複数回繰り返す、ように構成される、請求項 79 に記載のシステム。

【請求項 84】

30

前記プロセッサは、複数の信号測定値を得るために、前記第 1 の音響信号のブロードキャストの開始時間と前記第 2 の音響信号のブロードキャストの開始時間との開始時間差の変更を繰り返し、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との周波数比の変更を繰り返し、また、前記第 1 の音響信号の前記複数の方位角及び仰角、前記第 2 の音響信号の前記複数の方位角及び仰角、及び前記受信機の位置の操作を繰り返すように構成される、請求項 83 に記載のシステム。

【請求項 85】

前記プロセッサと通信する記憶装置をさらに備え、前記記憶装置は、取得された複数の信号測定値を記憶するように構成される、請求項 84 に記載のシステム。

【請求項 86】

40

ポアホール外部の岩石層を調査する方法であって、

第 1 の音響源によって第 1 の周波数の第 1 の音響信号を生成し、

第 2 の音響源によって第 2 の周波数の第 2 の音響信号を生成し、

前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源は、前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号が前記ポアホール外部の交差領域において交差し、前記第 2 の音響信号と前記第 1 の音響信号との間で開始時間の差が設けられるように、前記ポアホール内に配置及び設置され、

受信機によって、前記ポアホールに帰還する検出信号を受信し、当該検出信号は、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との差に等しい周波数を有するとともに、前記非線形交差領域内の非線形混合ゾーンにおいて、前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号に基

50

づく非線形混合プロセスによって生成された信号であり、

前記検出信号を記録し、前記検出信号を記憶装置に記憶し、また、前記第1の音響源の位置、前記第2の音響源の位置、前記受信機の位置、前記第1の音響信号の仰角及び方位角、前記第2の音響信号の仰角及び方位角を含む測定パラメータを記憶する、方法。

【請求項87】

前記第1の音響信号のブロードキャストの開始時間と前記第2の音響信号のブロードキャストの開始時間との間の開始時間差の範囲を走査し、前記開始時間差の範囲が前記第1の音響信号と前記第2の音響信号とが実質的に同時に前記混合ゾーンに到達する時間差を含むようにする、請求項86に記載の方法。

【請求項88】

前記第1の音響信号と前記第2の音響信号との相互作用から得られる受信信号が逆の極性を持つように、前記第1の音響信号又は前記第2の音響信号の位相を制御する、請求項86に記載の方法。

【請求項89】

前記第1の音響信号と前記第2の音響信号との相互作用から得られる逆の極性を有する信号を、雑音、線形相互作用から生じる信号、又はその両方に対して、前記非線形相互作用によって生成される信号を強化するために結合する、請求項88に記載の方法。

【請求項90】

前記非線形相互作用によって生成される前記検出信号の少なくとも一部が、前記第1の音響信号の振幅と前記第2の音響信号の振幅との積に比例する、請求項86に記載の方法。

【請求項91】

時変バンドパスフィルタによって、非線形相互作用により生成される前記信号の期待帯域の周囲に狭い周波数帯域幅を維持するために、時変周波数バンドパスフィルタを検出信号に適用し、前記狭い周波数帯域幅は、前記第1の周波数と前記第2の周波数との差の周囲で選択される、請求項86に記載の方法。

【請求項92】

前記第1の音響信号の生成は、時系列として配列された第1の複数のパルスを生成することを含み、前記第1の複数のパルスは時間的に分離されており、各パルスは中心周波数での第1の変調信号を備え、2つの連続するパルスの中心周波数は異なっており、

前記第2の音響信号の生成は、時系列として配列された第2の複数のパルスを生成することを含み、前記第2の複数のパルスは時間的に隔たれており、2つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第1の複数のパルスにおける2つの対応するパルスの中央間の時間間隔と同様であり、開始時刻差は前記第2の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻と前記第1の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻との間で提供され、各パルスは変調信号を備えると共に前記第2の複数のパルスにおける各パルス内の前記変調信号の中心周波数は前記第1の複数のパルスにおける対応するパルスに対する前記変調信号の前記中心周波数の選択された分数dであり、

前記開始時間は、前記第1の音響信号及び前記第2の音響信号が前記混合領域において交差するように制御される、

請求項86に記載の方法。

【請求項93】

前記複数のパルスにおける2つの連続するパルスの中央間の時間間隔が各パルスの継続時間よりも大きい、請求項92に記載の方法。

【請求項94】

プロセッサによって、前記検出信号を複数のパルスを含むテンプレート信号で相関処理し、前記複数のパルスは、前記非線形混合プロセスによって生成される前記信号は、時系列に構成されるとともに時間分離されており、2つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第1の複数のパルスにおける2つの対応するパルスの中央間の時間間隔と同様であ

10

20

30

40

50

り、前記複数のパルスにおける各パルスは、前記非線形混合ゾーンにおける非線形相互作用によって生成される前記信号を含む相関信号を得るために、前記第1の複数のパルス及び前記第2の複数のパルスの対応する各々のパルス内に、前記第1の変調信号の中心周波数と前記第2の変調信号の中心周波数との差に等しい中心周波数を有する変調信号を含む、請求項92に記載の方法。

【請求項95】

複数の検出信号を複数の受信機で受信し、前記プロセッサによって、多次元フィルタリング法 (multi-dimensional filtering)、反射伝播時間差分析及びスタッキング法 (time move out analysis and stacking)、又はその両方を、前記複数の受信機によって受信される前記複数の検出信号に適用する、請求項94に記載の方法。

10

【請求項96】

ハイドロフォンによって圧力信号を検出し、又は、前記受信機の3つの検出器の各々によって多成分信号を検出する、請求項94に記載の方法。

【請求項97】

前記受信機の3つの検出器の各々の前記受信信号の3つの成分信号の各々を検出する、請求項94に記載の方法。

【請求項98】

前記プロセッサによって、ホドグラム分析を前記検出信号に対して実行する、請求項97に記載の方法。

20

【請求項99】

ホドグラム分析の実行には、ホドグラム分析を、垂直せん断SV信号、水平せん断SH信号、及び圧縮P信号を含む前記3つの検出された成分信号に適用することを含む、請求項98に記載の方法。

【請求項100】

多次元フィルタリング、反射伝播時間差分析及びスタッキング法、又はその両方を、前記3つの検出器によって受信される前記3つの検出された成分信号に適用し、又は、多次元フィルタリング、反射伝播時間差分析及びスタッキング法、又はその両方を、前記ハイドロフォンにより検出される前記圧力信号に適用する、請求項99に記載の方法。

【請求項101】

30

非線形相互作用により生成される前記信号の期待帯域の周囲に狭い周波数帯域幅を維持するために、時変周波数バンドパスフィルタを検出信号に適用し、前記狭い周波数帯域幅は、前記第1の周波数と前記第2の周波数との差の周囲で選択される、請求項99に記載の方法。

【請求項102】

信号対雑音比を改選するために、前記第1の音響信号の生成、前記第2の音響信号の生成、前記検出信号の受信、前記時変周波数バンドパスフィルタの適用、前記検出信号と前記テンプレート信号との相関処理、前記ホドグラム分析の適用、及び信号の前記結合を複数回繰り返す、請求項101に記載の方法。

【請求項103】

40

前記開始時間差を変化させ、また、圧縮モードP、垂直せん断モードSV、及び水平せん断モードSHを含む異なる伝播信号モードを分離するために、3つの検出信号の各々について、前記第1の音響信号の生成、前記第2の音響信号の生成、前記検出信号の受信、前記時変周波数バンドパスフィルタの適用、前記検出信号と前記テンプレート信号との相関処理、及び前記ホドグラム分析の適用を繰り返す、請求項101に記載の方法。

【請求項104】

前記開始時間差を変化させ、前記第1の信号の生成、前記第2の信号の生成、前記検出信号の受信、前記時変周波数バンドパスフィルタの適用、及びハイドロフォンにより検出される信号の前記テンプレート信号との相関処理を複数回繰り返す、請求項103に記載の方法。

50



## 【請求項 105】

前記第1の音響信号の複数の方位角及び仰角、前記第2の音響信号の複数の方位角及び仰角、又は前記受信機の位置を走査し、また、前記第1音響信号の生成、前記第2音響信号の生成、前記検出信号の受信、前記時変周波数バンドパスフィルタの適用によるフィルタ信号の取得、及び前記成分信号を圧縮モードP、垂直せん断モードSV、及び水平せん断モードSHを含む異なる伝播信号モードを含む異なる伝播信号モードに分離するための前記3つの検出された成分信号に対する前記ホドグラム分析、を複数回繰り返す、請求項97に記載の方法。

## 【請求項 106】

前記第1の音響信号のブロードキャストの開始時間と前記第2の音響信号のブロードキャストの開始時間との開始時間差の変更を繰り返し、前記第1の周波数と前記第2の周波数との周波数比の変更を繰り返し、また、複数の信号測定値を得るために、前記第1の音響信号の前記複数の方位角及び仰角、前記第2の音響信号の前記複数の方位角及び仰角、及び前記受信機の位置の操作を繰り返し、請求項105に記載の方法。

10

## 【請求項 107】

前記プロセッサと通信する記憶装置に前記取得された複数の信号測定値を記憶する、請求項106に記載の方法。

## 【請求項 108】

岩石層の3次元画像を生成する方法であって、

第1の音響源によって第1の音響信号を生成し、前記第1の音響信号は、時系列に配列された第1の複数のパルスを含み、前記第1の複数のパルスは時間的に分離されており、各パルスは中心周波数での変調信号を備え、2つの連続するパルスの中心周波数は異なっており、

20

第2の音響源によって第2の音響信号を生成し、当該第2の音響信号は時系列に配列された第2の複数のパルスを含み、前記第2の複数のパルスは時間的に分離されており、2つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第1の複数のパルスにおける2つの対応するパルスの中央間の時間間隔と同様であり、開始時刻差は前記第2の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻と前記第1の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻との間で提供され、各パルスは変調信号を備えると共に前記第2の複数のパルスにおける各パルス内の前記変調信号の中心周波数は前記第1の複数のパルスにおける対応するパルスに対する前記変調信号の前記中心周波数の選択された分数であり、

30

前記第1の音響源及び前記第2の音響源は、前記ポアホール内に配置されており、前記第1及び第2の音響信号の軌跡が前記ポアホールの外部にある交差領域において交差するように制御可能であり、

前記ポアホール内に配置された受信機によって、前記ポアホールに帰還する検出信号を受信し、当該検出信号は、前記非線形交差領域内の非線形混合領域において、前記第1の音響信号及び前記第2の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号を含み、

プロセッサによって、雑音、線形相互作用プロセスにより生成される信号、又はその両方から抽出するように、前記非線形混合プロセスによって生成された前記信号に対してデータ処理を行い、

40

前記非線形混合プロセスによって生成された前記信号に基づいて、圧縮速度の伝播、せん断速度の伝播、圧縮速度対せん断速度比、岩石層の非線形特性、又はこれらの2以上の任意の組み合わせの3次元画像を生成する、

方法。

## 【請求項 109】

前記第1の音響信号の生成は、前記第1の複数のパルスにおける2つの連続するパルスの中央間の時間間隔が各パルスの継続時間よりも大きくなるように前記複数のパルスを生成することを含む、請求項108に記載の方法。

## 【請求項 110】

50

前記圧縮速度の伝播、せん断速度の伝播、圧縮速度対せん断速度比、岩石層の非線形特性、又はこれらの2以上の任意の組み合わせの3次元画像の生成は、キルヒホッフ画像処理、ビーム画像処理、又は波動方程式画像処理を用いて実行される、請求項108に記載の方法。

【請求項111】

トモグラフィー速度反転法 (tomographic velocity inversion)、全波形逆解析法 (full wave form inversion)、又はトモグラフィー速度反転法と組み合わせられた反復画像法 (iterative imaging) を用いて、伝播圧縮速度の値、せん断速度の値、又はその両方を決定する、請求項110に記載の方法。

10

【請求項112】

前記圧縮速度の伝播、せん断速度の伝播、圧縮速度対せん断速度比、岩石層の非線形特性、又はこれらの2以上の任意の組み合わせの3次元画像の生成は、

ボアホール内の採掘検層及び当該ボアホールから離れた位置の岩石層特性の水平方向の連続性に関する仮定を用いて、初期伝播速度モデルを推定する工程、

前記第1の音響信号の前記第1の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算する工程、

前記第2の音響信号の前記第2の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算する工程、

受信機によって、前記混合ゾーンと前記ボアホールに帰還する検出信号を受信する受信機との間の第3の伝播時間を計算する工程であり、当該検出信号は、前記第1の周波数と前記第2の周波数との差に等しい周波数を有するとともに、前記混合ゾーン内の前記第1の音響信号及び前記第2の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号である工程、

20

前記第1の伝播時間と前記第3の伝播時間を加算することにより、前記ボアホールに帰還する信号の合計伝播時間に対応する到着時間  $T_p$  を計算するとともに、前記第1の伝播時間と前記第2の伝播時間との開始時間差  $\Delta t$  を計算する工程、

各開始時間差  $\Delta t$  及び各周波数比  $d$  について、相関処理信号  $M(t, \Delta t, d)$  を生成するために、前記受信機において受信された信号から、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を抽出する工程であって、前記信号  $M(t, \Delta t, d)$  は、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\Delta t$ 、及び周波数比  $d$  の関数であり、非線形相互作用信号を含む工程、

30

前記相関処理信号  $M(t, \Delta t, d)$  内で、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\Delta t$ 、及び周波数比  $d$  の全ての値を検索し、前記非線形混合プロセスによって生成された帯域制限スパイク信号が発生する到着時間  $T_{NL}$ 、開始時間差  $\Delta t_{NL}$ 、及び周波数比  $d_{NL}$  を決定する工程、

前記計算された到着時間  $T_p$  を測定された到着時刻  $T_{NL}$  と比較し、前記計算された開始時刻差  $\Delta t_p$  を測定された開始時刻差  $\Delta t_{NL}$  と比較する工程、

前記計算された到着時間  $T_p$  が測定された到着時刻  $T_{NL}$  と異なるか否か、及び、前記計算された開始時刻差  $\Delta t_p$  が測定された開始時刻差  $\Delta t_{NL}$  と異なるか否かを決定し、異なる場合には、前記計算された到着時刻と計算された到着時刻との差及び前記計測された開始時刻差と計算された開始時刻差に基づいて、前記伝播速度モデルを更新する工程、

40

測定された到着時間と実質的に等しい計算された到着時間又は測定された開始時間差と実質的に等しい計算された開始時間差又はその両方が得られる伝播速度  $V_p$  及び伝播速度  $V_s$  を得るために、前記第1の音響源の位置、前記第2の音響源の位置、前記受信機の位置、前記第1の音響信号の前記方位角、前記第2の音響信号の前記方位角、前記第1の音響信号の前記仰角、前記第2の音響信号の前記仰角、又はこれらの2以上の任意の組み合わせについて、前記合計伝播時間に対応する前記計算された到着時刻が測定された到着時間と実質的に等しくなるか、前記計算された開始時間差が測定された開始時間差と等しくなるか、その両方となるまで、上記工程を反復して繰り返す工程、

伝播圧縮速度、伝播せん断速度、圧縮速度対せん断速度比、非線形特性、又はこれらの2以上の任意の組み合わせの3次元画像を生成する工程、

50

の各工程を含む分析法又はマッピング法を用いて実行される、  
請求項 108 に記載の方法。

【請求項 113】

プロセッサによって、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を抽出するために前記受信信号に対するデータ処理を実行することは、前記検出信号を非線形媒体における非線形相互作用の選択規則に従って前記信号の予測特性に従って設計されるテンプレート信号と相関処理することにより、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を抽出すること、及び、前記第 2 の複数のパルスと前記第 1 の複数のパルスとの間の複数の開始時間差 について、また、前記第 2 の複数のパルスの各パルス内の前記変調信号の前記中心周波数と前記第 1 の複数のパルスの対応する各パルス内の前記変調信号の前記中心周波数との複数の周波数比  $d$  について、前記テンプレート信号と前記検出信号との相関処理を繰り返して、各開始時間差 及び各周波数比  $d$  について、非線形相互作用信号を含む相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  を生成することを含む、請求項 108 に記載の方法。

10

【請求項 114】

伝播速度モデルに基づいて、第 1 の音響源から放射される前記第 1 の音響信号及び第 2 の音響源から放射される前記第 2 の音響信号の軌道を、前記第 1 の音響源の位置、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、及び、前記第 2 の音響源の位置、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角を用いて計算する、請求項 112 に記載の方法。

【請求項 115】

前記第 1 の音響源の位置、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、及び、前記第 2 の音響源の位置、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角に基づいて、前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号が非線形性の相互作用を行う混合ゾーンの位置を決定する、請求項 114 に記載の方法。

20

【請求項 116】

前記 2 つの音響信号が非線形に相互作用する前記混合ゾーンの空間座標を計算し、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角、及び前記第 2 の音響源の位置に基づいて、前記第 1 の音響源からの前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響源からの前記第 2 の音響信号との間の収束角を計算する、請求項 115 に記載の方法。

【請求項 117】

前記相関処理信号  $M(T_{NL}, \quad, d_{NL})$  を、前記混合ゾーンにおける前記岩石層の前記非線形特性に対応する前記混合ゾーンの前記空間座標にマッピングする、請求項 116 に記載の方法。

30

【請求項 118】

周波数比  $d_{NL}$  及び前記収束角に基づき、圧縮速度とせん断速度の速度比、周波数比、及び収束角と前記混合ゾーンの前記空間座標の全比計算された速度比との選択規則の関係を用いて、前記混合ゾーンにおける前記圧縮速度と前記せん断速度との速度比を計算する、請求項 117 に記載の方法。

【請求項 119】

前記相関処理信号  $M(T_{NL}, \quad, d_{NL})$  を前記混合ゾーンの前記空間座標にマッピングすること、又は、前記計算された速度比を前記混合ゾーンの前記空間座標にマッピングすること、又はその両方を、前記第 1 の音響源の位置の値、前記第 2 の音響源の位置の値、前記受信機の位置の値、前記第 1 の音響信号の方位角の値、前記第 2 の音響信号の方位角の値、前記第 1 の音響信号の仰角の値、もしくは前記第 2 の音響信号の仰角の値、又はこれらのうちの 2 以上の任意の値の組み合わせについて繰り返し、繰り返しの測定により測定された値を組み合わせることにより、前記非線形特性の強さの 3 次元画像、前記速度比の 3 次元画像又はその両方を得る、請求項 118 に記載の方法。

40

【請求項 120】

前記伝播圧縮速度の値、前記伝播せん断速度の値、又は圧縮速度対せん断速度比の値、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせを決定する、請求項 108 に記載の方法。

50

## 【請求項 1 2 1】

前記伝播圧縮速度の値、前記伝播せん断速度の値、又は圧縮速度対せん断速度比の値、又はこれらの2以上の任意の組み合わせを決定することは、

ポアホール内の採掘検層及び当該ポアホールから離れた位置の岩石層特性の水平方向の連続性に関する仮定を用いて、初期伝播速度モデルを推定する工程、

前記第1の音響信号の前記第1の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算する工程、

前記第2の音響信号の前記第2の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算する工程、

受信機によって、混合ゾーンと前記ポアホールに帰還する検出信号を受信する受信機との間の第3の伝播時間を計算する工程であって、当該検出信号は、前記第1の周波数と前記第2の周波数との差に等しい周波数を有するとともに、前記混合ゾーン内の前記第1の音響信号及び前記第2の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号である工程、

前記第1の伝播時間と前記第3の伝播時間を加算することにより、前記ポアホールに帰還する信号の合計伝播時間に対応する到着時間 $T_p$ を計算するとともに、前記第1の伝播時間と前記第2の伝播時間との開始時間差を計算する工程、

各開始時間差及び各周波数比 $d$ について、相関処理信号 $M(t, \quad, d)$ を生成するために、前記受信機において受信された信号から、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を抽出する工程であって、前記信号 $M(t, \quad, d)$ は、到着時間 $t$ 、開始時間差 $\quad$ 、及び周波数比 $d$ の関数であり、非線形相互作用信号を含む工程、

前記相関処理信号 $M(t, \quad, d)$ 内で、到着時間 $t$ 、開始時間差 $\quad$ 、及び周波数比 $d$ の全ての値を検索し、前記非線形混合プロセスによって生成された帯域制限スパイク信号が発生する到着時間 $T_{NL}$ 、開始時間差 $\quad_{NL}$ 、及び周波数比 $d_{NL}$ を決定する工程、

前記計算された到着時間 $T_p$ を測定された到着時刻 $T_{NL}$ と比較し、前記計算された開始時刻差 $\quad_p$ を測定された開始時刻差 $\quad_{NL}$ と比較する工程、

前記計算された到着時間 $T_p$ が測定された到着時刻 $T_{NL}$ と異なるか否か、及び、前記計算された開始時刻差 $\quad_p$ が測定された開始時刻差 $\quad_{NL}$ と異なるか否かを決定し、異なる場合には、前記計算された到着時刻と計算された到着時刻との差及び前記計測された開始時刻差と計算された開始時刻差に基づいて、前記伝播速度モデルを更新する工程、

測定された到着時間と実質的に等しい計算された到着時間又は測定された開始時間差と実質的に等しい計算された開始時間差又はその両方が得られる伝播速度 $V_p$ 及び伝播速度 $V_s$ を得るために、前記第1の音響源の位置、前記第2の音響源の位置、前記受信機の位置、前記第1の音響信号の前記方位角、前記第2の音響信号の前記方位角、前記第1の音響信号の前記仰角、前記第2の音響信号の前記仰角、又はこれらの2以上の任意の組み合わせについて、前記合計伝播時間に対応する前記計算された到着時刻が測定された到着時間と実質的に等しくなるか、前記計算された開始時間差が測定された開始時間差と等しくなるか、その両方となるまで、上記工程を反復して繰り返す工程、

の各工程を備えるマッピング法を用いて実行される、請求項 1 0 8 に記載の方法。

## 【請求項 1 2 2】

伝播速度モデルに基づいて、前記第1の音響源から放射される前記第1の周波数を有する前記第1の音響信号及び前記第2の音響源から放射される前記第2の周波数を有する前記第2の音響信号の軌道を、前記第1の音響源の位置、前記第1の音響信号の仰角及び方位角、前記第2の音響源の位置、前記第2の音響信号の仰角及び方位角、及び前記受信機の位置を用いて計算する、請求項 1 2 1 に記載の方法。

## 【請求項 1 2 3】

前記第1の音響源の位置、前記第1の音響信号の仰角及び方位角、及び、前記第2の音響源の位置、前記第2の音響信号の仰角及び方位角に基づいて、前記第1の音響信号及び前記第2の音響信号が非線形性の相互作用を行う混合ゾーンの位置を決定する、請求項 1 2 2 に記載の方法。

10

20

30

40

50

## 【請求項 1 2 4】

前記 2 つの音響信号が非線形に相互作用する前記混合ゾーンの空間座標を計算し、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角、及び前記第 2 の音響源の位置に基づいて、前記第 1 の音響源からの前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響源からの前記第 2 の音響信号との間の収束角を計算する、請求項 1 2 3 に記載の方法。

## 【請求項 1 2 5】

周波数比  $d_{NL}$  及び前記収束角に基づき、圧縮速度とせん断速度の速度比、周波数比、及び収束角と前記混合ゾーンの前記空間座標の計算された速度比との選択規則の関係をを用いて、前記混合ゾーンにおける前記圧縮速度と前記せん断速度との速度比を計算する、請求項 1 2 4 に記載の方法。

10

## 【請求項 1 2 6】

前記計算された速度比を前記混合ゾーンの前記空間座標にマッピングすることを、前記第 1 の音響源の位置の値、前記第 2 の音響源の位置の値、前記受信機の位置の値、前記第 1 の音響信号の方位角の値、前記第 2 の音響信号の方位角の値、前記第 1 の音響信号の仰角の値、もしくは前記第 2 の音響信号の仰角の値、又はこれらのうちの 2 以上の任意の値の組み合わせについて繰り返し、前記ボアホール周囲の前記岩石層の領域に関する前記速度比の値を得る、請求項 1 2 5 に記載の方法。

## 【請求項 1 2 7】

岩石層の非線形特性の 3 次元画像を生成する方法であって、

20

プロセッサによって、第 1 の周波数を有する第 1 の音響信号を生成するように構成された第 1 の音響源の位置、第 2 の周波数を有する第 2 の音響信号を生成するように構成された第 2 の音響源の位置、前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響信号とが交差する岩石層の混合ゾーンからボアホールに帰還する検出信号を受信するように構成された受信機の位置、及び前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角を含む測定パラメータを読み取り、

前記プロセッサによって、相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  を読み取り、前記相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  は、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\quad$ 、及び前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との周波数比  $d$  の関数であり、前記岩石層内の混合ゾーンにおける第 1 の音響信号及び第 2 の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成される信号を含み、

30

前記プロセッサによって、初期伝播圧縮及びせん断速度モデルを読み取り、

前記プロセッサによって、前記第 1 の音響信号の前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算し、

前記プロセッサによって、前記第 2 の音響信号の前記第 2 の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算し、

前記プロセッサによって、前記混合ゾーンの中心と前記ボアホールに帰還する前記検出信号を受信する受信機との間の第 3 の伝播時間を計算し、当該検出信号は、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との差に等しい周波数を有するとともに、前記混合ゾーン内の前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号であり、

40

前記プロセッサにより、前記第 1 の伝播時間と前記第 3 の伝播時間を加算することにより、前記ボアホールに帰還する信号の合計伝播時間に対応する到着時間  $T_p$  を計算するとともに、前記第 1 の伝播時間と前記第 2 の伝播時間との開始時間差  $\quad$  を計算し、

前記相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  内で、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\quad$ 、及び周波数比  $d$  の全ての値を検索し、前記非線形混合プロセスによって生成された帯域制限スパイク信号  $M(T_{NL}, \quad_{NL}, d_{NL})$  が発生する到着時間  $T_{NL}$ 、開始時間差  $\quad_{NL}$ 、及び周波数比  $d_{NL}$  を決定し、

前記プロセッサによって、前記第 1 の音響信号の仰角及び前記第 1 の音響源の位置、並びに、前記第 2 の音響信号の仰角及び前記第 2 の音響源の位置を用い、前記伝播圧縮速度及びせん断速度モデルに基づいて、音響伝播の軌道を計算し、

50

前記非線形混合プロセスにより生成された前記帯域制限信号  $M(T_{NL}, \theta_{NL}, d_{NL})$  を、前記第1の音響信号と前記第2の音響信号とが交差する相互作用混合ゾーンの空間座標にマッピングし、

前記帯域制限スパイク信号  $M(T_{NL}, \theta_{NL}, d_{NL})$  の前記相互作用混合ゾーンの前記空間座標へのマッピングを、前記第1の音響源の位置の複数の値、前記第2の音響源の位置の複数の値、前記受信機の位置の複数の値、前記第1の音響信号の仰角の複数の値、前記第1の音響信号の方位角の複数の値、前記第2の音響信号の仰角の複数の値、もしくは前記第2の音響信号の方位角の複数の値、又はこれらの2以上の任意の組み合わせについて繰り返し、前記非線形混合プロセスの強さの3次元画像を生成する、

方法。

10

【請求項128】

前記第1の音響源の位置、前記第1の音響信号の仰角及び方位角、及び、前記第2の音響源の位置、前記第2の音響信号の仰角及び方位角を用いて、前記第1の音響信号及び前記第2の音響信号が交差する前記混合ゾーンの位置を決定する、請求項127に記載の方法。

【請求項129】

岩石層の伝播圧縮速度、伝播せん断速度、圧縮速度対せん断速度比、又はこれらの2以上の任意の組み合わせの3次元画像を生成する方法であって、

プロセッサによって、第1の周波数を有する第1の音響信号を生成するように構成された第1の音響源の位置、第2の周波数を有する第2の音響信号を生成するように構成された第2の音響源の位置、前記第1の音響信号と前記第2の音響信号とが交差する岩石層の混合ゾーンからボアホールに帰還する検出信号を受信するように構成された受信機の位置、及び前記第1の音響信号及び前記第2の音響信号の仰角及び方位角を含む測定パラメータを読み取り、

20

前記プロセッサによって、相関処理信号  $M(t, \theta, d)$  を読み取り、前記相関処理信号  $M(t, \theta, d)$  は、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\theta$ 、及び前記第1の周波数と前記第2の周波数との周波数比  $d$  の関数であり、前記岩石層内の混合ゾーンにおける第1の音響信号及び第2の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成される信号を含み、

前記プロセッサによって、初期伝播圧縮及びせん断速度モデルを読み取り、

前記プロセッサによって、ボアホール内の採掘検層及び当該ボアホールから離れた位置の前記岩石層の水平方向の連続性に関する仮定を用いて、初期伝播速度モデルを推定し、

30

前記プロセッサによって、前記第1の音響信号の前記第1の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算し、

前記プロセッサによって、前記第2の音響信号の前記第2の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算し、

前記プロセッサによって、混合ゾーンの中心と前記ボアホールに帰還する前記検出信号を受信する受信機との間の第3の伝播時間を計算し、当該検出信号は、前記第1の周波数と前記第2の周波数との差に等しい周波数を有するとともに、前記混合ゾーン内の前記第1の音響信号及び前記第2の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号であり、

40

前記プロセッサにより、前記第1の伝播時間と前記第3の伝播時間を加算することにより、前記ボアホールに帰還する信号の合計伝播時間に対応する到着時間  $T_p$  を計算するとともに、前記第1の伝播時間と前記第2の伝播時間との開始時間差  $\theta$  を計算し、

前記相関処理信号  $M(t, \theta, d)$  内で、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\theta$ 、及び周波数比  $d$  の全ての値を検索し、前記非線形混合プロセスによって生成された帯域制限スパイク信号  $M(T_{NL}, \theta_{NL}, d_{NL})$  が発生する到着時間  $T_{NL}$ 、開始時間差  $\theta_{NL}$ 、及び周波数比  $d_{NL}$  を決定し、

前記計算された到着時間  $T_p$  を測定された到着時刻  $T_{NL}$  と比較し、前記計算された開始時刻差  $\theta_p$  を測定された開始時刻差  $\theta_{NL}$  と比較し、

前記測定された到着時間と前記計算された到着時間との差を用い、前記計算された到着

50

時間が前記測定時間と異なる場合、又は、前記計算された開始時間差と前記測定された開始時間差とを用い、前記計算された開始時間差が前記測定された開始時間差と異なる場合に、トモグラフィー速度反転法 ( tomographic velocity inversion ) 又は全波形逆解析法 ( full wave form inversion ) によって、前記伝播速度モデルを更新し、

測定された到着時間と実質的に等しい計算された到着時間又は測定された開始時間差と実質的に等しい計算された開始時間差又はその両方が得られる伝播速度  $V_p$  及び伝播速度  $V_s$  を得るために、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響源の位置、前記受信機の位置、前記第 1 の音響信号の前記方位角、前記第 2 の音響信号の前記方位角、前記第 1 の音響信号の前記仰角、前記第 2 の音響信号の前記仰角、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせについて、前記計算された到着時刻が測定された到着時間と実質的に等しくなるか、前記計算された開始時間差が測定された開始時間差と等しくなるか、その両方となるまで、上記工程を反復して繰り返し、

圧縮速度の伝播、せん断速度の伝播、圧縮速度対せん断速度比、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせの 3 次元画像を生成する、

方法。

【請求項 130】

前記伝播圧縮速度の値、前記伝播せん断速度の値、又は圧縮速度対せん断速度比の値、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせを決定する、請求項 129 に記載の方法。

【請求項 131】

前記 2 つの音響信号が交差する前記混合ゾーンの空間座標を計算し、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角、及び前記第 2 の音響源の位置に基づいて、前記第 1 の音響源からの前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響源からの前記第 2 の音響信号との間の収束角を計算する、請求項 129 に記載の方法。

【請求項 132】

測定された周波数比  $d_{NL}$  及び計算された収束角に基づいて、圧縮速度とせん断速度との比、周波数比、及び収束角の間の選択規則の関係を用いて、前記混合ゾーンにおける前記圧縮速度と前記せん断速度との速度比を計算する、請求項 131 に記載の方法。

【請求項 133】

前記計算された速度比を前記混合ゾーンの空間座標にマッピングすることを、前記第 1 の音響源の位置の値、前記第 2 の音響源の位置の値、前記受信機の位置の値、前記第 1 の音響信号の方位角の値、前記第 2 の音響信号の方位角の値、前記第 1 の音響信号の仰角の値、もしくは前記第 2 の音響信号の仰角の値、又はこれらのうちの 2 以上の任意の値の組み合わせについて繰り返し、前記速度比の 3 次元画像を得る、請求項 132 に記載の方法。

【請求項 134】

岩石層の 3 次元画像を生成するシステムであって、

時系列に配列された第 1 の複数のパルスを含む第 1 の音響信号を生成するように構成された第 1 の音響源であって、前記第 1 の複数のパルスは時間的に分離されており、各パルスは中心周波数での第 1 の変調信号を備え、2 つの連続するパルスの中心周波数は異なっている、第 1 の音響源と、

時系列に配列された第 2 の複数のパルスを含む第 2 の音響信号を生成するように構成された第 2 の音響源であって、前記第 2 の複数のパルスは時間的に分離されており、2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第 1 の複数のパルスにおける 2 つの対応するパルスの中央間の時間間隔と同様であり、開始時刻差は前記第 2 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻と前記第 1 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻との間で提供され、各パルスは変調信号を備えると共に前記第 2 の複数のパルスにおける各パルス内の前記変調信号の中心周波数は前記第 1 の複数のパルスにおける対応するパルスに対する前記変調信号の前記中心周波数の選択された分数である、第 2 の音響源と、

10

20

30

40

50

を備え、

前記第1の音響源及び前記第2の音響源は、前記ボアホール内に配置されており、前記第1及び第2の音響信号の軌跡が前記ボアホールの外部にある交差領域において交差するように制御可能であり、

前記ボアホール内に配置され、前記ボアホールに帰還する受信信号を受信するように構成された受信機であって、当該受信信号は、前記非線形交差領域内の非線形混合領域において、前記第1の音響信号及び前記第2の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号を含む受信機と、

雑音、線形相互作用プロセスにより生成される信号、又はその両方から抽出するように、前記非線形混合プロセスによって生成された前記信号に対してデータ処理を行うように構成された第1のプロセッサと、

前記非線形混合プロセスによって生成された前記信号に基づいて、圧縮速度の伝播、せん断速度の伝播、圧縮速度対せん断速度比、岩石層の非線形特性、又はこれらの2以上の任意の組み合わせの3次元画像を生成するように構成された第2のプロセッサと、

をさらに備えるシステム。

【請求項135】

前記複数のパルスにおける2つの連続するパルスの中央間の時間間隔が各パルスの継続時間よりも大きい、請求項134に記載のシステム。

【請求項136】

前記第2のプロセッサは、キルヒホッフ画像処理、ビーム画像処理、又は波動方程式画像処理を用いて、前記圧縮速度の伝播、せん断速度の伝播、圧縮速度対せん断速度比、岩石層の非線形特性、又はこれらの2以上の任意の組み合わせの3次元画像を生成するように構成された、請求項134に記載のシステム。

【請求項137】

前記第2のプロセッサは、トモグラフィ速度反転法 (tomographic velocity inversion)、全波形逆解析法 (full wave form inversion)、又はトモグラフィ速度反転法と組み合わされた反復画像法 (iterative imaging) を用いて、伝播圧縮速度の値、せん断速度の値、又はその両方を決定する、請求項136に記載のシステム。

【請求項138】

前記第2のプロセッサが、

ボアホール内の採掘検層及び当該ボアホールから離れた位置の岩石層特性の水平方向の連続性に関する仮定を用いて、初期伝播速度モデルを推定し、

前記第1の音響信号の前記第1の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算し、

前記第2の音響信号の前記第2の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算し、

受信機によって、前記混合ゾーンと前記ボアホールに帰還する検出信号を受信する受信機との間の第3の伝播時間を計算し、当該検出信号は、前記第1の周波数と前記第2の周波数との差に等しい周波数を有するとともに、前記混合ゾーン内の前記第1の音響信号及び前記第2の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号であり、

前記第1の伝播時間と前記第3の伝播時間を加算することにより、前記ボアホールに帰還する信号の合計伝播時間に対応する到着時間  $T_p$  を計算するとともに、前記第1の伝播時間と前記第2の伝播時間との開始時間差 を計算し、

各開始時間差 及び各周波数比  $d$  について、相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  を生成するために、前記受信機において受信された信号から、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を抽出し、前記信号  $M(t, \quad, d)$  は、到着時間  $t$ 、開始時間差 、及び周波数比  $d$  の関数であり、非線形相互作用信号を含み、

前記相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  内で、到着時間  $t$ 、開始時間差 、及び周波数比  $d$  の全ての値を検索し、前記非線形混合プロセスによって生成された帯域制限スパイク信号が発生する到着時間  $T_{NL}$ 、開始時間差  $_{NL}$ 、及び周波数比  $d_{NL}$  を決定し、

前記計算された到着時間  $T_p$  を測定された到着時刻  $T_{NL}$  と比較し、前記計算された開

10

20

30

40

50



始時刻差  $T_p$  を測定された開始時刻差  $T_{NL}$  と比較し、

前記計算された到着時間  $T_p$  が測定された到着時刻  $T_{NL}$  と異なるか否か、及び、前記計算された開始時刻差  $T_p$  が測定された開始時刻差  $T_{NL}$  と異なるか否かを決定し、異なる場合には、前記計算された到着時刻と計算された到着時刻との差及び前記計測された開始時刻差と計算された開始時刻差に基づいて、前記伝播速度モデルを更新し、

測定された到着時間と実質的に等しい計算された到着時間又は測定された開始時間差と実質的に等しい計算された開始時間差又はその両方が得られる伝播速度  $V_p$  及び伝播速度  $V_s$  を得るために、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響源の位置、前記受信機の位置、前記第 1 の音響信号の前記方位角、前記第 2 の音響信号の前記方位角、前記第 1 の音響信号の前記仰角、前記第 2 の音響信号の前記仰角、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせについて、前記合計伝播時間に対応する前記計算された到着時刻が測定された到着時間と実質的に等しくなるか、前記計算された開始時間差が測定された開始時間差と等しくなるか、その両方となるまで、上記工程を反復して繰り返し、

圧縮速度の伝播、せん断速度の伝播、圧縮速度対せん断速度比、非線形特性、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせの 3 次元画像を生成する、

ように構成されている、請求項 134 に記載のシステム。

【請求項 139】

前記第 1 のプロセッサが、前記検出信号を非線形媒体における非線形相互作用の選択規則に従って前記信号の予測特性に従って設計されるテンプレート信号と相関処理し、前記第 2 の複数のパルスと前記第 1 の複数のパルスとの間の複数の開始時間差  $\tau$  について、また、前記第 2 の複数のパルスの各パルス内の前記変調信号の前記中心周波数と前記第 1 の複数のパルスの対応する各パルス内の前記変調信号の前記中心周波数との複数の周波数比  $d$  について、前記テンプレート信号と前記検出信号との相関処理を繰り返し、各開始時間差  $\tau$  及び各周波数比  $d$  について、非線形相互作用信号を含む相関処理信号  $M(t, \tau, d)$  を生成することにより、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を抽出するように構成されている、請求項 134 に記載のシステム。

【請求項 140】

前記第 2 のプロセッサが、伝播速度モデルに基づいて、第 1 の音響源から放射される前記第 1 の音響信号及び第 2 の音響源から放射される前記第 2 の音響信号の軌道を、前記第 1 の音響源の位置、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、及び、前記第 2 の音響源の位置、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角を用いて計算するように構成されている、請求項 138 に記載のシステム。

【請求項 141】

前記第 2 のプロセッサが、前記第 1 の音響源の位置、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、及び、前記第 2 の音響源の位置、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角に基づいて、前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号が非線形性の相互作用を行う混合ゾーンの位置を決定するように構成されている、請求項 140 に記載のシステム。

【請求項 142】

前記第 2 のプロセッサが、前記 2 つの音響信号が非線形に相互作用する前記混合ゾーンの空間座標を計算し、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角、及び前記第 2 の音響源の位置に基づいて、前記第 1 の音響源からの前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響源からの前記第 2 の音響信号との間の収束角を計算するように構成されている、請求項 141 に記載のシステム。

【請求項 143】

前記第 2 のプロセッサが、前記相関処理信号  $M(T_{NL}, \tau, d_{NL})$  を、前記混合ゾーンにおける前記岩石層の前記非線形特性に対応する前記混合ゾーンの空間座標にマッピングするように構成されている、請求項 142 に記載のシステム。

【請求項 144】

前記第 2 のプロセッサが、周波数比  $d_{NL}$  及び前記収束角に基づき、圧縮速度とせん断速度の速度比、周波数比、及び収束角と前記混合ゾーンの空間座標の全比計算された

10

20

30

40

50

速度比との選択規則の関係を用いて、前記混合ゾーンにおける前記圧縮速度と前記せん断速度との速度比を計算するように構成されている、請求項 1 4 3 に記載のシステム。

【請求項 1 4 5】

前記第 2 のプロセッサが、前記第 1 の音響源の位置の値、前記第 2 の音響源の位置の値、前記受信機の位置の値、前記第 1 の音響信号の方位角の値、前記第 2 の音響信号の方位角の値、前記第 1 の音響信号の仰角の値、もしくは前記第 2 の音響信号の仰角の値、又はこれらのうちの 2 以上の任意の値の組み合わせについて、前記相関処理信号  $M(T_{NL}, N_L, d_{NL})$  を前記混合ゾーンの前記空間座標にマッピングし、又は、前記計算された速度比を前記混合ゾーンの前記空間座標にマッピングし、又はその両方を行って、繰り返し測定の測定により測定された値を組み合わせることにより、前記非線形特性の強さの 3 次元画像、前記速度比の 3 次元画像又はその両方を得るように構成されている、請求項 1 4 4 に記載のシステム。

10

【請求項 1 4 6】

前記第 2 のプロセッサが、前記伝播圧縮速度の値、前記伝播せん断速度の値、又は圧縮速度対せん断速度比の値、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせを決定するように構成されている、請求項 1 3 4 に記載のシステム。

【請求項 1 4 7】

前記第 2 のプロセッサが、

ボアホール内の採掘検層及び当該ボアホールから離れた位置の岩石層特性の水平方向の連続性に関する仮定を用いて、初期伝播速度モデルを推定し、

20

前記第 1 の音響信号の前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算し、前記第 2 の音響信号の前記第 2 の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算し、受信機によって、前記混合ゾーンと前記ボアホールに帰還する検出信号を受信する受信機との間の第 3 の伝播時間を計算し、当該検出信号は、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との差に等しい周波数を有するとともに、前記混合ゾーン内の前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号であり、

前記第 1 の伝播時間と前記第 3 の伝播時間を加算することにより、前記ボアホールに帰還する信号の合計伝播時間に対応する到着時間  $T_p$  を計算するとともに、前記第 1 の伝播時間と前記第 2 の伝播時間との開始時間差を計算し、

各開始時間差及び各周波数比  $d$  について、相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  を生成するために、前記受信機において受信された信号から、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を抽出し、前記信号  $M(t, \quad, d)$  は、到着時間  $t$ 、開始時間差、及び周波数比  $d$  の関数であり、非線形相互作用信号を含み、

30

前記相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  内で、到着時間  $t$ 、開始時間差、及び周波数比  $d$  の全ての値を検索し、前記非線形混合プロセスによって生成された帯域制限スパイク信号が発生する到着時間  $T_{NL}$ 、開始時間差  $N_L$ 、及び周波数比  $d_{NL}$  を決定し、

前記計算された到着時間  $T_p$  を測定された到着時刻  $T_{NL}$  と比較し、前記計算された開始時刻差  $p$  を測定された開始時刻差  $N_L$  と比較し、

前記計算された到着時間  $T_p$  が測定された到着時刻  $T_{NL}$  と異なるか否か、及び、前記計算された開始時刻差  $p$  が測定された開始時刻差  $N_L$  と異なるか否かを決定し、異なる場合には、前記計算された到着時刻と計算された到着時刻との差及び前記計測された開始時刻差と計算された開始時刻差に基づいて、前記伝播速度モデルを更新し、

40

測定された到着時間と実質的に等しい計算された到着時間又は測定された開始時間差と実質的に等しい計算された開始時間差又はその両方が得られる伝播速度  $V_p$  及び伝播速度  $V_s$  を得るために、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響源の位置、前記受信機の位置、前記第 1 の音響信号の前記方位角、前記第 2 の音響信号の前記方位角、前記第 1 の音響信号の前記仰角、前記第 2 の音響信号の前記仰角、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせについて、前記合計伝播時間に対応する前記計算された到着時刻が測定された到着時間と実質的に等しくなるか、前記計算された開始時間差が測定された開始時間差と等しくなるか、その両方となるまで、上記工程を反復して繰り返す、

50

ように構成されている、請求項 1 4 6 に記載のシステム。

【請求項 1 4 8】

前記第 2 のプロセッサが、伝播速度モデルに基づいて、第 1 の音響源から放射される前記第 1 の音響信号及び第 2 の音響源から放射される前記第 2 の音響信号の軌道を、前記第 1 の音響源の位置、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、及び、前記第 2 の音響源の位置、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角を用いて計算するように構成されている、請求項 1 4 7 に記載のシステム。

【請求項 1 4 9】

前記第 2 のプロセッサが、前記 2 つの音響信号が非線形に相互作用する前記混合ゾーンの空間座標を計算し、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角、及び前記第 2 の音響源の位置に基づいて、前記第 1 の音響源からの前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響源からの前記第 2 の音響信号との間の収束角を計算するように構成されている、請求項 1 4 8 に記載のシステム。

【請求項 1 5 0】

前記第 2 のプロセッサが、周波数比  $dNL$  及び前記収束角に基づき、圧縮速度とせん断速度の速度比、周波数比、及び収束角の間の選択規則の関係を用いて、前記混合ゾーンにおける前記圧縮速度と前記せん断速度との速度比を計算し、計算された速度比を前記混合ゾーンの空間座標にマッピングするように構成されている、請求項 1 4 9 に記載のシステム。

【請求項 1 5 1】

前記第 2 のプロセッサが、前記計算された速度比を前記混合ゾーンの空間座標にマッピングすることを、前記第 1 の音響源の位置の値、前記第 2 の音響源の位置の値、前記受信機の位置の値、前記第 1 の音響信号の方位角の値、前記第 2 の音響信号の方位角の値、前記第 1 の音響信号の仰角の値、もしくは前記第 2 の音響信号の仰角の値、又はこれらのうちの 2 以上の任意の値の組み合わせについて繰り返し、前記ポアホール周囲の前記岩石層の領域に関する前記速度比の値を得るように構成されている、請求項 1 5 0 に記載のシステム。

【請求項 1 5 2】

岩石層の非線形特性の 3 次元画像を生成するプロセッサを備えたシステムであって、当該プロセッサは、

第 1 の周波数を有する第 1 の音響信号を生成するように構成された第 1 の音響源の位置、第 2 の周波数を有する第 2 の音響信号を生成するように構成された第 2 の音響源の位置、前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響信号とが交差する岩石層の混合ゾーンからポアホールに帰還する検出信号を受信するように構成された受信機の位置、及び前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角を含む測定パラメータを読み取り、

相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  を読み取り、前記相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  は、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\quad$ 、及び前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との周波数比  $d$  の関数であり、前記岩石層内の混合ゾーンにおける第 1 の音響信号及び第 2 の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成される信号を含み、

初期伝播圧縮及びせん断速度モデルを読み取り、

前記第 1 の音響信号の前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算し、前記第 2 の音響信号の前記第 2 の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算し、前記混合ゾーンと前記ポアホールに帰還する検出信号を受信する受信機との間の第 3 の伝播時間を計算し、当該検出信号は、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との差に等しい周波数を有するとともに、前記混合ゾーン内の前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号であり、

前記第 1 の伝播時間と前記第 3 の伝播時間を加算することにより、前記ポアホールに帰還する信号の合計伝播時間に対応する到着時間を計算するとともに、前記第 1 の伝播時間と前記第 2 の伝播時間との開始時間差  $p$  を計算し、

前記相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  内で、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\quad$ 、及び周波数比  $d$

10

20

30

40

50

の全ての値を検索し、前記非線形混合プロセスによって生成された帯域制限スパイク信号が発生する到着時間  $T_{NL}$ 、開始時間差  $\tau_{NL}$ 、及び周波数比  $d_{NL}$  を決定し、

前記第 1 の音響信号の仰角及び前記第 1 の音響源の位置、並びに、前記第 2 の音響信号の仰角及び前記第 2 の音響源の位置を用い、前記伝播圧縮速度及びせん断速度モデルに基づいて、音響伝播の軌道を計算し、

前記非線形混合プロセスにより生成された前記帯域制限信号  $M(T_{NL}, \tau_{NL}, d_{NL})$  を、前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響信号とが交差する相互作用混合ゾーンの空間座標にマッピングし、

前記帯域制限スパイク信号  $M(T_{NL}, \tau_{NL}, d_{NL})$  の前記相互作用混合ゾーンの  
前記空間座標へのマッピングを、前記第 1 の音響源の位置の複数の値、前記第 2 の音響源  
の位置の複数の値、前記受信機の位置の複数の値、前記第 1 の音響信号の仰角の複数の値、  
前記第 1 の音響信号の方位角の複数の値、前記第 2 の音響信号の仰角の複数の値、もし  
くは前記第 2 の音響信号の方位角の複数の値、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせに  
ついて繰り返し、前記非線形混合プロセスの強さの 3 次元画像を生成する、

ように構成されているシステム。

【請求項 153】

前記第 1 の音響源の位置、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、及び、前記第 2 の音響源の位置、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角を用いて、前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号が交差する前記混合ゾーンの位置を決定する、請求項 152 に記載のシステム。

【請求項 154】

岩石層の伝播圧縮速度、伝播せん断速度、圧縮速度対せん断速度比、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせの 3 次元画像を生成するプロセッサを備えたシステムであって、当該プロセッサは、

第 1 の周波数を有する第 1 の音響信号を生成するように構成された第 1 の音響源の位置、第 2 の周波数を有する第 2 の音響信号を生成するように構成された第 2 の音響源の位置、前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響信号とが交差する岩石層の混合ゾーンからボアホールに帰還する検出信号を受信するように構成された受信機の位置、及び前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角を含む測定パラメータを読み取り、相関処理信号  $M(t, \tau, d)$  を読み取り、前記相関処理信号  $M(t, \tau, d)$  は、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\tau$ 、及び前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との周波数比  $d$  の関数であり、前記岩石層内の混合ゾーンにおける第 1 の音響信号及び第 2 の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成される信号を含み、

初期伝播圧縮及びせん断速度モデルを読み取り、

ボアホール内の探掘検層及び当該ボアホールから離れた位置の岩石層特性の水平方向の連続性に関する仮定を用いて、初期伝播速度モデルを推定し、

前記第 1 の音響信号の前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算し、

前記第 2 の音響信号の前記第 2 の音響源から前記混合ゾーンまでの伝播時間を計算し、

前記混合ゾーンと前記ボアホールに帰還する検出信号を受信する受信機との間の第 3 の伝播時間を計算し、当該検出信号は、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との差に等しい周波数を有するとともに、前記混合ゾーン内の前記第 1 の音響信号及び前記第 2 の音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号であり、

前記第 1 の伝播時間と前記第 3 の伝播時間を加算することにより、前記ボアホールに帰還する信号の合計伝播時間に対応する到着時間  $T_p$  を計算するとともに、前記第 1 の伝播時間と前記第 2 の伝播時間との開始時間差  $\tau_p$  を計算し、

前記相関処理信号  $M(t, \tau, d)$  内で、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\tau$ 、及び周波数比  $d$  の全ての値を検索し、前記非線形混合プロセスによって生成された帯域制限スパイク信号  $M(T_{NL}, \tau_{NL}, d_{NL})$  が発生する到着時間  $T_{NL}$ 、開始時間差  $\tau_{NL}$ 、及び周波数比  $d_{NL}$  を決定し、

前記計算された到着時間  $T_p$  を測定された到着時刻  $T_{NL}$  と比較し、前記計算された開

10

20

30

40

50

始時刻差  $p$  を測定された開始時刻差  $N_L$  と比較し、

前記測定された到着時間と前記計算された到着時間との差を用い、前記計算された到着時間が前記測定時間と異なる場合、又は、前記計算された開始時間差と前記測定された開始時間差とを用い、前記計算された開始時間差が前記測定された開始時間差と異なる場合に、トモグラフィック速度反転法 (tomographic velocity inversion) 又は全波形逆解析法 (full wave form inversion) によって、前記伝播速度モデルを更新し、

測定された到着時間と実質的に等しい計算された到着時間又は測定された開始時間差と実質的に等しい計算された開始時間差又はその両方が得られる伝播速度  $V_p$  及び伝播速度  $V_s$  を得るために、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響源の位置、前記受信機の位置、前記第 1 の音響信号の前記方位角、前記第 2 の音響信号の前記方位角、前記第 1 の音響信号の前記仰角、前記第 2 の音響信号の前記仰角、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせについて、前記計算された到着時刻が測定された到着時間と実質的に等しくなるか、前記計算された開始時間差が測定された開始時間差と等しくなるか、その両方となるまで、上記工程を反復して繰り返し、

圧縮速度の伝播、せん断速度の伝播、圧縮速度対せん断速度比、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせの 3 次元画像を生成する、

ように構成されたシステム。

【請求項 155】

前記プロセッサが、前記伝播圧縮速度の値、前記伝播せん断速度の値、又は圧縮速度対せん断速度比の値、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせを決定するように構成されている、請求項 154 に記載のシステム。

【請求項 156】

前記プロセッサが、前記 2 つの音響信号が交差する前記混合ゾーンの空間座標を計算し、前記第 1 の音響信号の仰角及び方位角、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響信号の仰角及び方位角、及び前記第 2 の音響源の位置に基づいて、前記第 1 の音響源からの前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響源からの前記第 2 の音響信号との間の収束角を計算するように構成されている、請求項 154 に記載のシステム。

【請求項 157】

前記プロセッサが、測定された周波数比  $d_{N_L}$  及び計算された収束角に基づいて、圧縮速度とせん断速度との比、周波数比、及び収束角の間の選択規則の関係を用いて、前記混合ゾーンにおける前記圧縮速度と前記せん断速度との速度比を計算するように構成される、請求項 156 に記載のシステム。

【請求項 158】

請求項 157 に記載の方法。前記計算された速度比を前記混合ゾーンの空間座標にマッピングすることを、前記第 1 の音響源の位置の値、前記第 2 の音響源の位置の値、前記受信機の位置の値、前記第 1 の音響信号の方位角の値、前記第 2 の音響信号の方位角の値、前記第 1 の音響信号の仰角の値、もしくは前記第 2 の音響信号の仰角の値、又はこれらのうちの 2 以上の任意の値の組み合わせについて繰り返し、前記速度比の 3 次元画像を得る、

【請求項 159】

ボアホール外部の岩石層を調査する方法であって、

ボアホール内に配置された第 1 の音響源によって、第 1 の周波数でのブロードキャストである第 1 の円錐音響信号を生成し、

ボアホール内に配置された第 2 の音響源によって、前記第 1 の周波数と異なる第 2 の周波数でのブロードキャストである第 2 の円錐音響信号を生成し、前記第 1 の周波数及び前記第 2 の周波数は、約 500 Hz から 500 kHz の間の周波数範囲にあり、

前記第 1 の円錐音響信号と前記第 2 の円錐音響信号とが前記ボアホール外部の所望の交差領域において交差するように、前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源を構成し、

前記ボアホール内に配置された受信機によって、前記ボアホールに帰還する検出信号を受信し、当該検出信号は、前記第1の周波数と前記第2の周波数との差に等しい周波数を有するとともに、前記非線形交差領域内の非線形混合ゾーンにおいて、前記第1の円錐音響信号及び前記第2の円錐音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号であり、

前記検出信号を記録し、前記検出信号を記憶装置に記憶し、前記第1の音響源の位置、前記第2の音響源の位置、前記受信機の位置、前記第1の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向、及び前記第2の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向を含む測定パラメータを前記記憶装置に記憶する、

方法。

10

【請求項160】

前記第1の円錐音響信号の生成及び前記第2の円錐音響信号の生成は、前記第1の音響源及び前記第2の音響源が単一のボアホールに配置されている間に前記第1の円錐音響信号の生成及び前記第2の円錐音響信号を生成することを含む、請求項159に記載の方法。

【請求項161】

前記第1の円錐音響信号及び前記第2の円錐音響信号が共線関係にない対称の軸を有するように、前記ボアホールは、直線状ではないか、又は、前記ボアホールは側線を備える、請求項159に記載の方法。

【請求項162】

20

前記第1の円錐音響信号を生成することは、時系列に配列された第1の複数のパルスを含む第1の音響信号を生成することを含み、前記第1の複数のパルスは時間的に分離されており、各パルスは中心周波数での第1の変調信号を備え、2つの連続するパルスの中心周波数は異なっている、請求項159に記載の方法。

【請求項163】

前記複数のパルスにおける2つの連続するパルスの中央間の時間間隔が各パルスの継続時間よりも大きい、請求項160に記載の方法。

【請求項164】

前記第2の円錐音響信号を生成することは、符号化された時系列に配列された第2の複数のパルスを生成することを含み、前記第2の複数のパルスは時間的に隔たれており、2つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第1の複数のパルスにおける2つの対応するパルスの中央間の時間間隔と同様であり、開始時刻差は前記第2の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻と前記第1の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻との間で提供され、各パルスは変調信号を備えると共に前記第2の複数のパルスにおける各パルス内の前記変調信号の中心周波数は前記第1の複数のパルスにおける対応するパルスに対する前記変調信号の前記中心周波数の選択された分数周波数比 $d$ である、請求項159に記載の方法。

30

【請求項165】

前記第1の音響信号と前記第2の音響信号との間の複数の開始時間の差について、また、前記第1の周波数と前記第2の周波数との複数の周波数比について、前記第1の音響信号の生成、前記第2の音響信号の生成、及び前記検出信号の受信を繰り返す、請求項164に記載の方法。

40

【請求項166】

前記第1の音響信号の生成及び前記第2の音響信号の生成は、前記ブロードキャスト信号が反対の極性を有するように、前記第1の円錐音響信号の位相、前記第2の円錐音響信号の位相、又はその両方を制御することを含む、請求項159に記載の方法。

【請求項167】

非線形相互作用信号を強化し線形相互作用信号及び雑音を最小化するために、前記第1の円錐音響信号及び前記第2の円錐音響信号から前記混合プロセスによって生成され前記受信機で検出された信号を、反対の極性を有する前記第1の円錐音響信号及び反対の極性

50

を有する前記第 2 の円錐音響信号から前記混合プロセスによって生成され前記受信機で検出された信号に加える、請求項 166 に記載の方法。

【請求項 168】

複数の検知器によって複数の検知信号を受信し、多次元フィルタリング法 (multi-dimensional filtering)、反射伝播時間差分析及びスタッキング法 (time move out analysis and stacking)、又はその両方を、前記複数の検知器によって受信される前記複数の検出信号に適用する、請求項 159 に記載の方法。

【請求項 169】

前記複数の検知器による前記検知信号の受信は、前記複数の検知器の各々の複数の成分検知器による前記検知信号の各々の検出成分信号を受信することを含み、多次元フィルタリング法 (multi-dimensional filtering)、反射伝播時間差分析及びスタッキング法 (time move out analysis and stacking)、又はその両方を、前記複数の検知器の各々の前記複数の成分検知器によって受信される前記複数の検出成分信号に適用する、請求項 168 に記載の方法。

10

【請求項 170】

前記第 1 の音響源の異なる位置、前記第 2 の音響源の異なる位置、前記受信機の異なる位置、前記第 1 の音響源のブロードキャスト円錐角、前記第 2 の音響源のブロードキャスト円錐角、又はこれらの 2 つ以上の任意の組み合わせについて、前記第 1 の円錐音響信号の生成、前記第 2 の円錐音響信号の生成、及び前記検出信号の受信を繰り返す、請求項 159 に記載の方法。

20

【請求項 171】

前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源から前記岩石層内における非線形相互作用により生成された前記記録検出信号から、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を抽出及び強化し、また、線形相互作用プロセスもしくは雑音又はその両方によって生成された信号を抑圧する、請求項 159 に記載の方法。

【請求項 172】

前記第 1 の円錐音響信号の生成は、符号化された時系列に配列された第 1 の複数のパルスを生成することを含み、前記第 1 の複数のパルスは時間的に分離されており、各パルスは中心周波数での第 1 の変調信号を備え、2 つの連続するパルスの中心周波数は異なっている、

30

前記第 2 の円錐音響信号を生成することは、符号化された時系列に配列された第 2 の複数のパルスを生成することを含み、前記第 2 の複数のパルスは時間的に隔たれており、2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第 1 の複数のパルスにおける 2 つの対応するパルスの中央間の時間間隔と同様であり、開始時刻差は前記第 2 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻と前記第 1 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻との間で提供され、各パルスは第 2 の変調信号を備えると共に前記第 2 の複数のパルスにおける各パルス内の前記第 2 の変調信号の中心周波数は前記第 1 の複数のパルスにおける対応するパルスに対する前記第 1 の変調信号の前記中心周波数の選択された分数周波数比  $d$  であり、

40

前記記録データを読み取り、プロセッサを用いて、前記検出信号を時系列に配列された複数のパルスを含むテンプレート信号と相関処理し、2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第 1 の複数のパルスにおける 2 つの対応するパルスの中央間の時間間隔と実質的に同じであり、前記複数のパルスにおける各パルスは、前記第 1 の複数のパルス及び前記第 2 の複数のパルスの対応する各々のパルス内に、前記第 1 の変調信号の中心周波数と前記第 2 の変調信号の中心周波数との差に等しい中心周波数を有する変調信号を含む、請求項 159 に記載の方法。

【請求項 173】

前記複数のパルスにおける 2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔が各パルスの継続時間よりも大きい、請求項 172 に記載の方法。

50

## 【請求項 174】

複数の開始時間差 について、また、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との複数の周波数比  $d$  について、前記テンプレート信号と前記検出信号との相関処理を繰り返し、非線形相互作用信号を含む相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  を生成する、請求項 172 に記載の方法。

## 【請求項 175】

非線形相互作用により生成される前記信号の期待帯域の周囲に狭い周波数帯域を維持するために、時変周波数バンドパスフィルタを前記検出信号に適用し、前記狭い周波数帯域幅は、各パルスの前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との差の周囲で選択される、請求項 174 に記載の方法。

10

## 【請求項 176】

プロセッサを用いて、前記検出信号のホドグラム分析を実行する、請求項 172 に記載の方法。

## 【請求項 177】

前記岩石層内の音響信号の非線形相互作用に関する選択規則に従って、前記相互作用領域における前記混合ゾーンの位置を制御するために、前記第 1 の周波数の前記第 2 の周波数に対する周波数比もしくは開始時間差の範囲を走査し、又は、その両方を走査する、請求項 159 に記載の方法。

## 【請求項 178】

前記第 1 の音響源を前記ボアホール内で第 1 の軸方向に配置し、前記第 2 の音響源を前記ボアホール内で第 2 の軸方向に配置し、前記第 1 の軸方向と前記第 2 の軸方向は、非共線方向又は非平行である、請求項 159 に記載の方法。

20

## 【請求項 179】

前記第 1 の円錐音響信号と前記第 2 の円錐音響信号の交差軌跡に配置されている前記交差領域内で特定の混合ゾーンを選択するために、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数の前記周波数比及び前記開始時間差を制御する、請求項 178 に記載の方法。

## 【請求項 180】

前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と前記混合ゾーンの中心から前記受信機までの伝播時間との合計によって、又は、前記第 1 の円錐音響信号と前記第 2 の円錐音響信号との間の前記混合ゾーンへの収束角によって、前記第 1 の音響信号、前記第 2 の音響信号、又はその両方の収束角及び周波数比の間の非線形相互作用選択規則関係に従って、前記第 1 の円錐ブロードキャストと前記第 2 の円錐ブロードキャストとの交差軌跡に配置されている混合ゾーンの間で区別する、請求項 179 に記載の方法。

30

## 【請求項 181】

第 1 のボアホール内に前記第 1 の音響源を配置し、第 2 のボアホール内に前記第 2 の音響源を配置し、前記受信機を前記第 1 のボアホール、前記第 2 のボアホール又は第 3 のボアホールのいずれかに配置する、請求項 159 に記載の方法。

## 【請求項 182】

前記第 1 の円錐音響信号及び前記第 2 の円錐音響信号が前記ボアホール周囲の前記岩石層内の目標領域において交差するように、前記円錐角もしくは円錐軸又はその両方を選択する、請求項 181 に記載の方法。

40

## 【請求項 183】

ボアホール周囲の岩石層の領域における圧縮速度の値もしくはせん断速度の値又はその両方を伝播時間トモグラフィー反転法 (travel time tomographic inversion) によって決定する方法であって、

ボアホール内の採掘検層及び当該ボアホールから離れた位置の岩石層特性の水平方向の連続性に関する仮定を用いて、初期伝播速度モデルを推定し、

プロセッサにより、第 1 の円錐音響信号をブロードキャストする第 1 の音響源及び第 2 の円錐音響信号をブロードキャストする第 2 の音響源の位置及び前記第 1 の円錐音響信号及び前記第 2 の円錐音響信号の仰角に基づいて、混合ゾーンの空間座標を計算し、

50



前記プロセッサによって、前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と当該混合ゾーンから前記受信機までの伝播時間との合計の伝播時間を計算し、

前記プロセッサによって、前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と前記第 2 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間との差を計算し、

前記プロセッサによって、相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  を読み出し、当該相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  は、到達時間  $t$ 、前記第 2 の音響信号と前記第 1 の音響信号との間の前記開始時間差  $\quad$ 、及び前記第 1 の音響信号の周波数と前記第 2 の音響信号の周波数との周波数比  $d$  の関数であり、非線形相互作用信号を含み、

前記プロセッサによって、前記信号  $M(t, \quad, d)$  内で、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\quad$ 、及び周波数比  $d$  の値の範囲を走査し、前記到着時間  $T_{NL}$  の複数の値、前記開始時間差  $\quad$  の複数の値、前記周波数比  $d_{NL}$  の複数の値を決定し、前記到着時間  $T_{NL}$ 、前記開始時間差  $\quad$ 、及び前記周波数比  $d_{NL}$  は、前記非線形混合プロセスによって生成される帯域制限スパイク信号  $M(T_{NL}, \quad, d_{NL})$  に対応し、

前記プロセッサによって、前記計算された到着時間を測定された到着時間  $T_{NL}$  と比較し、又は、前記計算された開始時間差を測定された開始時間差  $\quad$  と比較し、又はその両方を実行し、

前記計算された到着時間が前記測定された到着時間と異なり、また、前記計算された開始時間差が前記測定された開始時間差と異なる場合に、全ての受信機、第 1 の音響源、第 2 の音響源及び前記第 1 の円錐音響信号の仰角及び前記第 2 の円錐音響信号の仰角について、前記測定された到着時間と前記計算された到着時間との差及び前記計算された開始時間差と前記測定された開始時間差との差を用いて、トモグラフィー速度反転法もしくは全波形逆解析手法により、前記伝播速度モデルを更新し、

測定された到着時間と実質的に等しい計算された到着時間又は測定された開始時間差と実質的に等しい計算された開始時間差又はその両方が得られる伝播速度  $V_p$  及び伝播速度  $V_s$  を得るために、前記第 1 の音響源の複数の位置、前記第 2 の音響源の複数の位置、前記第 1 の円錐音響信号の複数の仰角、及び前記第 2 の円錐音響信号の複数の仰角について、前記合計伝播時間に対応する前記計算された到着時間が測定された到着時間と実質的に等しくなるまで、もしくは、前記計算された開始時間差が即知恵された開始時間差と実質的に等しくなるまで、又は、その両方が実現されるまで、上記工程を反復して繰り返す、方法。

#### 【請求項 184】

前記伝播速度モデルに基づいて、レイトレーシング又はそれ以外の音響数値モデリング技術を用い、音響伝播の軌跡及び伝播時間を計算する、請求項 183 に記載の方法。

#### 【請求項 185】

非線形特性の 3 次元画像、圧縮速度対せん断速度比の 3 次元画像、又はこれらの 2 つ以上の任意の組み合わせをマッピング、キルヒホッフ画像処理、ビーム画像処理、又は波動方程式画像処理によって、前記記録信号に基づいて生成し、又は、トモグラフィー速度反転法、全波形逆解析手法又はトモグラフィー速度反転法と組み合わせられた反復画像法を用いて、伝播圧縮速度、伝播せん断速度、又はその両方を、決定する、請求項 183 に記載の方法。

#### 【請求項 186】

非線形特性の 3 次元画像を生成する方法であって、

プロセッサによって、第 1 の周波数を有する第 1 の円錐音響信号を生成するように構成された第 1 の音響源の位置、第 2 の周波数を有する第 2 の円錐音響信号を生成するように構成された第 2 の音響源の位置、前記第 1 の円錐音響信号と前記第 2 の円錐音響信号とが交差する岩石層の混合ゾーンからポアホールに帰還する検出信号を受信するように構成された受信機の位置、及び前記第 1 の円錐音響信号及び前記第 2 の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向を含む測定パラメータを読み取り、

前記プロセッサによって、非線形相互作用信号を含む相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  を読み取り、到着時間  $t$ 、前記第 1 の円錐音響信号のブロードキャストの開始時間と前記第

10

20

30

40

50

2の円錐音響信号のブロードキャストの開始時間との開始時間差、及び前記第1の周波数と前記第2の周波数との周波数比 $d$ の関数であり、

前記プロセッサによって、初期伝播圧縮及びせん断速度モデルを読み取り、

前記プロセッサによって、前記伝播圧縮及びせん断速度モデルに基づいて、前記第1の音響源の位置及び前記第2の音響源の位置、並びに、前記第1の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向及び前記第2の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向を用いて、音響伝播の軌道を計算し、

前記第1の円錐音響信号と前記第2の円錐音響信号とが交差する交差領域ゾーンの空間座標を計算し、

前記プロセッサによって、到着時間 $t$ 、開始時間差、及び周波数比 $d$ の範囲において、前記相関信号 $M(t, \text{、} d)$ を計算して、前記到着時間 $T_{NL}$ の複数の値、前記開始時間差 $\text{、}$ の複数の値、前記周波数比 $d_{NL}$ の複数の値を決定し、前記到着時間 $T_{NL}$ 、前記開始時間差 $\text{、}$ 及び前記周波数比 $d_{NL}$ は、前記非線形混合プロセスによって生成される帯域制限スパイク信号 $M(T_{NL}, \text{、} d_{NL})$ に対応し、

前記非線形混合プロセスにより生成された前記帯域制限信号 $M(T_{NL}, \text{、} d_{NL})$ を、前記第1の円錐音響信号と前記第2の円錐音響信号とが交差する相互作用混合ゾーンの空間座標にマッピングし、

前記帯域制限スパイク信号 $M(T_{NL}, \text{、} d_{NL})$ の前記相互作用混合ゾーンの空間座標へのマッピングを、前記第1の音響源の位置の複数の値、前記第2の音響源の位置の複数の値、前記受信機の位置の複数の値、前記第1の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向の複数の値、前記第2の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向の複数の値、又はこれらの2以上の任意の組み合わせについて繰り返し、前記非線形混合プロセスの強さの3次元画像を得るためにマップされた相関信号を結合する、

方法。

#### 【請求項187】

圧縮速度対せん断速度比の3次元画像を生成する方法であって、

プロセッサによって、第1の周波数を有する第1の円錐音響信号を生成するように構成された第1の音響源の位置、第2の周波数を有する第2の円錐音響信号を生成するように構成された第2の音響源の位置、前記第1の円錐音響信号と前記第2の円錐音響信号とが交差する岩石層の混合ゾーンからボアホールに帰還する検出信号を受信するように構成された受信機の位置、及び前記第1の円錐音響信号及び前記第2の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向を含む測定パラメータを読み取り、

前記プロセッサによって、非線形相互作用信号を含む相関処理信号 $M(t, \text{、} d)$ を読み取り、到着時間 $t$ 、前記第1の円錐音響信号のブロードキャストの開始時間と前記第2の円錐音響信号のブロードキャストの開始時間との開始時間差、及び前記第1の周波数と前記第2の周波数との周波数比 $d$ の関数であり、

前記プロセッサによって、初期伝播圧縮及びせん断速度モデルを読み取り、

前記プロセッサによって、前記伝播圧縮及びせん断速度モデルに基づいて、前記第1の音響源の位置及び前記第2の音響源の位置、並びに、前記第1の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向及び前記第2の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向を用いて、音響伝播の軌道を計算し、

前記第1の円錐音響信号と前記第2の円錐音響信号とが交差する交差領域ゾーンの空間座標を計算し、

前記第1の円錐音響信号の前記円錐角及び円錐軸の方向及び前記第2の円錐音響信号の前記円錐角及び円錐軸の方向、前記第1の音響源の位置、及び前記受信機の位置に基づいて、前記第1の円錐音響信号と前記第2の円錐音響信号との間の収束角を計算し、

前記プロセッサによって、到着時間 $t$ 、開始時間差、及び周波数比 $d$ の値の範囲において、前記相関信号 $M(t, \text{、} d)$ を計算して、前記到着時間 $T_{NL}$ の複数の値、前記開始時間差 $\text{、}$ の複数の値、前記周波数比 $d_{NL}$ の複数の値を決定し、前記到着時間 $T_{NL}$ 、前記開始時間差 $\text{、}$ 及び前記周波数比 $d_{NL}$ は、前記非線形混合プロセスによ

10

20

30

40

50

って生成される帯域制限スパイク信号  $M(T_{NL}, N_L, d_{NL})$  に対応し、

検出された非線形信号となる前記周波数比  $d_{NL}$  を用いて前記速度比を計算し、前記周波数比と前記収束角との間の選択規則の関係を用いて前記収束角を計算し、

前記計算された速度比を前記混合ゾーンの前記空間座標にマッピングし、

前記速度比の前記混合ゾーンの前記空間座標へのマッピングを、前記第 1 の音響源の位置の複数の値、前記第 2 の音響源の位置の複数の値、前記受信機の位置の複数の値、前記第 1 の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向の複数の値、前記第 2 の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向の複数の値、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせについて繰り返し、前記速度比の 3 次元画像を得るためにマップされた相関信号を結合する、

方法。

10

【請求項 188】

ポアホール外部の岩石層の情報を調査するシステムであって、

ポアホール内に配置され、第 1 の周波数でのブロードキャストである第 1 の円錐音響信号を生成するように構成された第 1 の音響源と、

前記ポアホール内に配置され、第 2 の周波数でのブロードキャストである第 2 の円錐音響信号を生成するように構成された第 2 の音響源と、

を備え、

前記第 1 の周波数及び前記第 2 の周波数は、約 500 Hz から 500 kHz の間の周波数範囲にあり、前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源は、前記第 1 及び第 2 の音響信号の曲線が前記媒質内の混合領域において交差するように構成され、

20

前記ポアホール内に配置され、前記ポアホールに帰還する検出信号を受信するように構成された受信機であって、当該検出信号は、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との差に等しい周波数を有するとともに、前記非線形交差領域内の非線形混合ゾーンにおいて、前記第 1 の円錐音響信号及び前記第 2 の円錐音響信号に基づく非線形混合プロセスによって生成された信号である受信機と、

前記検出信号を記録及び記憶するとともに、前記記憶装置に記憶する、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響源の位置、前記受信機の位置、前記第 1 の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向、及び前記第 2 の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向を含む測定パラメータを記録及び記憶するように構成された記憶装置と、

をさらに備えるシステム。

30

【請求項 189】

前記第 1 の円錐音響信号を生成する前記第 1 の音響源及び前記第 2 の円錐音響信号を生成する前記第 2 の音響源は、単一のポアホール内に配置される、請求項 188 に記載のシステム。

【請求項 190】

前記第 1 の円錐音響信号及び前記第 2 の円錐音響信号が共線関係にない対称の軸を有するように、前記ポアホールは、直線状ではないか、又は、前記ポアホールは側線を備える、請求項 188 に記載のシステム。

【請求項 191】

前記第 1 の円錐音響信号は、符号化された時系列に配列された第 1 の複数のパルスを含み、前記第 1 の複数のパルスは時間的に分離されており、各パルスは中心周波数での第 1 の変調信号を備え、2 つの連続するパルスの中心周波数は異なっている、請求項 188 に記載のシステム。

40

【請求項 192】

前記複数のパルスにおける 2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔が各パルスの継続時間よりも大きい、請求項 191 に記載のシステム。

【請求項 193】

前記第 2 の円錐音響信号は、符号化された時系列に配列された第 2 の複数のパルスをを含み、前記第 2 の複数のパルスは時間的に隔たれており、2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第 1 の複数のパルスにおける 2 つの対応するパルスの中央間の時間間隔

50

と同様であり、開始時刻差は前記第 2 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻と前記第 1 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻との間で提供され、各パルスは変調信号を備えると共に前記第 2 の複数のパルスにおける各パルス内の前記変調信号の中心周波数は前記第 1 の複数のパルスにおける対応するパルスに対する前記変調信号の前記中心周波数の選択された分数周波数比  $d$  である、請求項 188 に記載のシステム。

【請求項 194】

前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源並びに前記受信機を制御し、前記第 1 の音響信号と前記第 2 の音響信号との間の複数の開始時間の差について、また、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との複数の周波数比について、前記第 1 の音響信号の生成、前記第 2 の音響信号の生成、及び前記検出信号の受信を繰り返す、請求項 193 に記載のシステム

10

【請求項 195】

前記第 1 の円錐音響信号と前記第 2 の円錐音響信号とが逆の極性を持つように、前記第 1 の円錐音響信号、前記第 2 円錐の音響信号又はその両方の位相を制御するように構成された位相制御部をさらに備える、請求項 188 に記載のシステム。

【請求項 196】

非線形相互作用信号を強化し線形相互作用信号及び雑音を最小化するために、前記第 1 の円錐音響信号及び前記第 2 の円錐音響信号から前記混合プロセスによって生成され前記受信機で検出された信号を、反対の極性を有する前記第 1 の円錐音響信号及び反対の極性を有する前記第 2 の円錐音響信号から前記混合プロセスによって生成され前記受信機で検出された信号に加えるように構成されたプロセッサをさらに備える、請求項 195 に記載のシステム。

20

【請求項 197】

複数の検出信号を受信するように構成された複数の検出器をさらに備え、前記複数の検出器によって受信される前記複数の検出信号に多次元フィルタリング法 (multi-dimensional filtering)、反射伝播時間差分析及びスタッキング法 (time move out analysis and stacking)、又はその両方を適用するように構成される、請求項 188 に記載のシステム。

【請求項 198】

前記検出器は、複数の成分検出器を備え、前記検出信号、は前記成分検出器による成分検出信号を含み、多次元フィルタリング法 (multi-dimensional filtering)、反射伝播時間差分析及びスタッキング法 (time move out analysis and stacking)、又はその両方を、前記複数の成分検出器によって受信される前記検出された複数の成分信号に適用するように構成される、請求項 197 に記載のシステム。

30

【請求項 199】

前記第 1 の音響源の異なる位置、前記第 2 の音響源の異なる位置、前記受信機の異なる位置、前記第 1 の音響源のブロードキャスト円錐角、前記第 2 の音響源のブロードキャスト円錐角、又はこれらの 2 つ以上の任意の組み合わせについて、前記第 1 の円錐音響信号の生成、前記第 2 の円錐音響信号の生成、及び前記検出信号の受信を繰り返すように前記第 1 の音響源、前記第 2 の音響源及び前記受信機を制御するように構成されたプロセッサをさらに含む、請求項 188 に記載のシステム。

40

【請求項 200】

前記第 1 の音響源及び前記第 2 の音響源から前記岩石層内における非線形相互作用により生成された前記記録検出信号から、前記非線形混合プロセスによって生成された信号を抽出及び強化し、また、線形相互作用プロセスもしくは雑音又はその両方によって生成された信号を抑圧するように構成されたプロセッサをさらに含む、請求項 188 に記載のシステム。

【請求項 201】

前記第 1 の円錐音響信号は、符号化された時系列に配列された第 1 の複数のパルスを含

50

み、前記第 1 の複数のパルスは時間的に分離されており、各パルスは中心周波数での第 1 の変調信号を備え、2 つの連続するパルスの中心周波数は異なっており、

前記第 2 の円錐音響信号は、符号化された時系列に配列された第 2 の複数のパルスをを含み、前記第 2 の複数のパルスは時間的に隔たれており、2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第 1 の複数のパルスにおける 2 つの対応するパルスの中央間の時間間隔と同様であり、開始時刻差は前記第 2 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻と前記第 1 の複数のパルスのブロードキャストの開始時刻との間で提供され、各パルスは前記第 2 の変調信号を備えると共に前記第 2 の複数のパルスにおける各パルス内の前記第 2 の変調信号の中心周波数は前記第 1 の複数のパルスにおける対応するパルスに対する前記第 1 の変調信号の前記中心周波数の選択された分数周波数比  $d$  であり、

10

前記記録データを読み出し、前記検出信号を、時系列に配置された複数のパルスを含むテンプレート信号と相関処理するように構成されたプロセッサをさらに備え、2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔は前記第 1 の複数のパルスにおける 2 つの対応するパルスの中央間の時間間隔と実質的に同じであり、前記複数のパルスにおける各パルスは、前記第 1 の複数のパルス及び前記第 2 の複数のパルスの対応する各々のパルス内に、前記第 1 の変調信号の中心周波数と前記第 2 の変調信号の中心周波数との差に等しい中心周波数を有する変調信号を含む、

請求項 188 に記載のシステム。

【請求項 202】

前記複数のパルスにおける 2 つの連続するパルスの中央間の時間間隔が各パルスの継続時間よりも大きい、請求項 201 に記載のシステム。

20

【請求項 203】

複数の開始時間差 について、また、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との複数の周波数比  $d$  について、前記テンプレート信号と前記検出信号との相関処理を繰り返し、非線形相互作用信号を含む相関処理信号  $M(t, \quad, d)$  を生成するように構成されたプロセッサをさらに備える、請求項 201 に記載のシステム。

【請求項 204】

非線形相互作用により生成される前記信号の期待帯域の周囲に狭い周波数帯域を維持するために、時変周波数バンドパスフィルタを前記検出信号に適用するように構成されたプロセッサをさらに備え、前記狭い周波数帯域幅は、各パルスの前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との差の周囲で選択される、請求項 203 に記載のシステム。

30

【請求項 205】

前記検出信号のホドグラム分析を実行するプロセッサをさらに備える、請求項 201 に記載のシステム。

【請求項 206】

前記岩石層内の音響信号の非線形相互作用に関する選択規則に従って、前記相互作用領域における前記混合ゾーンの位置を制御するために、前記第 1 の周波数の前記第 2 の周波数に対する周波数比もしくは開始時間差の範囲を走査し、又は、その両方を走査するように構成されたプロセッサをさらに備える、請求項 188 に記載のシステム。

【請求項 207】

前記第 1 の音響源は、前記ポアホール内で第 1 の軸方向に配置され、前記第 2 の音響源は、前記ポアホール内で第 2 の軸方向に配置され、前記第 1 の軸方向と前記第 2 の軸方向は、非共線方向又は非平行である、請求項 188 に記載のシステム。

40

【請求項 208】

前記第 1 の円錐音響信号と前記第 2 の円錐音響信号の交差軌跡に配置されている前記交差領域内で特定の混合ゾーンを選択するために、前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数の前記周波数比及び前記開始時間差を制御するように構成されたプロセッサをさらに備える、請求項 207 に記載のシステム。

【請求項 209】

前記第 1 の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と前記混合ゾーンの中心か

50

ら前記受信機までの伝播時間との合計によって、又は、前記第1の円錐音響信号と前記第2の円錐音響信号との間の前記混合ゾーンへの収束角によって、前記第1の音響信号、前記第2の音響信号、又はその両方の収束角及び周波数比の間の非線形相互作用選択規則関係に従って、前記第1の円錐ブロードキャストと前記第2の円錐ブロードキャストとの交差軌跡に配置されている混合ゾーンの間で区別するように構成されたプロセッサをさらに備える、請求項208に記載のシステム。

【請求項210】

前記第1の音響源は第1のボアホール内に配置され、前記第2の音響源は第2のボアホール内に配置され、前記受信機は前記第1のボアホール、前記第2のボアホール又は第3のボアホールのいずれかに配置される、請求項188に記載のシステム。

10

【請求項211】

前記円錐角もしくは円錐軸又はその両方は、前記第1の円錐音響信号及び前記第2の円錐音響信号が前記ボアホール周囲の前記岩石層内の目標領域において交差するように選択される、請求項210に記載のシステム。

【請求項212】

ボアホール周囲の岩石層の領域における圧縮速度の値もしくはせん断速度の値又はその両方を伝播時間トモグラフィ反転法 (travel time tomographic inversion) によって決定するプロセッサを備えたシステムであって、当該プロセッサは、

ボアホール内の採掘検層及び当該ボアホールから離れた位置の岩石層特性の水平方向の連続性に関する仮定を用いて、初期伝播速度モデルを推定し、

20

第1の円錐音響信号ブロードキャストの形態で第1の音響信号をブロードキャストする第1の音響源及び第2の円錐音響信号ブロードキャストの形態で第2の音響信号をブロードキャストする第2の音響源の位置、並びに、前記第1の円錐ブロードキャスト及び前記第2の円錐ブロードキャストに基づいて、混合ゾーンの空間座標を計算し、

前記第1の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間と当該混合ゾーンから前記受信機までの伝播時間との合計の伝播時間を計算し、

前記プロセッサによって、合ゾーンの中心までの伝播時間と前記第2の音響源から前記混合ゾーンの中心までの伝播時間との差を計算し、

相関処理信号  $M(t, \theta, d)$  を読み出し、当該相関処理信号  $M(t, \theta, d)$  は、到達時間  $t$ 、前記第2の音響信号と前記第1の音響信号との間の前記開始時間差  $\theta$ 、及び前記第1の音響信号の周波数と前記第2の音響信号の周波数との周波数比  $d$  の関数であり、非線形相互作用信号を含み、

30

前記信号  $M(t, \theta, d)$  内で、到着時間  $t$ 、開始時間差  $\theta$ 、及び周波数比  $d$  の値の全ての値を走査し、前記到着時間  $T_{NL}$ 、前記開始時間差  $\theta_{NL}$ 、前記周波数比  $d_{NL}$  及び  $M(T_{NL}, \theta_{NL}, d_{NL})$  の複数の値を決定し、前記到着時間  $T_{NL}$ 、前記開始時間差  $\theta_{NL}$ 、及び前記周波数比  $d_{NL}$  は、前記非線形混合プロセスによって生成される帯域制限スパイク信号  $M(T_{NL}, \theta_{NL}, d_{NL})$  に対応し、

前記プロセッサによって、前記計算された到着時間を測定された到着時間  $T_{NL}$  と比較し、又は、前記計算された開始時間差を測定された開始時間差  $\theta_{NL}$  と比較し、又はその両方を実行し、

40

前記計算された到着時間が前記測定された到着時間と異なり、また、前記計算された開始時間差が前記測定された開始時間差と異なる場合に、全ての受信機、第1の音響源、第2の音響源及びブロードキャスト仰角構成 (broadcast elevation configurations) について、前記測定された到着時間と前記計算された到着時間との差及び前記計算された開始時間差と前記測定された開始時間差との差を用いて、トモグラフィ速度反転法もしくは全波形逆解析手法により、前記伝播速度モデルを更新し、

測定された到着時間と実質的に等しい計算された到着時間又は測定された開始時間差と実質的に等しい計算された開始時間差又はその両方が得られる伝播速度  $V_p$  及び伝播速度

50

Vsを得るために、前記第1の音響源の複数の位置、前記第2の音響源の複数の位置、前記第1の音響信号及び前記第2の音響信号の複数の仰角について、前記合計伝播時間に対応する前記計算された到着時間が測定された到着時間と実質的に等しくなるまで、もしくは、前記計算された開始時間差が即知恵された開始時間差と実質的に等しくなるまで、又は、その両方が実現されるまで、上記工程を反復して繰り返す、

ように構成されたシステム。

【請求項213】

前記伝播速度モデルに基づいて、レイトレーシング又はそれ以外の音響数値モデリング技術を用い、音響伝播の軌跡及び伝播時間を計算するプロセッサをさらに備える、請求項212に記載のシステム。

10

【請求項214】

非線形特性の3次元画像、圧縮速度対せん断速度比の3次元画像、又はこれらの2つ以上の任意の組み合わせをマッピング、キルヒホッフ画像処理、ビーム画像処理、又は波動方程式画像処理によって、前記記録信号に基づいて生成し、又は、トモグラフィ速度反転法、全波形逆解析手法又はトモグラフィ速度反転法と組み合わせられた反復画像法を用いて、伝播圧縮速度、伝播せん断速度、又はその両方を、決定するプロセッサをさらに備える、請求項212に記載のシステム。

【請求項215】

非線形特性の3次元画像を生成するプロセッサを備えたシステムであって、当該プロセッサは、

20

プロセッサによって、第1の周波数を有する第1の円錐音響信号を生成するように構成された第1の音響源の位置、第2の周波数を有する第2の円錐音響信号を生成するように構成された第2の音響源の位置、前記第1の円錐音響信号と前記第2の円錐音響信号とが交差する岩石層の混合ゾーンからボアホールに帰還する検出信号を受信するように構成された受信機の位置、及び前記第1の円錐音響信号及び前記第2の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向を含む測定パラメータを読み取り、

非線形相互作用信号を含む相関処理信号  $M(t, \theta, d)$  を読み取り、到着時間  $t$ 、前記第1の円錐音響信号のブロードキャストの開始時間と前記第2の円錐音響信号のブロードキャストの開始時間との開始時間差  $\Delta t$ 、及び前記第1の周波数と前記第2の周波数との周波数比  $d$  の関数であり、

30

初期伝播圧縮及びせん断速度モデルを読み取り、

前記伝播圧縮及びせん断速度モデルに基づいて、前記第1の音響源の位置及び前記第2の音響源の位置、並びに、前記第1の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向及び前記第2の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向を用いて、音響伝播の軌道を計算し、

前記第1の円錐音響信号と前記第2の円錐音響信号とが交差する交差領域ゾーンの空間座標を計算し、

到着時間  $t$ 、開始時間差  $\Delta t$ 、及び周波数比  $d$  の範囲において、前記相関信号  $M(t, \theta, d)$  を計算して、前記到着時間  $T_{NL}$  の複数の値、前記開始時間差  $\Delta t_{NL}$  の複数の値、前記周波数比  $d_{NL}$  の複数の値を決定し、前記到着時間  $T_{NL}$ 、前記開始時間差  $\Delta t_{NL}$ 、及び前記周波数比  $d_{NL}$  は、前記非線形混合プロセスによって生成される帯域制限スパイク信号  $M(T_{NL}, \Delta t_{NL}, d_{NL})$  に対応し、

40

前記非線形混合プロセスにより生成された前記帯域制限信号  $M(T_{NL}, \Delta t_{NL}, d_{NL})$  を、前記第1の円錐音響信号と前記第2の円錐音響信号とが交差する相互作用混合ゾーンの空間座標にマッピングし、

前記帯域制限スパイク信号  $M(T_{NL}, \Delta t_{NL}, d_{NL})$  の前記相互作用混合ゾーンの空間座標へのマッピングを、前記第1の音響源の位置の複数の値、前記第2の音響源の位置の複数の値、前記受信機の位置の複数の値、前記第1の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向の複数の値、前記第2の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向の複数の値、又はこれらの2以上の任意の組み合わせについて繰り返し、前記非線形混合プロセスの強さの3次元画像を得るためにマップされた相関信号を結合する、

50

ように構成されているシステム。

【請求項 2 1 6】

圧縮速度対せん断速度比の 3 次元画像を生成するプロセッサを備えたシステムであって、当該プロセッサは、

第 1 の周波数を有する第 1 の円錐音響信号を生成するように構成された第 1 の音響源の位置、第 2 の周波数を有する第 2 の円錐音響信号を生成するように構成された第 2 の音響源の位置、前記第 1 の円錐音響信号と前記第 2 の円錐音響信号とが交差する岩石層の混合ゾーンからポアホールに帰還する検出信号を受信するように構成された受信機の位置、及び前記第 1 の円錐音響信号及び前記第 2 の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向を含む測定パラメータを読み取り、

非線形相互作用信号を含む相関処理信号  $M(t, \theta, d)$  を読み取り、到着時間  $t$ 、前記第 1 の円錐音響信号のブロードキャストの開始時間と前記第 2 の円錐音響信号のブロードキャストの開始時間との開始時間差  $\Delta t$ 、及び前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との周波数比  $d$  の関数であり、

初期伝播圧縮及びせん断速度モデルを読み取り、

前記伝播圧縮及びせん断速度モデルに基づいて、前記第 1 の音響源の位置及び前記第 2 の音響源の位置、並びに、前記第 1 の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向及び前記第 2 の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向を用いて、音響伝播の軌道を計算し、

前記第 1 の円錐音響信号と前記第 2 の円錐音響信号とが交差する交差領域ゾーンの空間座標を計算し、

前記第 1 の円錐音響信号の前記円錐角及び円錐軸の方向及び前記第 2 の円錐音響信号の前記円錐角及び円錐軸の方向、前記第 1 の音響源の位置、及び前記受信機の位置に基づいて、前記第 1 の円錐音響信号と前記第 2 の円錐音響信号との間の収束角を計算し、

到着時間  $t$ 、開始時間差  $\Delta t$ 、及び周波数比  $d$  の値の範囲において、前記相関信号  $M(t, \theta, d)$  を計算して、前記到着時間  $T_{NL}$  の複数の値、前記開始時間差  $\Delta t_{NL}$  の複数の値、前記周波数比  $d_{NL}$  の複数の値を決定し、前記到着時間  $T_{NL}$ 、前記開始時間差  $\Delta t_{NL}$ 、及び前記周波数比  $d_{NL}$  は、前記非線形混合プロセスによって生成される帯域制限スパイク信号  $M(T_{NL}, \Delta t_{NL}, d_{NL})$  に対応し、

検出された非線形信号となる前記周波数比  $d_{NL}$  を用いて前記速度比を計算し、前記周波数比と前記収束角との間の選択規則の関係を用いて前記収束角を計算し、

前記計算された速度比を前記混合ゾーンの前記空間座標にマッピングし、

前記速度比の前記混合ゾーンの前記空間座標へのマッピングを、前記第 1 の音響源の位置の複数の値、前記第 2 の音響源の位置の複数の値、前記受信機の位置の複数の値、前記第 1 の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向の複数の値、前記第 2 の円錐音響信号の円錐角及び円錐軸の方向の複数の値、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせについて繰り返し、前記速度比の 3 次元画像を得るためにマップされた相関信号を結合する、

ように構成されているシステム。

【請求項 2 1 7】

ポアホール周囲の岩石層の非線形特性を調査するシステムであって、

データ取得、データ制御及びデータ記録を実行する第 1 のサブシステムと、

前記第 1 のサブシステムと通信し、非線形性及び速度の暫定の画像化を実行するように構成された第 2 のサブシステムと、

前記第 1 のサブシステムと通信し、制御された音響ブロードキャストを放射し音響エネルギーを受信するように構成された第 3 のサブシステムと、

前記第 1 及び第 3 のサブシステムと通信し、前記岩石層に向かって音響波源信号を生成するように構成された第 4 のサブシステムと、

前記第 3 及び第 4 のサブシステムと通信し、前記岩石層の前記非線形特性を示す信号の検出を実行するように構成された第 5 のサブシステムと、

【請求項 2 1 8】

10

20

30

40

50



前記第 1 のサブシステムは、前記第 2 のサブシステム及びオペレータ入力を受信するように構成された取得モデリングモジュールを備える、請求項 2 1 7 に記載のシステム。

【請求項 2 1 9】

前記第 1 のサブシステムは、オペレータ入力及び取得設計モジュールからの入力を受信するように構成されたデータ取得制御部を備える、請求項 2 1 8 に記載のシステム。

【請求項 2 2 0】

前記第 1 のサブシステムは、データ前処理及び強化モジュール及びデータ記憶装置を備え、前記データ前処理及び強化モジュールは、前記データ記憶装置及び前記第 2 のサブシステムへの入力データを読み込むように構成される、請求項 2 1 9 に記載のシステム。

【請求項 2 2 1】

前記第 2 のサブシステムは、圧縮波及びせん断波のスローネス ( *compressional and shear slowness* ) に関する記録、及び、側方の連続性に関する情報を前記第 1 のサブシステムに提供するように構成された初期速度モデルモジュールを備える、請求項 2 1 7 に記載のシステム。

【請求項 2 2 2】

前記第 2 のサブシステムは、混合ゾーンにおける前記非線形相互作用によって生成された測定信号の振幅に関連付けられる伝播圧縮速度及びせん断速度領域の領域、速度比の画像、非線形性の画像を初期化するように構成された画像初期化モジュールを備える、請求項 2 2 1 に記載のシステム。

【請求項 2 2 3】

前記第 3 のサブシステムは、第 1 の音響源、第 2 の音響源、一以上の受信機、工具運搬輸送モジュール、工具機械的制御部、前記台 1 の信号の方向を制御する方向制御部、及び前記第 2 の音響信号の方向を制御する方向制御部を備える、請求項 2 1 7 に記載のシステム。

【請求項 2 2 4】

前記第 3 のサブシステムは、前記第 1 のサブシステムから、前記第 3 のサブシステム内で、前記第 1 の音響信号、前記第 2 の音響信号、又はその両方の方位角及び仰角を制御するために前記方向制御部を制御する命令を受信するように構成される、請求項 2 2 3 に記載のシステム。

【請求項 2 2 5】

工具構成及びブロードキャスト配置に関連する取得記録パラメータは、前記第 3 のサブシステムから収集され、前記第 1 のサブシステム内のデータ記録装置に記録される、請求項 2 2 3 に記載のシステム。

【請求項 2 2 6】

前記第 4 のサブシステムは、第 1 の信号を生成するように構成された信号生成器と、第 2 の取得信号を生成するように構成された信号生成器と、周波数乗算及び時間差モジュールと、コード化信号生成器と、を備える、請求項 2 1 7 に記載のシステム。

【請求項 2 2 7】

前記第 5 のサブシステムは、前記第 1 のサブシステムから入力命令を受信するように構成される、請求項 2 2 6 に記載のシステム。

【請求項 2 2 8】

請求項 2 2 7 に記載のシステム。前記第 4 のサブシステムは、前記コード化信号生成モジュールを用いてパルス列を生成するために、前記第 1 のサブシステムから入力命令を受信するように構成される、

【請求項 2 2 9】

前記コード化信号生成モジュールによって生成される前記コード化信号は、第 1 の周波数の第 1 の信号を前記第 1 の音響源に入力するための第 1 の信号制御及び乗算モジュールへの入力であり、前記コード化信号生成モジュールによって生成される前記コード化信号は、周波数乗算及び開始時間差モジュールへの入力であり、また、前記第 1 の信号に対

10

20

30

40

50

する開始時間差を有するとともに前記第 1 の周波数の選択された分数である第 2 の周波数を有する第 2 の信号を前記第 2 の音響源へ提供するために、第 2 の信号制御及び乗算モジュールへの入力となる、請求項 2 2 8 に記載のシステム。

【請求項 2 3 0】

前記開始時間差及び前記周波数の分数は、前記第 1 のサブシステム内のデータ記憶装置に記録ブロードキャスト情報として記憶される、請求項 2 2 9 に記載のシステム。

【請求項 2 3 1】

前記第 5 のサブシステムは、一以上の受信機から信号を受信するように構成された受信モジュールと、前記信号受信モジュールによって受信された信号を強化するように構成された非線形信号強化モジュールと、テンプレート信号を生成するように構成されたテンプレート信号生成モジュールと、前記受信信号を前記テンプレート信号と相関処理する信号相関モジュールと、を備える、請求項 2 1 7 に記載のシステム。

10

【請求項 2 3 2】

前記受信モジュールからの信号は、非線形源の成分を強化するとともに雑音を減少させるために、前記非線形信号強化モジュールによって処理され、前記受信モジュールからの信号及び強化された信号は、前記第 1 のサブシステム内のデータ記憶装置に記憶される、請求項 2 3 1 に記載のシステム。

【請求項 2 3 3】

前記テンプレート生成器は、テンプレート信号を生成するように構成され、前記相関モジュールは、相関処理された信号を抽出するために前記テンプレート信号を前記受信信号と相関処理するように構成され、当該相関処理された信号は、前記ポアホール周囲の前記岩石層内の非線形混合領域における第 1 の音響源からの第 1 の信号と第 2 の音響源からの第 2 の信号との交差で生成される信号を特定し、ここで、 $t$  は信号時間、 $f_1$  は前記第 1 の周波数と前記第 2 の周波数との周波数比、 $\tau$  は前記第 1 の信号と前記第 2 の信号との時間遅延である、請求項 2 3 1 に記載のシステム。

20

【請求項 2 3 4】

前記相関処理された信号は、前記第 1 のサブシステム内のデータ記憶装置に記憶される、請求項 2 3 3 に記載のシステム。

【請求項 2 3 5】

前記第 1 のサブシステム内のデータ取得制御部は、前記第 1 のサブシステムの前記記憶装置内での記録を繰り返し、前記第 1 の音響源の位置、前記第 2 の音響源の位置、前記受信機の位置、前記第 1 の音響信号の仰角、もしくは前記第 2 の音響信号の仰角、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせの複数の値から、前記相関処理されたデータを抽出するように構成された、請求項 2 3 4 に記載のシステム。

30

【請求項 2 3 6】

前記相関処理されたデータをさらに強化するために前記記憶装置内の記憶データを処理するように構成されたホドグラム分析モジュールを備える、請求項 2 3 5 に記載のシステム。

【請求項 2 3 7】

前記第 2 のサブシステムと通信し、前記岩石層の非線形特性の画像化を実行し、前記岩石層内での音響信号速度を決定するように構成された第 6 のサブシステムをさらに備える、請求項 2 1 7 に記載のシステム。

40

【請求項 2 3 8】

前記第 6 のサブシステムは、データ前処理及び、強化モジュール、速度モデル反復モジュール、画像化反復モジュール、速度比の画像及び / 又は非線形性の画像のための出力画像モジュール、決定された速度  $V_p$ 、速度  $V_s$ 、及び / 又は  $V_p / V_s$  速度比を出力する出力速度モジュール、又はこれらの 2 以上の任意の組み合わせを備える、請求項 2 3 7 に記載のシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

50

## 【 0 0 0 1 】

関連出願への相互参照

本出願は、2010年11月12日に出願された米国仮特許出願第61/413,173号からの優先権を主張するものであり、この出願の全内容が引用により本明細書に組み入れられる。

## 【 0 0 0 2 】

米国政府の権利

本発明は、米国エネルギー省によって認められた共同研究開発契約(CRADA)の契約番号DE-AC52-06NA25396に基づく米国政府の支援を得てなされた。米国政府は本発明について所定の権利を有する。

## 【 背景技術 】

## 【 0 0 0 3 】

本発明は、一般には岩石層の地震波探査に関し、より具体的には、ボアホール内音響源の組み合わせを使用してボアホールから離れた領域における非線形特性及び/又は縦波速度対横波速度比の3次元画像を生成すること、及び3波混合処理によって形成される第3の波を受信して解析することに関する。

## 【 0 0 0 4 】

地盤特性の音響探査は、使用する波源の寸法及び出力によって制限される傾向にあり、実際には、採掘孔用音響トランスデューサの出力はワイヤー線ケーブルの電力伝送能力によって制限される。高周波信号の浸透距離は相対的に短い、その一方、低周波信号を用いるためには、地層へ伝送されるエネルギーを最大化するとともに掘削孔内の不要信号を最小化するために、ボアホール壁に固定された大きな波源を必要とすることが多い。現時点では、音響ボアホール装置は、ボアホール内の音響源を念頭においており、ボアホール壁に沿って伝搬し、または、ボアホールを取り囲む岩石層の線形特性の不均一性によって散乱された帰還音響波(returning acoustic wave)を検出するように設計されている。Leggett, IIIらの米国特許第7,301,852号は、岩石層の境界を検出するように設計された探索中検層装置を開示している。この装置は、ボアホールから2つの音響波を放射する2つの音響源アレイを用い、ボアホールを取り囲む岩石層内における音響波の交差位置において、非線形混合によって、第3の波を生成する。当該第3の波は、前方に進行を続け、地盤特性の不均一性と線形に相互作用(interact linearly)する。当該第3の波は地盤特性の不均一性によって散乱され、散乱された信号が検層装置のセンサによって検出される。米国特許第7,301,852号は、当該第3の波を直接検出することは開示しておらず、岩石層の不均一性によって散乱された信号を検出するものである。米国特許第7,301,852号は、岩石層の境界を検出するために、散乱した波を利用しているに過ぎない。

## 【 0 0 0 5 】

油層探鉱や天然ガス探査地点においてボアホールから地層の非線形特性を明らかにするための試みが行われているが、いずれの方法にも限界がある。例えば、D'Angeloらの米国特許第5,521,882号は、受圧部(pressure receiver)を用いて、2つの波の非線形混合によって生成された非線形波を記録する音響装置を開示する。この非線形波は、ボアホール壁に沿って伝播し、周囲の岩石層にはあまり侵入せず、採掘孔泥水の方へ屈折する。非線形性の指標は、ボアホールを囲む岩石層の相対的な圧密の指標を提供するために用いられる。米国特許第5,521,882号は、ボアホールから離れている岩石層の非線形特性を測定することを開示していない。Khanの米国特許第6,175,536号には、第1のボアホールから地層へ送信され第2のボアホールで受信された地震波信号のスペクトル分析によって当該地層の非線形性の程度を推定する方法が開示されている。米国特許第6,175,536号の方法は、スペクトル分析に基づいて、第2のボアホールに位置する受信機において、第1のボアホールに配置された2つの音響源によって生成された伝送地震波信号の2つの選択周波数の合計又は差を表す周波数の存在を決定する。米国特許第6,175,536号は、受信機及び音響源をボア

10

20

30

40

50

ホールに配置し、ボアホールから離れた位置における岩石層の非線形特性を測定することについては開示していない。

【0006】

このような従来技術に照らして、ボアホールから離れた領域における非線形特性を明らかにするためのシステム及び方法が求められている。

【発明の概要】

【0007】

本開示の一態様は、ボアホール外部の岩石層を調査する方法を提供することである。当該方法は、第1の音響源によって第1の周波数の第1の音響波を生成すること、及び、第2の音響源によって第2の周波数の第2の音響波を生成すること、を含む。当該第1及び第2の音響源は、ボアホール内の局所的な領域内に配置される。当該第1及び第2の音響波は、ボアホール外部の交差領域において交差する。当該方法はさらに、第3の周波数の第3の音響波をボアホール内に配置された受信機で受信する。当該第3のせん断音響波は、上記交差領域内の非線形混合領域における非線形混合処理によりボアホール内に戻ってくる。当該第3の周波数は、前記第1の周波数と第2の周波数との差に等しい。

10

【0008】

本開示の他の態様は、ボアホール外部の岩石層を調査するシステムを提供することである。当該システムは、第1の周波数の第1の音響波を生成する第1の音響源と、第2の周波数の第2の音響波を生成する第2の音響源とを含む。当該第1及び第2の音響源は、ボアホール内の局所的な領域内に配置される。当該第1及び第2の音響波は、ボアホール外部の交差領域において交差する。当該システムはさらに、ボアホール内に配置され、第3の周波数の第3の音響波を受信する受信機を備える。当該第3のせん断音響波は、上記交差領域内の非線形混合ゾーンにおける非線形混合処理によりボアホール内に戻ってくる。当該第3の周波数は、前記第1の周波数と第2の周波数との差に等しい。

20

【0009】

本開示の一部の態様において、前記第1の音響波及び前記第2の音響波は、コード化音響信号を含む。本開示の他の態様において、前記第1の音響源及び前記第2の音響源は、円錐ブロードキャスト音響信号 (conical broadcast acoustic signal) を生成するように構成される。本開示のさらの他の態様において、岩石層の非線形特性を画像化するシステム及び方法、又は、圧縮速度を決定し、せん断速度を決定し、岩石層における当該圧縮速度とせん断速度との比を決定するシステム及び方法、又はこれらの任意の組み合わせが提供される。

30

【0010】

本開示のさらに他の態様において、ボアホール周囲の岩石層の非線形特性を調査するシステムが提供される。当該システムは、データ取得、データ制御及びデータ記録を行う第1のサブシステム、前記第1のサブシステムと通信し、非線形性及び速度の暫定の画像化を実行するように構成された第2のサブシステムと、前記第1のサブシステムと通信し、制御された音響ブロードキャストを放射し音響エネルギーを受信するように構成された第3のサブシステムと、前記第1及び第3のサブシステムと通信し、前記岩石層に向かって音響波源信号を生成するように構成された第4のサブシステムと、前記第3及び第4のサブシステムと通信し、前記岩石層の前記非線形特性を示す信号の検出を実行するように構成された第5のサブシステムと、を備える。

40

【0011】

本発明の上記及び上記以外の目的、特徴、及び性質、並びに、関連する構成要素の動作方法及び機能、そして製造における各部分の組み合わせと経済性については、添付図面を参照しつつ以下の詳細な説明と添付の特許請求の範囲を検討することによってさらに明らかになる。これらはいずれも本明細書の一部を構成する。本明細書において、同様の参照符号は種々の図における対応部分を表している。添付図面は例示及び説明のためのものであり、本発明の発明特定事項の定義として用いることは意図されていない。本明細書及び特許請求の範囲における用法によれば、単数形の「a」、「an」及び「the」には複

50

数のものへの言及が含まれる。ただし、文脈によって別に解すべきことが明白な場合はこの限りでない。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】図1は、本開示の様々な態様に従って、ボアホールから離れた領域における非線形特性の3次元画像を生成するための構成を示す。

【図2】図2は、本開示の様々な態様に従って、ボアホールから離れた領域における非線形特性の3次元画像を生成するための他の構成を示す。

【図3】図3は、本開示の様々な態様に従って、ボアホールから離れた領域における非線形特性の3次元画像を生成するためのさらに他の構成を示す。

【図4】図4は、本開示の様々な態様に従って、ボアホールから離れた領域における非線形特性の3次元画像を生成するためのフローチャートを示す。

【図5】図5は、2つの一次波がビームの場合における表1のビーム間相互作用の第1選択規則の数値シミュレーションを示す。

【図6】図6は、非線形混合選択規則によって支配される2つの一次音響波の非線形混合による差分周波数の第3の波の生成の幾何学的配置を示す。

【図7】図7は、ビームとブロードビーム又は平面波を用いてイメージングを行う本開示の一態様の適用を示す。

【図8】図8は、本開示の一態様に従って、非共線混合(non-collinear acoustic mixing)を用い、岩石層の非線形特性及び/又は $V_p/V_s$ 比を遠隔マッピング(remote mapping)するボアホールベースのシステムの構成例を示す。

【図9】図9aは、ブロードキャスト及び散乱音響波を表すベクトルを特定するために図8の構成を示す。図9bは、図9aの非線形混合を表すベクトルを示す。

【図10】図10aは、本開示の態様に従って、混合ゾーンの圧縮速度対せん断速度比 $V_p/V_s$ の範囲について、平面波周波数に対する混合係数の代表的な依存関係を表す。図10bは、 $P+P-SV$ 相互作用についての選択規則を満たす平面波周波数に対する収束角の代表的な依存関係を示す。図10cは、 $P+P-SV$ 相互作用についての選択規則を満たす平面波周波数に対する散乱角の代表的な依存関係を示す。

【図11】図11aから図11cは、本開示の態様に従って、ボアホールに帰還する散乱波を生成する非線形媒体における平面波の非共線相互作用の数値シミュレーションの結果の例を示す。

【図12】図12aは、本開示の態様に従って、一次音響波及び散乱音響波についての方向と伝播時間の代表例を示す。図12b~図12dは、本開示に一実施形態に従って、第1の音響源からのシミュレートされた信号、第2の音響源からのシミュレートされた信号、及びシミュレートされたテンプレート信号を示す。

【図13】図13aは、本開示に従って、第1及び第2の音響源及び受信器アレイの位置を示す。図13b~図13dは、本発明の一実施形態に従って、受信パルス列とモデル化信号の相関処理が、どのようにして受信機アレイにおける信号の到達時間を特定するかを示す。

【図14】図14aは、本開示に従って、第1及び第2の音響源及び受信器アレイの位置を示す。図14b~図14dは、本発明の態様に従って、一連のコード化パルスを送信し、信号対雑音比を改善するために相関技術を用いる効果を示す。

【図15】図15a及び図15bは、本開示の態様に従って、2つの同軸の円錐の交差部分において、ボアホール周囲におけるトロイド形状の非円錐混合配置の例を示す。

【図16】図16a及び図16bは、本開示の態様に従って、2つの交差する同軸の円錐の間にある非円錐混合配置の例を示す。

【図17】図17aは、本開示の態様に従って、折り曲がった孫井戸を有する単一反井配置の例を示す。ここでは、下方の円錐が上方の円錐と完全に交差する。図17bは、本開示の態様に従って、折り曲がった孫井戸を有する単一反井配置の他の例を示す。ここでは

10

20

30

40

50

、下方の送信機がボアホール軸にほぼ直交するエネルギーを放射する。

【図18】図18aは、本開示の態様に従って、抗井の垂直部分に受信機を有する垂直な抗井及び側線の例を示す。図18bは、本開示の態様に従って、受信機が側線内に設けられている垂直なパイロットホール及び水平な側線の他の例を示す。

【図19】図19は、本開示の態様に従って、測量設計、データ取得、データ処理及び画層かのためのシステムを模式的に示す。

【発明を実施するための形態】

【0013】

図1は、本開示の様々な態様に従って、ボアホールから離れた領域における非線形特性及び圧縮速度対せん断速度比の3次元画像を生成することができる複数の構成の1つを示す。第1音響源105はボアホール110内に設置されており、第1周波数 $f_1$ で音響エネルギーの可動一次ビームを生成する。第2音響源115もボアホール110内に配置されており、第2周波数 $f_2$ で音響エネルギーの可動一次ビームを生成する。一例として、第1音響源105及び第2音響源115はいずれもフェイズドアレイ音響源であってもよく、可動圧縮ビーム又は可動せん断ビームの一方を生成するように構成されていてもよい。本開示において、用語“音響の(acoustic)”は、P、SV、又はSHの音響モードを意味し得る。

10

【0014】

図1に示されるように、第1音響源105は第1装置本体120に配置され、第2音響源115は第2装置本体125に配置される。しかし、この開示は限定的なものではなく、第1装置本体120及び第2装置本体125を共通の装置本体(不図示)に共に配置することもできる。装置本体120及び125は、ボアホール110の長軸150に沿った平行移動及びボアホール110の長軸周りの方位角の回転155を含む少なくとも2自由度でボアホール110内を独立に移動できるように設けられる。第1音響源105は、ボアホール110内において第2音響源115の上方に配置されてもよく下方に配置されてもよい。装置本体120及び125は、ボアホール110内で搬送検層装置(不図示)に設けられてもよい。

20

【0015】

第1音響源105及び第2音響源115の所定の方位角方向に対して、第2音響源115によって生成されたビーム及び第1音響源105によって生成されたビームは、ボアホール110から離れた混合ゾーン130において集光及びインターセプトされるように構成される。ビームを独立に操縦することと音響源105、115間の角距離を変化させることを組み合わせることによってインターセプション角(angle of interception)を制御するときに、混合ゾーン130は、ビームとボアホールの長軸150とによって定義される平面内を移動する。混合ゾーン130のボアホール110からの距離は、ボアホール110のエッジ近辺から周辺の地下岩石層に約300メートル入ったところまでの幅がある。一例として、上記の段落において説明されている音響源アレイ105、115における隣接する要素間での位相差及び/又は開始時間の差は、一次ビームの音響エネルギーを特定の混合ゾーン130に集中させるために修正される。

30

【0016】

2つの波の間における地盤の非線形特性によって第3の弾性波が生成される。この第3の弾性波は、非線形物質(ここでは岩石層)において起こる3波混合処理によって生成される。この処理では、異なる周波数 $f_1$ 及び $f_2$ を有する2つの集束非共線波(一次波とも称される)が混合して、 $f_1 - f_2$ 、 $f_1 + f_2$ 、 $2 \times f_1$ 及び $2 \times f_2$ 等の調和周波数及び相互変調周波数を有する追加的な波が形成される。第3の波の強度は、混合ゾーンにおける岩石の非線形性の関数である。一例として、周波数 $f_1$ の一次圧縮(P)波及び周波数 $f_2$ の一次せん断(SV)波が非線形媒体を通過するときに、周波数 $f_1 - f_2$ の第3の圧縮(P)波又はせん断(SV)波が生成される。

40

【0017】

伝播選択規則(propagation selection rules)において

50

は、第3の波の伝播ベクトルは、2つの一次波の伝播ベクトルと同一面上にある。交角、 $f_1 / f_2$ 比、及び縦波速度対横波速度比を適宜組み合わせることにより、ポアホール110に戻る一次ビームに対して特定の角度の方向に伝播する周波数 $f_1$ 、 $f_2$ の第3の弾性波が得られる。

#### 【0018】

センサ又は受信機アレイ135は、ポアホール110に戻ってくる第3の波を検出するためにポアホール110内の特定の位置に配置される。図1に例示されるように、本開示の一態様におけるセンサアレイ135は、センサ装置本体140に接するが装置本体120及び125とは別個に配置されるセンサアレイを構成する2以上のセンサを含む。センサ135は、ポアホール110の長軸150に沿ってポアホール110内を独立して移動可能に構成される。例えば、センサ装置本体140は装置本体120及び125の下方に配置され、又は、装置本体120及び125の上方及び下方に配置される。一部の態様において、センサ装置本体140は、装置本体120及び125の一方又は両方と接続される。

10

#### 【0019】

第3の波は、センサアレイ135によって、ポアホール110内で検出される。図2は、図1と同様の配置を示す。図2においては、受信機135は、ポアホール壁に固定された3成分ジオフォン145を備える。到着する第3の波の到来方向を決定してシステムに冗長性を加えるために、得られた信号は情報処理によって傾角及び方位角に分解される。

#### 【0020】

一態様において、第1プロセッサ又は制御装置は、コンピュータ読み取り可能な命令（不図示）を実行し、音響源放射の制御及びセンサアレイ135によって記録されたデータの圧縮又はフィルタリング等の処理タスクを実行するように設けられ、構成されてもよい。一態様において、当該第1のプロセッサは、ポアホール110内に配置されてもよい。一態様においては、第2プロセッサを設けてもよく、当該第2プロセッサは、前記第1プロセッサを支援し又は前記第1プロセッサと異なる処理を実行するように構成されたコンピュータ読み取り可能な命令（不図示）を実行するように構成されてもよい。例えば、第2のプロセッサは、3次元画像を生成する際の一部分の処理又はすべての処理を実行することができる。送信機又は受信機（不図示）は、有線ケーブル（不図示）を介して坑上にデータを伝送するためにポアホール110内に配置されてもよい。一態様において、上記第2プロセッサは、例えば、ポアホールの外部に設けられてもよい。

20

30

#### 【0021】

音響源105、115の一方のポアホールに沿った所定の深さにおいて、ポアホール軸を通る平面において混合ゾーンを空間的に走査するために一定の相対方向の傾斜でビームを掃引し、混合ゾーンを回転走査するために音響源を方位角方向に回転し、アセンブリ全体をポアホール110に沿って移動させることにより、非線形特性を得るためにポアホール周囲の混合ゾーンの3次元領域を走査できる。音響源105、115及びセンサアレイ135を独立の装置本体に配置することにより、データの高い冗長性が得られ、探査の際の深さを変化させることができる。このようにして、非線形特性を得るためにポアホール周囲の岩石の3次元領域を調べることができ、帰還信号、すなわちセンサアレイ135によって検出された信号に基づいて非線形特性の3次元画像を処理及び計算することができる。

40

#### 【0022】

図3は、本開示の他の態様に従って、ポアホール110から離れた領域における非線形特性の3次元画像を生成するための他の構成を示す。図3の配置は、図2の配置と似ているが、主要な相違点は、ポアホール110内に配置されている音響源が可動指向性ビームに代えて弾性波（例えば球面波）を生成することである。図3に示されているとおり、第1音響源305は、ポアホール110内において第1装置本体320に接するように配置されており、第1周波数 $f_1$ を有する音響エネルギーの第1弾性波を生成する。第2音響源315は、ポアホール110内に第2装置本体325に接するように配置され、第2周

50

波数  $f_2$  を有する音響エネルギーの第2弾性波を生成する。音響源305、315によって生成される第1及び第2弾性波は、様々な混合ゾーン130においてボアホール110から離れた位置で交差するように構成される。受信機145は、ボアホール110内に配置されて、上述した3波混合処理によって混合ゾーン130で生成された第3の波を受信する。3波混合処理についてはさらに後述する。音響源305、315によって生成された波は本質的に無指向性なので、波の混合は混合ゾーン130の全領域において同時に発生し、図で表した面の外まで広がる。また、受信機145は指向性を有する傾向がある。この目的のために、一例として3成分ジオフォソアレイを用いることができる。得られた信号は、仰角・方位角及び伝播時間の範囲において、情報処理により複数の到来信号に分解される。音響源305、315及び受信機145の位置、伝播時間、及び分解された指向性を有する到着方向を前提とすると、以下の段落で説明される選択規則を適用して第3の波が生成された固有の混合ゾーンを決定するための十分な情報があるといえる。この固有の写像により、受信信号の特性に基づいて3次元(3D)画像を生成することができる。

10

#### 【0023】

図4は、本発明の一態様に従って、搬送検層装置を用いて非線形特性の3次元画像及び縦波速度対横波速度比を形成する方法のためのフローチャートを示す。この方法では、まずステップ405において、第1周波数の可動ビーム弾性エネルギーを生成する第1音響源がボアホール内に配置され、また、第2周波数の可動ビーム弾性エネルギーを生成する第2音響源がボアホール内に配置される。この第1及び第2周波数の可動ビームは、ボアホールから離れた位置で交差するように配置される。このように、第2ビームの方位角は第1ビームの方位角と同じであるが、ボアホールの長軸に対する仰角が異なる。次に、ステップ410に進み、第3の弾性波がボアホール内でセンサアレイによって受信される。上述のとおり、第3の弾性波は、第1周波数と第2周波数との差に等しい周波数を有し、ボアホールに向かう伝播方向を有するように混合処理によって生成される。ステップ415では、第1音響源及び第2音響源の配置及び第3の波の特性に基づき、選択規則に従って、ボアホールから離れた混合位置が決定される。ステップ420では、複数の方位角、仰角、及びボアホール内での長手方向における位置においてステップ405の生成処理、ステップ410の受信処理、及びステップ415の決定処理を繰り返すことによって、記録されたデータを用いて非線形特性の3次元画像が生成される。圧縮せん断相互作用がある場合には、上記の段落で説明されたように、圧縮速度/せん断速度( $V_p/V_s$ )比を得るために、受信信号がステップ425において分析される。ステップ430では、非線形特性が、流体飽和率、有効応力、岩盤割れ目密度、及び鉱物特性等の物理的な貯留層特性に変換される。

20

30

#### 【0024】

本開示の一部の態様において、第1音響源及び第2音響源は、ビーム、円筒波、又は球面波の音響源であってもよく、センサアレイは、無指向性単一成分センサ及び3成分ジオフォソアの任意を組み合わせを用いることができる。成分部分の組み合わせを変えることにより、信号処理及びイメージングにおける冗長性の程度を変更することができる。

#### 【0025】

周波数  $f_1$  の一次圧縮(P)波及び周波数  $f_2$  の一次せん断(S)波が非線形媒体において交差する特別な場合には、周波数  $f_1 \cdot f_2$  を有する第3のP波又はS波が生成される。一次P波及びS波はそれぞれ波動ベクトル  $k_1$  及び  $k_2$  を有するビームであり、非線形の地盤特性が一樣な場合には、生成された第3の波は、波の相互作用の運動学(kinematics)に基づき、選択規則  $k_1 \cdot k_2 = k_3$  に従った波動ベクトル  $k_3$  を有する平面波であることが要請される。この選択規則は、一次波の許容される交角及び第3の波の具体的な伝播方向に厳しい制約を課す。2つの線形平面波の非線形混合の一般的な運動論、選択規則、及び振幅応答については、Jones and Kobett (1963)、Rollins, Taylor et al. (1964)、及びKorneev, Nihei and Myer (1998)においてさらに説明されている。これ

40

50



らの文献は参照により全体として本明細書に組み込まれる。これらの文献は、混合媒体の非線形パラメータと非線形混合の信号強度との間の具体的な関係を提供する。例えば、Korneev, Nihei and Myerの式53及び式54は、P平面波及びSV（垂直に偏波したせん断波）平面波の混合強度が岩石の非線形パラメータの具体的な組み合わせに比例することを示している。

【0026】

2つの弾性平面波の非線形相互作用を支配する選択規則は、2つの弾性ビームの相互作用のガイダンスとして用いることができる。これらの平面波選択規則により、以下の6つの非線形相互作用が後方散乱波を生成することになる。

【0027】

2つの弾性平面波の非線形相互作用を支配する選択規則。この表及び本明細書において  $f_1$  は  $f_2$  よりも大きいものとする。

【0028】

【表1】

| 選択規則 | 第1のビーム又は波 | 第2のビーム又は波 | 第1及び第2のビームを加算して得られた第3のビーム又は波 |
|------|-----------|-----------|------------------------------|
| 1    | $P(f_1)$  | $SV(f_2)$ | $P(f_1 - f_2)$               |
| 2    | $P(f_1)$  | $SV(f_2)$ | $SV(f_1 - f_2)$              |
| 3    | $P(f_1)$  | $SH(f_2)$ | $SH(f_1 - f_2)$              |
| 4    | $P(f_1)$  | $SV(f_2)$ | $P(f_1 + f_2)$               |
| 5    | $SV(f_1)$ | $SV(f_2)$ | $P(f_1 + f_2)$               |
| 6    | $SH(f_1)$ | $SH(f_2)$ | $P(f_1 + f_2)$               |

図5(a)、図5(b)、及び図5(c)は、2つの一次波がビーム間相互作用のビームである場合における表1の選択規則の数値シミュレーションを示す。図5(a)に示されている25kHzの圧縮ビームと図5(b)に示されている18kHzせん断ビームとが混合して、図5(c)に示されている周波数が7kHz(=25kHz-18kHz)の第3のビームが生成される。この例では、前記平面波予測に従って、周波数( $f_1 - f_2$ )で $P(f_1)$ 波に対して133°の角度を有する第3の後方伝播Pビームが、 $P(f_1)$ と $SV(f_2)$ ビームとが重なる領域での非線形混合によって生成される。

【0029】

ビームの非線形相互作用の運動学によって、波動ベクトル及び周波数の特定の組み合わせが生成される。この第3の波は、特定の伝播時間、並びに $f_3 = f_1 - f_2$ 及び $k_3 = k_1 - k_2$ 等で表される特定の周波数 $f_3$ 及び波動ベクトル $k_3$ で戻ってくる。 $f_1$ 、 $f_2$ 、 $k_1$ 、及び $k_2$ の組み合わせについて、同一平面における第3の波のwell-definedな伝播波動ベクトル $k_3$ ( $k_1$ 及び $k_2$ で定義される)が存在する。特定の受信機位置及び2つの一次波 $k_1$ 及び $k_2$ の非線形混合が起こる位置で検出された信号の間には直接の対応がある。受信機の信号強度は、他の要素の中でも特に混合ゾーンにおける岩石の非線形性の強度に比例し、ベクトル $k_3$ 上にある受信機において最大となる。したがって、受信機における信号強度は、例えば、図1に示されるビーム軌跡に沿って、岩石の非線形性に幾何学的にマッピングされる。

【0030】

波の伝播についての幾何学理論によって、混合ゾーンにおいて生成されるビームは、特定の時間遅延後に、ポアホールの3つの波動ベクトル $k_1$ 、 $k_2$ 及び $k_3$ の配置によって定義される特定の受信機に到来することが示される。ポアホール内の特定の位置において特定の時刻に得られる信号の強度は、交差位置の非線形性の程度に依存する。したがって、ビームに沿った岩石の3次元特性の相対的な強度の時間画像を構成できる。受信機にお

ける信号の振幅の大きさは、それ自身が混合ゾーンの石油物理学的特性を示す。ビーム及び平面波が収束角を保ったまま方位角及び仰角ついて走査される場合には、ポアホール周囲の岩石の非線形特性の局所的な周方向及び径方向の3次元画像を得ることができる。アッセンブリ全体をポアホールの上下に移動させることによって、ポアホール周囲の岩石の非線形特性の3次元画像を繰り返し得ることができる。これらの繰り返し得られた画像の重み重合を生成することにより、ポアホール全体の周囲にある岩石の非線形特性の画像を以下で説明するコンピュータ処理により生成することができる。また、音響源及び受信機が3つの別個の装置本体の一部になっている場合には、そのうちの1つ又は2つを動かし、3つ目のものを固定しておくことができる(例えば、受信機装置本体が上下動されるときに音響源を固定しておく)。または、装置本体同士が異なる間隔を有するようにして坑井への降下を行ってもよい。

10

【0031】

弾性ビームとより幅の広いビーム(準平面波)との間の非線形混合については、選択規則が緩和されている。ビーム幅が前記第3の波の約10波長である場合には、波動ベクトル  $k_3 = k_1 - k_2$  を中心とした周波数  $f_1 - f_2$  の第3の波が一次ビームに沿って継続的に生成される。 $f_3 = f_1 - f_2$  の周波数に対して得られる信号強度は、混合領域の平均非線形特性、周波数  $f_1$  の平均伝播速度と周波数  $f_2$  の平均伝播速度との比( $f_1$  及び  $f_2$  を有するビーム圧縮波又はせん断波であってもよい)、混合ゾーンの領域、及び混合の配置の関数である。この関数は、様々な混合モードについて計算される。例えば、 $f_1$  に対する圧縮波P及び  $f_2$  に対するSV等の特定の混合モードについての信号強度は、以下の式1で与えられる。

20

【0032】

【数1】

$$U = 2\pi^2 \beta_{PS,P} A_1 B_2 \frac{f_1 f_2 (f_1 - f_2) V_{PS,P}}{V_p^2 V_s} F_{PSVP} \Delta_{PS,P} \quad (1)$$

ここで、Uは前記ポアホールで受信された前記第3の波の変位振幅であり、A1は圧縮波の縦偏極であり、B2はせん断波の横偏極である。は、Landau and LifschitzのA、B及びCパラメータの関数であり、混合ゾーンにおける岩石の非線形性を表す。は混合ゾーンの体積であり、rは混合ゾーンから受信機までの距離である。Fは入射ビームの配置に依存し特定の幾何学的配置について数値計算できる一次の幾何形状因子(geometric form factor)である。は、波動ベクトル  $k_1$ 、 $k_2$  及び  $k_3$  の数値計算可能な関数であり、相互作用の幾何学的配置が当該選択規則に従う場合にのみ重要な選択規則形状因子(selection rule form factor)である。式における下付文字のPSVPは、圧縮波を生成する圧縮せん断相互作用について言及するものである。

30

【0033】

本開示の一部の態様に従って、圧縮速度対せん断速度比の画像は、以下のようにして生成される。図6に示されるように、音響源の1つが周波数  $f_1$  の圧縮波(P波)を生成し、他の音響源が周波数  $f_2$  のSV波を生成し、この両方の波が特定の交差領域に向けられたときに、差分周波数  $f_3 = f_1 - f_2$  の第3の圧縮波(P波)の伝播方向が、選択規則によって決定される混合ゾーンにおける岩石の平均  $\text{in situ } V_p / V_s$  比によって制御される。図2又は図3の3成分受信機アレイ145における信号の測定値に基づいて、第3の波の方向が決定され、これにより混合ゾーンの  $\text{in situ } V_p / V_s$  が計算される。ビーム及び平面波が必要な収束角を保ったまま方位角及び仰角について走査される場合には、前記ポアホール周囲の岩石の  $\text{in situ } V_p / V_s$  比の局所的な周方向及び径方向の3次元画像が得られる。アッセンブリ全体を前記ポアホール内で上下動させることにより、前記ポアホール周囲の岩石の  $\text{in situ } V_p / V_s$  の3次元画像を繰り返し取得できる。これらの繰り返し取得された画像の重み重合を生成することにより、ポアホール全体の周囲の岩石の  $\text{in situ } V_p / V_s$  の画像が、以下のコ

40

50

ンピュータ処理により生成される。または、装置本体同士が異なる間隔を有するようにして坑井への降下を行ってもよい。

【0034】

本開示の一部の態様では、一次ビームの周波数  $f_1$  の  $f_2$  に対する比を走査することにより、 $V_p/V_s$  比の別の決定方法が実現される。図6は、図1の構成において生成される2つのビームの相互作用の幾何学的配置を示す。この幾何学的配置は、ベクトル解析及び上記の段落において説明した三角法を用いて分析される。ベクトル  $k_1$  及び  $k_2$  の長さ  $k_1$  及び長さ  $k_2$  は、対応する周波数及び速度の比によって定義される。図6に示したとおり、リターン角 (returning angle) は、 $f_1/f_2$ 、 $V_p/V_s$  比、及び2つの一次ビームの交角の関数である。また、物理的な選択規則によって、第3の波は、図5に示した例のような  $f_1/f_2$ 、 $V_p/V_s$  比、及びインターセプション角の特定の組み合わせにおいてのみ生成が可能となる。

10

【0035】

$V_p/V_s$  比の記号  $r$  及び図6で定義された文言を用いることにより、ベクトル  $k_3$  の大きさ  $k_3$  は、 $k_1$  と  $-k_2$  のベクトル和、すなわち、以下の式

【0036】

【数2】

$$k_3 = |k_1 - k_2| = \frac{f_1 - f_2}{V_p}$$

20

と、以下の余弦法則によって与えられる。

【0037】

【数3】

$$k_3^2 = k_1^2 + k_2^2 - 2k_1k_2 \cos \theta$$

この2つの式を組み合わせ、 $k_1$  に  $f_1/V_p$  を代入し、 $k_2$  に  $f_2/V_s$  を代入すると、選択規則によって課される幾何学的条件の表現が導かれる。以下の二次方程式は、 $r$ 、混合ゾーンの  $V_p/V_s$  比について解くことができる。

30

【0038】

【数4】

$$\frac{f_2}{f_1} r^2 - 2r \cos \theta - \frac{f_2}{f_1} + 2 = 0$$

これにより、特定の混合領域の *in situ*  $V_p/V_s$  比を評価する別の例示的な方法が導かれる。この方法は以下のシーケンスで表される。a) 標準的な音波波形ログを記録してボアホール近くの  $V_p$  及び  $V_s$  を決定し、フェイズド音響源アレイの隣接する要素の間の位相差を推定するためのデータを取得し、測定対象の幾何学的配置におけるおおよその収束角にビームを向ける。b) 制御角の方向で集束しボアホール周囲の特定の空間において混合するように P 音響源及び SV 音響源を操作する。c)  $f_1$  を固定したまま  $f_2$  を変動させ、ボアホール内のセンサで差分周波数  $f_1 - f_2$  の受信信号の振幅を測定する。d) アレイ中の各受信機の信号が最大振幅強度に達した周波数を特定する。e) 音響源及び受信機の幾何学的配置から角度及び角度を決定する。傾斜方向においてビームを掃引し、方位角方向にビームを回転し、アセンブリ全体を前記ボアホールの上下方向に動かし、これらの操作を繰り返すことにより、前記ボアホール周囲の3次元領域の  $V_p/V_s$  比を探查し、これにより前記ボアホール周囲の岩石の *in situ*  $V_p/V_s$  比の3次元画像を取得することができる。

40

【0039】

50

上述した方法は、周波数の差分  $f_1 - f_2$  をはっきり特定し、スペクトル解析を行って測定信号対雑音比を改善できる。また、両周波数  $f_1$  及び  $f_2$  が同時に比例的にチャープする場合には、得られる差分周波数信号  $f_1 - f_2$  もはっきりとしたチャープ信号になる。時変符号には、第1のビーム/波、第2のビーム/波、又は第1のビーム/波及び第2のビーム/波の両方における振幅変動、周波数変動、及び/又は位相変動の単数又は複数を含む。一次周波数のうちの1つを周波数比を固定したまま周波数で掃引した場合に第3の差分波は広帯域になる。このように、得られた第3のビーム  $f_2 - f_1$  は同じ方向を保ったまま広い周波数帯で掃引される。これにより、チャープ信号又は符号化された信号の標準的な自己相関によって信号対雑音比を改善することができる。

【0040】

波動ベクトル  $k_3 = k_1 - k_2$  は *well-defined* であるため、受信機 135 において記録された第3の波における信号と雑音を、ポアホールにおいて3成分受信機を利用してさらに区別できる。例えば、3成分受信機の信号は、ホドグラム解析等の技術により特定の指向性を有するようになる。

【0041】

本開示の一部の態様においては、上記の工程を逆の極性（180度の位相差）の音響源信号を用いて繰り返し行ってその結果を合計することにより信号対雑音比を改善することができる。リターン差分周波数信号の振幅は2つの一次波の振幅の積に比例し一次音響源が反転しても極性が反転しないため、リターン差分周波数信号はコヒーレントに重ね合わされる。他方、当該システムの一次音響源によって生成される線形雑音は極性を反転させるため、重ね合わせにより相殺される。

【0042】

ビームと波の様々な非排他的な組み合わせを用いて代替的な方法を実現できる。一例として、音響信号及び地震波信号のコンピュータ処理により画像を生成する方法は以下の工程を含む。当該方法は、第1に、非線形混合処理により生成された第3の波の信号を分離するために、記録された第3の波の周波数成分のスペクトル解析及び差分周波数信号の適当な選択規則を実行する。センサが3成分ジオフォンを含む場合には、方向技術（*orientation techniques*）を用いてポアホールにぶつかる第3の波の方向を決定する。続いて、非線形媒体における非共線混合の選択規則、第1ビーム、第2ビーム及び第3の波の波数並びに2つのビーム音響源及びセンサレイの位置に基づいて、記録された第3の波の振幅を一次混合波の周波数比の関数として分析し、第3の波の信号が発生した混合位置を決定する。続いて、各音響源・受信機の組み合わせについてチャープされた送信機信号を用いて、受信信号の相互相関により地震波形（*seismogram*）を生成する。続いて、時間と距離の一方又は両方においてポアホール周囲の地盤の非線形特性の3次元画像を得るために、全データセットに対して3次元時間画像処理又は3次元深度画像処理を行う。地震波形から画像を生成する方法は公知である。例えば、*Hill et al.* には、ビームから画像を形成する特定な場合の一般的な方法が記載されている。*Hill et al.* は、参照により全体として本明細書に組み込まれる。

【0043】

図7は、他の代替的な画像処理方法を例示する。図7は、狭いビーム705及び広いビーム710が相互作用する場合を示す。探索される領域の  $V_p$  及び  $V_s$  の滑らかな背景モデルを仮定し、選択規則を適用することにより、狭いビームに沿った混合ゾーン730について受信機位置735において検出されるエネルギーの幾何学的写像が可能になる。このようにして、非線形特性の時間画像を狭いビームに沿って生成することができる。方位角方向に回転しアセンブリをポアホールに沿って動かすことにより、ポアホール周辺の領域の3次元時間画像を生成することができる。異なるビーム仰角での測定の連続した繰り返し、 $f_2 / f_1$  で表される周波数比を変更することにより、一連の3次元時間画像を生成することができる。画像処理におけるこの冗長性によって、滑らかな背景モデル及び3次元空間画像をさらに改良することができる。

【0044】

10

20

30

40

50

岩石の非線形パラメータは、天然ガス、石油、及び水の飽和率の変動、有効応力、岩盤割れ目密度及び鉱物含有量等の多数の重要な炭化水素貯留層パラメータに関連することが分かった。本開示の一態様において、上記の方法により生成された非線形特性の3次元画像は、記録時におけるボアホール周辺における特性の分布に関する定量的な情報を提供するように変換される。また、本方法を連続的に繰り返すことにより、貯留層を監視するために、貯留層特性の時間変化を検出することができる。

【0045】

受信した波形の記録は、地盤の非線形特性の画像を生成するために処理される。ビームの指向性及び伝播時間によって、散乱波の生成場所を特定することができ、これにより、当該方法は、従来の無指向性モノポール音響源及びダイポール音響源を用いた通常の音響画像処理技術に基づく技術と区別される。

10

【0046】

一例として、周波数  $f_1$  の一次圧縮 (P) 波及び周波数  $f_2$  の一次圧縮 (P) 波が非線形媒体を通過するとき、前記の選択規則が守られ、周波数  $f_1$ 、 $f_2$  の第3のせん断 (SV) 波を生成することができる。この具体的な構成を用いることにより、ボアホールからの様々な測定距離範囲について、 $V_p/V_s$  速度比及びボアホール周辺の岩石層の非線形特性の3D画像が生成される。せん断波 (すなわち P + P SV) を生成するための圧縮非線形混合の具体例は、以下の段落において、測定及び分析のための多くのコンセプト、方法、処理及びシステムを説明するために用いられる。これらは、同様に P + SV SV や、第3の波を生成するための2つの音響圧縮波又は音響せん断波の任意の置換にも同様に適用される。

20

【0047】

図8は、本開示の一態様に従って、非共線混合 (non-collinear acoustic mixing) を用い、岩石層の非線形特性及び  $V_p/V_s$  速度比を遠隔マッピング (remote mapping) するボアホールベースのシステムの構成例を示す。ボアホール800内の送信機801、802の上方アレイ及び下方アレイからの2つの一次音響ビーム、例えば、圧縮 (P) 波は、当該ボアホールを囲む岩石層に向けられる。

【0048】

送信機アレイは、音響エネルギーが任意の方位角  $\theta_1$  809及び  $\theta_2$  811及び仰角  $\phi_1$  810及び  $\phi_2$  812の方向に伝播するように、方向を合わせられる。好適な仰角  $\phi_1$ 、 $\phi_2$  及び方位角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  について、岩石層を伝播する2つの一次Pビームは、ボアホール800から離れた混合ゾーン805において収束角  $\alpha$  で交差する。収束角  $\alpha$  は、2つの収束ビームの方向の間の角度として定義され、図8においては、2つの送信機801及び802を混合ゾーン805につなげる線で表されている。交差する点における岩石層が非線形特性を有している場合には、二次 (S) せん断波 SV (例えば、2つの交差する圧縮波の軸によって定義される平面において偏波したせん断波) が、非線形交差によって生成される。この二次せん断波は、散乱角  $\theta_3$  806によって表される選択規則によって定義される。この散乱角  $\theta_3$  は、下方の送信機からの音響波の軸と、散乱波の軸との間の角度として定義される。図示された構成においては、エネルギー807はボアホールに戻り、受信機又は受信機803のアレイによって記録される。

30

40

【0049】

上記のとおり、二次せん断波の生成に好適な条件は、エネルギー保存及び運動量保存に由来する選択規則に基づいて推論される。二次波Sは、以下の条件のいずれかに従わなければならない。

$$f_3 = f_1 - f_2 \quad (2)$$

$$k_3 = k_1 - k_2 \quad (3)$$

又は、

$$f_3 = f_1 + f_2 \quad (4)$$

$$k_3 = k_1 + k_2 \quad (5)$$

50

ここで、 $k_1$ 、 $k_2$  及び  $k_3$  は、波動ベクトルである。 $f_3 = f_1 - f_2$  が成り立つ第 1 の周波数条件は、ポアホール近くの岩石層の特性を調査する際に特に関連する。図 9 に示すように、条件 (2) 及び条件 (3) は、波動ベクトル三角形の形成によって表され、以下の関係 (6)、(7) 及び (8) によって満足される。

【 0 0 5 0 】

【 数 5 】

$$|k_3| = 2\pi|f_1 - f_2| / V_s = (|f_1 - f_2| / V_p) \times (V_p / V_s) \quad (6)$$

【 0 0 5 1 】

【 数 6 】

$$|k_1| = 2\pi f_1 / V_p \quad (7)$$

【 0 0 5 2 】

【 数 7 】

$$|k_2| = 2\pi f_2 / V_p \quad (8)$$

これらの条件は、図 9 b のベクトル図における三角法を用いることにより、式 (9) 及び式 (10) が成り立つときに、満たされることが示される。

【 0 0 5 3 】

【 数 8 】

$$\sin(\theta/2) = \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) \frac{\sqrt{(V_p/V_s)^2 - 1}}{2\sqrt{\frac{f_2}{f_1}}} \quad (9)$$

【 0 0 5 4 】

【 数 9 】

$$\sin(\psi) = (f_2/f_1) \times \sin(\theta) / (1 - f_2/f_1) \quad (10)$$

多くの堆積岩において  $V_p / V_s$  速度比は 1.5 ~ 3.0 の範囲にあるので、図 9 a に示す構成においてポアホールに戻るように伝播する二次せん断波 SV の生成を許容する収束角 と周波数比  $f_1 / f_2$  (本明細書において  $d$  で表される。) との組み合わせが存在する。

【 0 0 5 5 】

上記のとおり、交差する非共線平面波の非線形相互作用によって生成される音響エネルギーの振る舞いは計算可能である。選択規則は、1 セットの許容される相互作用を定義する。P + P SV 相互作用は、表 1 における部分的な列挙に対して付加的なものである。これらの様々な相互作用は、収束波が圧縮波かせん断波か、交差位置における物質の  $V_p / V_s$  速度比に応じて変わり、また、合計 ( $f_1 + f_2$ ) 周波数エネルギー及び差分 ( $f_1 - f_2$ ) 周波数エネルギーを生成する相互作用によって変化する収束角、周波数比、及び散乱角の所定の組み合わせを用いる。以下の例において示される配置は、P ( $f_1$ ) + P ( $f_2$ ) V ( $f_1 - f_2$ ) 相互作用に基づくものであり、類似の配置が、差分周波数共鳴 (difference frequency resonance) 又は合計周波数共鳴 (sum frequency resonance) を生成する他の許容される相互作用、例えば、P ( $f_1$ ) + SV ( $f_2$ ) SV ( $f_1 - f_2$ ) 及び P ( $f_1$ ) + SV ( $f_2$ ) P ( $f_1 - f_2$ ) について同様に示される。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 6 】

例えば、 $P(f_1) + P(f_2) - SV(f_1, f_2)$  を考えると、図 10 a は、混合係数  $W$  を 2 つの音響源の周波数比の関数として表す。混合係数  $W$  は、散乱波を生成する変換の効率の大きさの基準であり、式 ( 1 1 ) で表される。

【 0 0 5 7 】

【 数 1 0 】

$$W = D \frac{(1 + f_1/f_2) \sin(2\theta) \times m}{2(V_s/V_p)}$$

(11)

10

ここで、 $D$  は、式 ( 1 2 ) に定義されているとおり、ラメ定数  $\lambda$  及び  $\mu$  に依存し、混合ゾーンの  $f_2 / f_1$  に比例する。

【 0 0 5 8 】

【 数 1 1 】

$$D = \frac{f_1 / f_2}{4\pi(\lambda + 2\mu)}$$

(12)

20

式 ( 1 3 ) に表されているように、 $\theta$  は、2 つの一次ビームの混合ゾーンにおける収束角であり、 $m$  は Landau - Lifshitz 非線形定数  $A$  及び  $B$  に関連する倍率である。

【 0 0 5 9 】

【 数 1 2 】

$$m = \frac{A}{2} + B$$

(13)

30

したがって、 $m$  は、所定の混合ゾーンに関して定数である。

【 0 0 6 0 】

図 10 a、10 b、及び 10 c は、 $m$  がその代表的な値である -3660 GPa (Korneev, Nihei and Myer 1998) と仮定した場合に、混合ゾーンにおいて 1.5 ~ 2.0 の範囲にある  $V_p / V_s$  速度比への混合係数  $W$ 、収束角及び散乱角の依存度を示す。図 10 a は、混合ゾーン  $V_p / V_s$  比のある範囲について、混合係数の平面波周波数への依存度を示す。図 10 b 及び 10 c は、 $P + P - SV$  の相互作用についての選択規則に従う対応の収束角及び散乱角を示す。図 10 a から理解されるように、混合係数は、第 2 の周波数  $f_2$  の第 1 の周波数  $f_1$  に対する比が約 0.7 のときに、最大値をとる。また、図 10 b から、第 2 の周波数  $f_2$  の第 1 の周波数  $f_1$  に対する比が約 0.7 のときに、収束角が約 30 度と約 40 度の間の範囲にあることが分かる。さらに、第 2 の周波数  $f_2$  の第 1 の周波数  $f_1$  に対する比が約 0.7 のときに、第 1 の波の方向に対する帰還波 (returning wave) の散乱角は約 40 度になる。

40

【 0 0 6 1 】

図 11 a から図 11 c は、ポアホールに帰還する散乱波を生成する非線形媒体における音響ビームの非共線相互作用の数値シミュレーションの結果の例を示す。図 11 a ~ 図 11 c において、ポアホール 1100 は、下方送信機 1101、上方送信機 1102、及び受信器アレイ 1103 を備える。下方送信機 1101 及び上方送信機 1102 によって生成される圧縮ビームの形態における音響エネルギーは、ポアホールから離れた位置で、収束角 1104 で収束する。受信器アレイ 1103 は、上述し、また、以下でも繰り返し説

50

明するように、選択規則によって定義される散乱角  $1106$  の音響ビームの相互作用によって生成される散乱波  $1107$  を受信するように配置される。図  $11a$ 、 $11b$ 、及び  $11c$  では、ボアホールに沿う方向のメートル単位の距離が、ボアホールから離れる方向の半径方向のメートル単位の距離に対して示されている。図  $11a$  及び  $11b$  には、2つの音響波源によって生成された2つのビームの圧縮音響エネルギーに関連する体積ひずみが示されている。図  $11c$  には、散乱せん断波  $1107$  に関連するせん断ひずみが示されている。

#### 【0062】

以下の段落では、測定された散乱音響波を高めて抽出するために用いられるコード化スキームが説明される。この散乱音響波は、ボアホール周囲の岩石層内の混合ゾーンにおける一次音響信号の非線形混合によって生じる。ボアホールから離れた岩石層内の非線形音響現象によって生成される散乱音響波の測定は、コード化一次音響信号をブロードキャストし、非線形相互作用によって生じる信号を記録し、その後非線形信号の予測特性に基づいて波形認識法及び/又はバンドパスフィルタ法を用いることによって高められる。1つの非限定的な例は、選択規則に従って、記録信号を、ブロードキャストパラメータ (broadcast parameter) に由来するタイミングの予測及び周波数成分を表すテンプレートと相関処理することである。相関処理の結果は、ボアホールを通過して伝播した音響パルスを表す。例えば、 $P+P$   $SV$  の場合には、当該非線形相互作用から生じる帰還エネルギー (returning energy) は、ボアホールに沿って、当該層のせん断波速度をその伝搬方向とボアホール軸とが為す角度の余弦で割ったものと等しい速度で伝播するように見える。図  $8$  に図示されたようなシステムに適用される場合に、コーディング及び相関処理方法は、弱い非線形信号の検出を改善し、測定によって探查される領域における非線形特性及び  $V_p/V_s$  速度比の  $3D$  画像の構築を改善する。

#### 【0063】

非線形媒体における非線形音響混合により生成される信号を改善するコーディング及び信号相関処理を利用する非限定的な実施態様が以下の段落において説明される。コード体系のより一般的な実施態様の詳細な説明は、本出願と同時に提出された、「System and Method for Generating Micro-Seismic Events and Characterizing Properties of a Medium With Non-Linear Acoustic Interactions」(アトニーコードケット番号  $091230-0397046$ ) と題する米国特許出願に記載されている。この米国特許出願の内容は参照により全体として本明細書に組み込まれる。図  $12a \sim 12d$  を参照して、音響源  $1201$  は、時刻  $t = 0$  において  $N$  個の音響パルスから成る第1のコード化時間列 (time train)  $u_1(t)$  又は変調時間列  $u_1(t)$  のブロードキャストを開始する。 $n$  番目の音響パルスは、周波数  $f_n$  及び限定された時間間隔における振幅包絡線  $E_{1n}(t - T_n)$  を有する。ここで、 $n = 1, 2, \dots, N$  であり、 $T_n$  は  $n$  番目のパルスのブロードキャスト時間である。連続するパルス間の時間間隔は可変である。一部の実施形態において、連続するパルス間の時間間隔は、個別のパルスの持続時間よりもはるかに長く、パルスは重複しない。第2のコード化時間列 (time train)  $u_2(t)$  又は変調時間列  $u_2(t)$  は音響源  $1202$  からブロードキャストされる。この第2のコード化時間列又は変調時間列は、時刻  $t = \tau$  において  $N$  個の連続音響パルスのシーケンスから成る。ここで、 $\tau$  は、第1のコード化列の開始時間と第2のコード化列の開始時間との間の開始時間差である。一部の実施形態において、開始時間差は、第1のコード化列と第2のコード化列との間の時間遅延と理解される。第1のコード化列のブロードキャストは、第2のコード化列に比べて遅延していてもよく、その逆であってもよい。本明細書においては、 $\tau$  を「遅延時間」と称することが多い。しかしながら、第2のパルス例が最初に開始することもあるので、 $\tau$  は、「時間差」を意味するものとして広い意味に解釈されるべきである。 $n$  番目の音響パルスは、 $d * f_n$  の周波数及び限定された時間間隔における振幅包絡線  $E_{2n}(t - (T_n + \tau))$  振幅包絡線  $E_{1n}(t - T_n)$  を有する。ここで、 $n = 1, 2, \dots, N$  である。2つの列

10

20

30

40

50



の対応するパルス間の周波数比は  $d$  に固定されている。  $T_n + \delta$  は、  $n$  番目のパルスのブロードキャスト時間である。第 1 のコード化信号列及び第 2 のコード化信号列の振幅包絡線  $E_1$  及び  $E_2$  は、異なるものであってもよいし、同じものであってもよい。時間コード化信号の例が図 1 2 b ~ 1 2 c に示されている。これらのコード化信号は、数学的に、以下の式 ( 1 4 ) 及び式 ( 1 5 ) で表される。本明細書において、記号「 \* 」は、乗算演算子として用いられる。

【 0 0 6 4 】

【 数 1 3 】

$$u_1(t) = \sum_n E1_n(t - T_n) * \exp(i2\pi * f_n * (t - T_n)) * \exp(i\zeta_n)$$

10

(14)

【 0 0 6 5 】

【 数 1 4 】

$$u_2(t - \delta) = \sum_n E2_n(t - (T_n + \delta)) * \exp(i2\pi * d * f_n * (t - (T_n + \delta))) * \exp(i\zeta_n)$$

(15)

ここで、  $\zeta_n$  は各パルス  $n$  の位相であり、  $\exp(i\zeta_n)$  は各パルス  $n$  の位相期間である。

20

【 0 0 6 6 】

それぞれの信号包絡線  $E_1_n(t - T_n)$  及び  $E_2_n(t - (T_n + d))$  は、ガウス包絡線等の任意の形状又は形態を取り得る。同様に、包絡線内の変調信号は式 ( 1 4 ) 及び式 ( 1 5 ) で表されるが、他の数式で表されても良い。時間遅延  $d$  が送信機 1 2 0 1 及び 1 2 0 2 から混合ゾーン 1 2 0 4 までの伝播時間の差分に等しい場合には、2つのブロードキャスト列の対応するパルス  $n$  の音響エネルギーは、混合ゾーンに同時に到着し、収束角、周波数比及び  $V_p / V_s$  比が調和規則の基準に合致すると、  $(1 - d) * f_n$  の卓越周波数を有する第 3 の散乱音響パルスの例を生成する。この卓越周波数は、2つの一次パルスの周波数、  $f_n$  と  $(1 - d) * f_n$  との差に等しい。  $u_3$  で表される第 3 の波は、受信機で記録され、2つの一次信号のコーディングを引き継ぐ。したがって、第 3 の波は、式 ( 1 6 ) で表される。

30

【 0 0 6 7 】

【 数 1 5 】

$$u_3(t) \propto \sum_n E3_n(t - (T_n + T)) * \exp(i2\pi * (1 - d) * f_n * (t - (T_n + T))) * \exp(i\zeta_n)$$

(16)

ここで、  $\zeta_n$  は、第 3 の波の各パルス  $n$  の位相であり、  $\exp(i\zeta_n)$  は、第 3 の波の各パルス  $n$  の位相期間である。

40

【 0 0 6 8 】

$E_3_n(t)$  は、一次パルスの混合により得られる振幅包絡線であり、  $T$  は、以下でさらに詳しく説明するように、音響源 1 から混合ゾーンの中心を通過して受信機に至る伝播時間の合計である。

【 0 0 6 9 】

一実施形態において、信号の改善は、地震処理 ( seismic processing ) の分野においてよく知られている、測定信号  $u_3$  の非線形相互作用及び伝播時間情報の関連部分を抽出する関連技術を用いることによって実現できる。この技術には、式 ( 1 7 ) で表されるコード化信号を有するテンプレート信号  $u_s$  の構築が含まれる。

50

【 0 0 7 0 】

【 数 1 6 】

$$u_s(t) = \sum_n W_n(t - T_n) * \exp(i2\pi * g(f_n) * (t - T_n)) * \exp(i\zeta_n)$$

(17)

ここで、 $n$  は、テンプレート信号の各パルス  $n$  の位相であり、 $\exp(i\zeta_n)$  は、テンプレート信号の各パルス  $n$  の位相期間である。

【 0 0 7 1 】

10

$W_n$  は、好適に選択された包絡線関数であり、 $g(f_n)$  は、周波数  $f_n$  の好適に選択された関数である。関数  $g(f_n)$  は、最適な非線形信号の抽出を実現するために計測信号  $u_3$  内の期待される変調信号の形状に基づいて適切に選択し得る。例えば、 $g(f_n)$  は、 $(1-d) * f_n$  となるように選択される。このとき、図 12 に示されるように  $u_3$  が以下の式と等しくなる。

【 0 0 7 2 】

【 数 1 7 】

$$u_s(t) = \sum_n W_n(t - T_n) \exp(i2\pi(1-d)(t - T_n)) \exp(i\zeta_n)$$

20

しかしながら、他の関数  $g(f_n)$  も本発明の範囲内である。

【 0 0 7 3 】

$u_3$  において非線形相互作用から信号を抽出するために、 $u_3$  と  $u_s$  との相互相関処理が実行され、相関処理された信号  $M$  が得られる。ここで、 $M$  は、数学的に式 (18) で定義される。

【 0 0 7 4 】

【 数 1 8 】

$$M(t) = \int u_3(t') * u_s(t-t') dt'$$

(18)

30

相関処理された信号  $M$  は、 $(1-d) * f_n$  の全周波数を含むバンド幅を有する鋭い帯域制限スパイク (band-limited spike) である。パルス数  $N$  が大きい場合には、 $n = 1, 2, \dots, N$  である。「帯域制限」スパイク (band-limited spike) という語は、本明細書において、制限された周波数帯域幅を有するスパイク信号を意味する。一実施形態において、パルス数  $N$  を増加させてブロードキャストの持続時間を増加させることにより、線形相互作用により生成された信号やそれ以外の雑音を抑圧しつつ、相関処理された信号  $M$  中の非線形相互作用により生成される信号を改善することができる。コード化信号パターンを用いる相関技術は、非線形相互作用により生成された信号を抽出し改善するための多くの方法の 1 つであることに留意されたい。パターン認識や周波数バンドフィルタリング等の代替的な信号処理技術も、信号の抽出や改善のために同様に用いられる。

40

【 0 0 7 5 】

相関処理された計測信号  $M$  は、次の特性を有する。第 1 に、相関処理された信号は、第 1 及び第 2 の初期のコード化信号間の時間遅延  $\tau$  が、第 1 の音響源 1201 から混合ゾーン 1204 までの伝播時間  $t_1$  と第 2 の音響源 1202 から混合ゾーン 1204 までの伝播時間  $t_2$  との間の差に等しい場合、即ち、 $\tau = T_1 - T_2$  の場合のみ、混合ゾーンにおける非線形相互作用に対応する鋭い帯域制限スパイクを含む。この条件が合致しない場合には、相関処理された信号は、非常に抑圧される。第 2 に、条件  $\tau = T_1 - T_2$  が満たされる場合には、一次音響源から混合ゾーンまでの伝播時間と混合ゾーン 1204 から受信

50

器アレイ 1 2 0 3 内の受信器 1 2 0 3 までの伝播時間との合計に等しい時間  $T$ 、即ち  $T = t_1 + t_3 = t_2 + t_3$  において、相関処理された信号  $M(t)$  上で帯域制限スパイクが生じる。第 3 に、連続するコード化信号の継続の増大、即ち、ブロードキャスト列におけるパルス数  $N$  の増大は、雑音からの信号の識別性を向上させる。これは、雑音がテンプレート信号  $u_s$  の形状を有しないからである。

#### 【0076】

下方送信機 1 2 0 1 及び情報送信機 1 2 0 2 が、ガウス包絡線を有する連続的な音響パルスから成る 2 つのコード化信号列を放射する場合の数値シミュレーション結果を図 1 3 a ~ 図 1 3 d に示す。この非限定的な例において、1 2 パルスのコード化信号は、(574 Hz, 373 Hz) (624 Hz, 16, 224) (700 Hz, 455 Hz) (757 Hz, 492 Hz) (802 Hz, 521.3 Hz) (870.5 Hz, 566 Hz) (947 Hz, 615.5 Hz) (1000 Hz, 650 Hz) (1120 Hz, 728 Hz) (1218 Hz, 792 Hz) (1324 Hz, 861 Hz) (1440 Hz, 936 Hz) という組み合わせの周波数で用いられる。この組み合わせにおける周波数比  $f_2 / f_1$  は、定数 0.65 である。2 つの信号の間の開始時間遅延は、 $(t_1 - t_2)$  と等しくなるように選択される。2 つのコード化された連続する波  $u_1$  及び  $u_2$  のブロードキャストに起因する非線形相互作用の数値シミュレーションが、コンピュータ上で実行される。図 1 3 b には、非限定的な受信機アレイ 1 2 0 3 において 1 ~ 110 の番号がつけられた 110 個の受信機のうちの 6 つの受信機において受信され記録された 2 つの連続的なパルスのブロードキャストに基づく非線形相互作用に起因するシミュレーション信号が示されている。図 1 3 c には、帰還コード化信号に対するテンプレート  $u_s$  が示される。テンプレート信号と各受信機における記録信号との相関処理の結果が図 1 3 d に示される。図 1 3 d に示されている各受信機における相関処理された信号は、非常に鋭い帯域制限スパイクを示す。この鋭いスパイクは、時間  $T = t_1 + t_3$  において発生する。ここで、 $t_1$  は、音響源 1 から混合ゾーンの中心までの伝播時間であり、 $t_3$  は、混合ゾーンの中心から受信機までの伝播時間である。この受信機アレイ間での時間遅延又は「反射伝播時間差 (move-out)」は、音響エネルギーが、帰還波とボアホール軸との間の角度の余弦によって除されたせん断波速度に等しい見かけの速度で、ボアホールに沿って伝播したかのように見える。

#### 【0077】

図 1 3 a ~ 1 3 d に示されている数値シミュレーションは、図 1 2 a ~ 1 2 d 又は図 8 における測定系に関して用いられる場合におけるコード体系の力と有用性をはっきりと示している。混合領域 1 2 0 4 における非線形相互作用の強度に比例する強度を伴う帯域制限スパイク信号を含む相関処理された記録を生成するために、受信器において記録された信号をコンピュータが処理する。帯域制限スパイクの到達時間  $T$  は、波源 1 2 0 1 から混合領域 1 2 0 4 への伝播時間及び受信器 1 2 0 3 へと戻る伝播時間の合計と等しい。帯域制限スパイクの振幅は、受信器の配置に応じて変化し、特定の受信器において最大値を生じ、これらの場所は、混合領域 1 2 0 4 における非線形相互作用の散乱角度 1 2 0 6 と従属関係にある。散乱角度は、混合領域  $MZ$  における岩石の特性、例えば、 $V_p / V_s$  速度比と従属関係にある。この結果は、コード体系及び図 1 2 a ~ 1 2 d 又は図 8 に示されている測定系の特性である点に留意されたい。テンプレートと併せてガウス包絡線及びコード化信号を用いることは、コード化信号の仕組みとその特徴を例示することを目的として用いられた限定を意図しない例である。フィールド応用によって必要となる様々な理由に応じた、分解能及び信号対雑音比の条件による相関処理のパフォーマンスを最適化するために、 $u_1$ 、 $u_2$  及び  $u_3$  の変形を考慮することができる。

本開示の一部の態様において、一次音響信号におけるコード化音響ビームは、ボアホールに戻ってくる非線形信号の振幅及びフォーカシングを高めるために用いることもでき、信号検出感度及び信号対雑音非を改良するために用いることもできる。図 1 4 a ~ 1 4 d は、数値シミュレーションによって生成されたノイズを有する時系列信号に対するコード化信号の仕組みの適用例を示す。ノイズを有する時系列信号は、非線形相互作用の結果とし

10

20

30

40

50

てのボアホールに戻る信号をシミュレートする。非線形相互作用信号の振幅よりも10%大きい振幅を有するホワイトガウスノイズが、コード化テンプレートとの相関処理が適用される前に、非線形モデル内の波伝播の数値シミュレーションによって生成される時系列信号に対して追加される。この構成は図12a~12d及び図13a~13dに示される構成と同一である。図14bは、ノイズを含み、受信器アレイ1403の6つの受信器において記録されるシミュレートされた受信信号を示す。図14dは、図14cに示される12のパルスのコード化テンプレート $u_s(t)$ との相関処理のときに、同じ受信器上でノイズを有する信号(この場合、シミュレートされたノイズを有する信号)から取り出される信号を示す。この符号化体系は、このように、非線形相互作用から信号を効果的に抽出しノイズを最小化することを示し、実際の適用における有益な特徴である。

10

## 【0078】

以上により、ブロードキャストコーディングと信号処理の組み合わせを用いることにより、いかにして、検知を改善し、非線形媒体における非線形混合によって生成される音響波信号の振幅を決定し、また、混合ゾーンの非線形性及び $V_p/V_s$ 比を推測するために音響源から混合ゾーンを通過して受信機アレイに至る伝播時間を決定するかを説明した。以下の段落においては、ボアホールベースの測定系(borehole based measurement system)の文脈におけるコーディング方法及び信号処理方法を説明する。

## 【0079】

ボアホール周辺の地層に関する初期の圧縮速度及びせん断速度モデルにおいては、レイトレーシング(ray tracing)等の技術が、選択された傾角及び方位角( $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、及び $\theta_4$ 、809~812)並びに収束角及び散乱角( $\alpha$ 及び $\beta$ 、804及び806)に対応する図8における混合ゾーンの位置を推定するために用いられる。この情報は、送信機からの2つのパルスが混合ゾーンに同時に到達して非線形相互作用によって受信機に他到達する散乱パルス列を生成するために必要な時間遅延 $\tau_p$ 及び周波数比 $d_p$ を推定し、第1の音響源から混合ゾーンを通過して受信機に至るまでの合計伝播時間 $T_p$ を推測するために用いられる。その推定値の周辺において体系的に $\theta$ 及び $d$ を走査し、テンプレート $u_s(t)$ を記録信号 $u_3(t)$ と相関処理することにより、アレイ803の各受信機要素について、一連の $M(t, \theta, d)$ が得られる。上述のとおり、各受信機要素について相関処理された信号 $M(t, \theta, d)$ は、選択条件により非線形相互作用が許容される場合には、混合ゾーン805における非線形相互作用に対応する帯域制限スパイクを有する。 $M(t, \theta, d)$ の空間( $t, \theta, d$ )において、混合ゾーン805における非線形相互作用に対応する帯域制限スパイクの位置( $T_{NL}, \theta_{NL}, d_{NL}$ )を特定するための調査がなされる。 $(T_{NL}, \theta_{NL}, d_{NL})$ は、 $(T_p, \theta_p, d_p)$ の近傍にある。 $(T_{NL}, \theta_{NL}, d_{NL})$ と $(T_p, \theta_p, d_p)$ との間の差分は、岩石層の実際の伝播特性からの、伝播速度モデルの偏差を示す。これらの差は、速度トモグラフィ反転(velocity tomographic inversion)やそれ以外の速度更新方法により伝播速度モデルを更新するために用いられる。式9及び図10における周波数比 $d$ 、 $V_p/V_s$ 比、収束角及び散乱角の関係を前提として、混合ゾーンにおける岩石層の $V_p/V_s$ 比が、混合ゾーンにおける観測された $d_{NL}$ 、収束角及び散乱角に基づいて計算される。後ろの2つの量は、更新された伝播速度モデルに基づくレイトレーシング又はそれ以外の数値的方法により計算できる。振幅値 $M(T_{NL}, \theta_{NL}, d_{NL})$ は、混合ゾーン805における岩石層の非線形混合強度に関する情報を含む。この情報は、以下で説明するように、岩石層の非線形特性の3D画像化のために用いられる。

20

30

40

## 【0080】

特定の混合ゾーンに関連するパラメータの組み合わせ、すなわち、 $M(T_{NL}, \theta_{NL}, d_{NL})$ 、 $T_{NL}$ 、 $\theta_{NL}$ 、及び $d_{NL}$ を特定するためのテンプレート信号との相関処理による非線形音響混合信号の処理能力は、以後、 $V_p/V_s$ 比、伝播モデル $V_p$ 、 $V_s$ の決定のために用いられるが、コーディング及び相関処理プロトコルの直接の結果である

50

。この固有の特性が以下の画像化体系を支持する。

【0081】

以下の段落における説明は、ボアホール周囲の岩石層の  $V_p / V_s$  比及び非線形特性の3D画像を生成するためのコード化音響信号の非限定的な使用例に着目するものである。しかしながら、コード化音響信号は、地質学や石油物理学だけにとどまらない幅広い用途を有しており、例えば、非破壊検査や医療上の画像化などの分野で利用される。

【0082】

非限定的な例として、図8のシステムに関して信号対雑音比を改善するための測定及びデータ処理プロトコルを、以下の段落で説明する。

【0083】

簡素化のために、処理プロトコルは、非減衰性岩石層 (non-attenuative rock formation) を前提として説明する。しかしながら、以下の測定及びデータ処理プロトコルは、減衰性岩石層にも同様に当てはまる。岩石層の減衰効果は、フォーメーションQ (formation Q) に関連する予測値によって、散乱波の源 (origin) を変位させることである。

【0084】

第1に、上述したように、2つのコード化信号の周波数比  $d$  について、図8の測定系の第1の音響エネルギー源801及び第2の音響エネルギー源802からの一次音響ビーム信号は、地盤に送信される。時間遅延は、2つのコード化信号源801及び信号源802との間で維持される。測定の配置は、選択規則を満たし、時間遅延は、2つの信号源からのエネルギーが混合ゾーンに同時に到達するようなものである。一実施形態において、位置  $z_3$  における受信機803での3成分ジオフォンの各々の成分は、帰還音響波を検出し記録する。測定値は、 $m(t, \quad, d, z_3)$  で表される。代替的又は追加的に、帰還音響波における圧力信号を検出するためにハイドロフォンを備えることもできる。

【0085】

第2に、コード化一次信号は、上記のように、第1及び第2の音響エネルギー源から送信されるが、極性は反転、すなわち、位相は180度シフトしている。受信機803で記録される信号は、 $m_-(t, \quad, d, z_3)$  と表される。

【0086】

第3に、2つの信号  $m(t, \quad, d, z_3)$  及び  $m_-(t, \quad, d, z_3)$  は、加算されて、結合信号を形成する。この結合信号は、 $mm(t, \quad, d, z_3)$  と表される。信号  $m(t, \quad, d, z_3)$  と信号  $m_-(t, \quad, d, z_3)$  とは異なる極性を有するので、岩石層からの線形相互作用による信号は、 $m(t, \quad, d, z_3)$  と  $m_-(t, \quad, d, z_3)$  とを重ね合わせるにより相殺される。しかしながら、非線形応答の振幅は2つの一次信号の振幅の積に比例し両一次信号の極性が反転されても反転しないため、各々の非線形応答はコヒーレントに重ね合わされる。したがって、 $mm(t, \quad, d, z_3)$  は、岩石層の非線形相互作用による信号を本質的に含む。

【0087】

第4に、信号の期待バンドの周辺に狭帯域を維持するために、時変バンドパスフィルタが得られた信号  $mm(t, \quad, d, z_3)$  に適用される。得られた信号の帯域幅は、2つの一次ブロードキャスト信号の周波数の差及び帯域幅に基づいて決定される。

【0088】

第5に、フィルタ処理された信号  $mm(t, \quad, d, z_3)$  のテンプレートコード化信号との相互相関処理が上述したようにして実行され、 $mmc(t, \quad, d, z_3)$  で表されるパルス信号が得られる。

【0089】

第6に、ホドグラム分析が、受信機の3つの一軸センサから得られた3成分データ、及び/又は、ハイドロフォンによって検出された圧力信号に適用されてもよい。これらのデータは、P、SH及びSVの可能性のある任意のモデルを分析するために用いることができ、また、 $mmcr(t, \quad, d, z_3)$  で表される任意のP波、SH波及びSV波の到

10

20

30

40

50

達の別個の測定結果を得るために変換され得る。

【0090】

第7に、異なるブロードキャストコード化信号を用いて上記の6つの工程が複数回繰り返されても良く、 $mmcr(t, \theta, d, z_3)$ 信号が集められて信号対雑音比を改善するために蓄積される。得られた蓄積信号は、SV波、SH波及びP波の各々の到達についての信号記録 $M(t, \theta, d, z_3)$ である。例えば、 $P+P$  SVモードにおいては、SVモードが受信機によって検出されるが、 $P+SV$  Pモードにおいては受信機において検出される信号はPモードである。

【0091】

第8に、多くの $\theta$ 及び $d$ の値を掃引し、 $M(t, \theta, d, z_3)$ の全セットを得るために、上記の7つの工程を繰り返してもよい。説明した測定及び処理プロトコルによって、受信機において高い信号対雑音比を有する測定信号 $M(t, \theta, d, z_3)$ の構成が可能となる。

10

【0092】

測定結果 $M(t, \theta, d, z_3)$ は、多くの送信機位置 $z_1$ 、 $z_2$ 及び多くの受信機アレイ位置において繰り返されても良い。また、受信機を独立に移動させても良い。音響源801及び802からの一次音響ビームは、任意の方位角 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 及び仰角 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ について、独立に操縦されるので、測定結果 $M(t, \theta, d, z_3)$ は多くの角度 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\phi_1$ 、及び $\phi_2$ について繰り返されてもよい。これらの繰り返しの複数回の測定結果は、多くの値 $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\phi_1$ 及び $\phi_2$ について、地層中での非線形相互作用によって生成される複数の冗長信号を含むことができる。この冗長性によって、コンピュータにおける信号処理及びボアホール周辺の岩石特性の3D画像の生成に関して追加的な信号対雑音比の向上が可能となる。

20

【0093】

上記の測定及び処理プロトコルに関する工程は、当然、様々な順序で並び替えたり省略することが可能である。また、上記以外にも、地震信号処理の技術分野において経験を有する者にとって一般的な信号処理技術が数多く存在する。例えば、多次元フィルタリング法(multi-dimensional filtering)、反射伝播時間差分析及びスタッキング法(time moveout analysis and stacking)などである。これらの追加的な技術は、記録されたデータや処理された画像の質を改善するために、上述した測定及びデータ処理プロトコルに追加することができる。非線形相互作用に基づいて相関処理された信号 $M(t, \theta, d, z_3)$ は、符号化方法や選択規則に基づく多くの特性を有する。

30

以下において、非線形特性の3D画像の構築や各領域の $V_p/V_s$ 比を利用し、 $V_p$ や $V_s$ 等の他の岩石特性を決定する画像化方法やワークフローを説明する。このワークフローの非限定的な例を以下に説明する。

【0094】

図8に説明されている測定系及び図12a~12dに示されている伝播時間の表記、及び上記の説明を参照して、1つの特定の送信機位置及びビーム角度( $z_1$ 、 $z_2$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\phi_1$ 及び $\phi_2$ )について受信機位置 $z_3$ で測定及び処理された後の相関処理された信号記録 $M(t, \theta, d, z_3)$ は、以下の条件が満たされたときに、伝播時間 $T = t_1 + t_3$ において帯域制限スパイクを含む。

40

送信されたビームが混合ゾーン805において交差し非線形に相互作用する。

時間差 $\Delta t$ は、伝播時間差 $t_1 - t_2$ に等しい。

選択規則が満たされる。すなわち、符号化体系において用いられる周波数比 $d$ は式(19)の条件を満たす。

【0095】

【数 19】

$$\sin(\theta/2) = (1-d) \frac{\sqrt{(V_p/V_s)^2 - 1}}{2\sqrt{d}}$$

(19)

ここで、 $V_p/V_s$  は、圧縮ゾーン 805 における圧縮速度対せん断速度比であり、 $\theta$  は、第 1 の送信ビームと第 2 の送信ビームとの間の収束角である。 $V_p/V_s$  比及び収束角  $\theta$  は、ビームの幾何学的配置、位置、ビームの方向パラメータ ( $z_1, z_2, z_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3$  及び  $\theta_4$ )、及び探査される岩石領域の圧縮速度  $V_p$  及びせん断速度  $V_s$  のモデルに基づくレイトレーシングによって計算できる。

10

【0096】

上記の条件は、混合ゾーン 805 における非線形相互作用が記録  $M(t, \theta, d, z_3)$  に対して、受信機 803 の各位置  $z_3$  について、 $(t, \theta, d)$  空間における単一点での帯域制限スパイクとして寄与することを決定する。記録  $M(t, \theta, d, z_3)$  における観測された帯域制限スパイク信号の位置は、 $(T_{NL}, \theta_{NL}, d_{NL}, z_3)$  として示される。この帯域制限スパイクの振幅は、混合ゾーン 805 における非線形相互作用の強度  $I_{NL}$  の関数である。

【0097】

地震探査分野において一般的に用いられている合成処理（例えばスタッキング処理）及びボアホール音響波形分析は、信号記録  $M(t, \theta, d, z_3)$  において実行される。信号記録  $M(t, \theta, d, z_3)$  における帯域制限スパイクの漸進的な時間遅延又は「ムーブアウト (move out)」は、 $z_3$  の関数として分析される。例えば、スタッキング処理において、信号記録はスタックされ、選択された基準位置  $z_{3r}$  に対応するスタックされた記録  $M_s(t, \theta, d, z_{3r})$  が得られる。基準位置は、当該複数の信号記録  $M(t, \theta, d, z_{3r})$  が適切にスタックされるように選択される。このスタッキング処理は、雑音対信号比を向上させ、記録  $M_s(t, \theta, d, z_{3r})$  での非線形相互作用から生じる帯域制限スパイクの位置  $(T_{NL}, \theta_{NL}, d_{NL}, z_{3r})$  の検出能を改善する。本明細書においてはスタッキング処理を説明しているが、他の合成技術も用いることができる。

20

30

【0098】

所定の初期  $V_p$  及び  $V_s$  速度モデルは、ボアホール探掘検層及びボアホールから離れた位置の岩石層特性の水平方向の連続性に関する仮定、仰角  $\theta_1$  及び方位角  $\phi_1$  を有する位置  $z_1$  における送信機 801 からの音響ビーム及び仰角  $\theta_2$  及び方位角  $\phi_2$  を有する位置  $z_2$  における送信機 801 からの音響ビームの軌跡及び伝播時間は、レイトレーシングやそれ以外の数学モデリング技術によって計算される。

【0099】

したがって、混合ゾーン 805 の位置は、ビームが交差すれば、レイトレーシング又は他の音響数値モデリング技術 (acoustic numerical modeling technique) によって、パラメータ  $z_1, z_2, z_{3r}, \theta_1, \theta_2, \theta_3$  及び  $\theta_4$  に基づいて特定される。送信機位置 801、802、基準受信機  $z_{3r}$  及び混合ゾーン 805 の間の予測伝播時間  $t_{1p}, t_{2p}$  及び  $t_{3p}$  は、レイトレーシングやその他の音響数値モデリング技術を用いて、位置や速度に基づいて計算され得る。

40

予測パルス到達時間  $T_p = t_{1p} + t_{3p}$  及び時間差  $\Delta T_p = t_{1p} - t_{2p}$  は、圧縮速度  $V_p$  及びせん断速度  $V_s$  モデルに基づいて予測され、次に、実際の記録  $M_s(t, \theta, d, z_{3r})$  で観測された帯域制限スパイクの到着時間  $T_{NL}$  及び時間差  $\Delta T_{NL}$  と比較される。 $V_p$  及び  $V_s$  速度モデルが岩石層の実際の  $V_p$  及び  $V_s$  を正しく近似することができれば、予測時間 ( $T_p, \Delta T_p$ ) は、観測される時間 ( $T_{NL}, \Delta T_{NL}$ ) に等しくなる。予測時間と観測時間との間に差があれば、この差は、伝播  $V_p$  及び  $V_s$  速度モデルを更新し、その差を最小化してモデル化データと観測データとの整合性を実現するために用いられ

50

る。伝播  $V_p$  及び  $V_s$  モデル (propagating  $V_p$  and  $V_s$  model) を更新するために、地震処理における画像化の技術分野において経験を有する者によく知られた様々な反復速度トモグラフィ反転 (iterative velocity tomographic inversion) 法を用いることができる。

#### 【0100】

上記のトモグラフィ速度反転 (tomographic velocity inversion) 工程で得られる  $V_p$  及び  $V_s$  の伝播モデルを前提として、仰角  $\theta_1$  及び方位角  $\phi_1$  を有する位置  $z_1$  の送信機 801 及び仰角  $\theta_2$  及び方位角  $\phi_2$  を有する位置  $z_2$  の送信機 802 からの音響ビームの軌道は、レイトレーシングやそれ以外の数値モデル技術によって計算可能である。の方位角  $\phi_1$  について、位置及び収束角  $\theta_1$  がレイトレーシングやその他の数値モデル技術によって、パラメータ  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\phi_1$ 、及び  $\phi_2$  に基づいて計算される混合ゾーン 805 において音響源が交差する方位角  $\theta_2$  が存在する。その後、記録  $M_s(t, \theta, d, z_3)$  におけるポイント ( $T_{NL}$ 、 $N_L$ 、 $d_{NL}$ ) のパルスの振幅は、混合ゾーン 805 の空間座標にマッピングされる。 $d_{NL}$  は、式 (19) に従わなければならないので、混合ゾーン 805 における  $V_p/V_s$  速度比は、式 (19) に基づいて計算され、その空間位置にマッピングされる。パラメータ  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $z_3$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\phi_1$  及び  $\phi_2$  の値の範囲について、上記のマッピング工程を繰り返すことにより、非線形相互作用の強さ  $\theta$  及び速度比  $V_p/V_s$  の 3D 画像が構築される。選択規則を用いて上記のマッピング法から得られる  $V_p/V_s$  速度比は、伝播時間のトモグラフィ反転から得られる伝播速度  $V_p$  及び  $V_s$  の比を用いる方法の代替的な方法である。

10

20

#### 【0101】

上述した幾何学的マッピング工程は、パラメータ  $z_1$ 、 $z_2$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\phi_1$ 、及び  $\phi_2$  の多くの値についての信号記録  $M(t, \theta, d, z_3)$  に基づく非線形特性や  $V_p/V_s$  速度比の 3D 画像化のために用いられてもよい。地震探査の分野で用いられている上記以外の高度な画像化技術、例えば、キルヒホッフ画像処理、ビーム画像処理、波動方程式画像処理は、非線形特性や  $V_p/V_s$  速度比の 3D 画像化のために適応される。例えば、圧縮速度  $V_p$  の伝播の 3次元画像、せん断速度  $V_s$  の伝播の 3次元画像、圧縮速度対せん断速度比  $V_p/V_s$  の 3次元画像、又は岩石層の非線形特性の 3次元画像、又はこれらの 2つ以上の任意の組み合わせが、キルヒホッフ画像処理、ビーム画像処理、又は波動方程式画像処理を用いて実行される。また、一実施形態において、伝播圧縮速度もしくはせん断速度の値又はこれらの両方は、トモグラフィ速度反転法もしくは全波形逆解析手法 (full wave form inversion)、又は、トモグラフィ速度反転法もしくは全波形逆解析手法と組み合わせた反復画像法 (iterative imaging) により、決定されてもよい。

30

#### 【0102】

当然、パラメータの値の決定は、パラメータの画像化とは異なる。確かに、パラメータの画像は、パラメータの相対値を含むのみで、必ずしもパラメータの絶対値に関する情報を提供しない。したがって、速度比  $V_p/V_s$  の画像を得ることは、速度比  $V_p/V_s$  の値を決定することとは異なる。速度比の画像から速度比の値を決定するためには、追加的な情報が必要となる。

40

#### 【0103】

ポアホールから岩石層のさらに内部における非線形特性や圧縮速度対せん断速度比を調査するためには、500 Hz から 10 kHz のオーダーの低周波数の音響源が必要となることがある。これは、低周波数の音響エネルギーは、検出不能なレベルまで減衰する前に岩石層のさらに内部に侵入することができるためである。500 Hz から 10 kHz の低周波数音響エネルギーは、ポアホールの直径よりもはるかに大きな波長を有する。これらの状況において、ポアホール内に配置された音響源からの音響波ブロードキャストの方位角方向を制御することは難しい。ポアホールから放射される音響エネルギーの 2つの一次ビームを有する図 8 に示した構成は、ポアホールから数百フィートよりも離れた位置にお

50



ける非線形特性の調査や画像化には適していない可能性がある。よって、ボアホールから離れる調査距離を最大化するためには、上記とは異なる低周波数（500 Hz から 10 kHz）のシステム及び方法が必要とされる。以下では、低周波数の音響源を用いて、非線形特性や  $V_p / V_s$  速度比の3次元画像を生成するシステム及び方法の非限定的な例を説明する。以下の説明では、500 Hz から 10 kHz の周波数範囲に言及されるが、説明されるシステム及び方法は、より高周波数範囲、例えば、10 kHz から 500 kHz の範囲にも適用可能であり有益である。

#### 【0104】

図15は、ボアホール周辺の岩石領域における非線形混合を検出するためにボアホール内に配置された2つの送信機及び受信機又は受信機アレイを有するシステムを示す。一実施形態において、上方の送信機1502は、ボアホールに固定され又はその固定が外される送信機の線形アレイを含む。下方の送信機1501は、同様にボアホールに固定され又はその固定が外される送信機の線形アレイを含む。受信機アレイ1508は、固定された3成分受信機又は固定された3成分受信機アレイを備える。この送信機及び受信機は、共に又は別個に動くことができる。一実施形態において、送信機1501及び1502のアレイ要素は、例えば位相制御を用いて、音響エネルギーを、送信機1501及び1502と同一直線上にある軸を有する2つの円錐（下方の音響円錐1504は送信機1502によって生成され、上方の音響円錐1505は送信機1502によって生成される）にブロードキャストするように構成される。位相制御された系においては、円錐角は、送信機要素間の位相差と岩石層速度に依存する。音響エネルギーの2つの円錐ブロードキャストの交差は、トロイダル形状の領域1506である。選択規則が満たされる場合には、散乱エネルギー1507は、交差領域中心1506の周囲における非線形相互作用により生成される。非線形相互作用から生じる散乱エネルギーは、受信機又は受信機1508のアレイにおいて記録される。

#### 【0105】

送信機1501及び1502の円錐ブロードキャストの垂直方向の位置及び仰角は制御可能なので、トロイダル交差領域1506の空間位置（ボアホールからの位置及び垂直方向の位置）は調整可能であり、ボアホール1500の周囲の3次元岩石領域について走査可能である。2つの円錐の収束角及び2つの音響源の周波数比が選択規則を満たす限り、混合ゾーン1506における非線形混合による散乱信号は、2つの円錐の交差位置における地層の非線形特性に関する情報を含む。3成分ジオフォン1508のアレイによって記録されるデータは、その波源に対する方位角及び仰角を決定するために分析される。上述した信号の符号化方法及び測定及び処理プロトコルは、図15aの系にも適用できる。後者の系及び構成から得られる相関処理された信号  $M(t, \quad, d, z_3)$  は、図15bに示されているトロイダル交差領域1506の全ての状況をカバーする全ての交差領域セグメント1509-1、2、3、~1509-kにおける非線形相互作用によって生成された全パルスの線形重ね合わせからなる。上記のとおり、交差ゾーン又は混合ゾーンに対応するセグメント1509-kによる波の、受信機アレイ1508の位置  $z_3$  における受信機における相関処理された信号  $M(t, \quad, d, z_3)$  に対する非線形の寄与は、以下の条件が満たされる場合には、送信機1501からセグメント1509-kまでの伝播時間及びセグメント1509-kから受信機までの伝播時間に等しい伝播時間を有するパルスである。

#### 【0106】

つまり、この条件とは、特定のセグメント1509-kにおける周波数比  $d$ 、収束角、及び  $V_p / V_s$  速度比が式(19)の選択規則に従い、コード化音響源送信信号間の時間遅延  $\tau$  が送信機1501から1509-kまでの伝播時間と送信機1502から1509-kまでの伝播時間との差に等しいことである。

#### 【0107】

換言すれば、相関処理された信号  $M(t, \quad, d, z_3)$  において、交差領域セグメント1509-1~1509-kにおける非線形混合によって生成されるパルスは、位置  $z$

10

20

30

40

50

3にある各受信機について、 $(t, \theta, d)$ の範囲にわたって分散される。各セグメント1509-kの寄与は、相関処理された信号 $M(t, \theta, d, z_3)$ における空間 $(t, \theta, d)$ 内の点にマッピングされる。この特徴は、3成分受信機から得られる信号の起動上方とともに、上述した画像化法を用いて、信号 $M(t, \theta, d, z_3)$ における空間 $(t, \theta, d)$ 内の点における信号振幅の、トロイダル交差領域内の交差領域セグメント1509-1~1509-kに対する幾何学的マッピングを可能にする。開始 $V_p$ 及び $V_s$ 伝播モデル(initial  $V_p$  and  $V_s$  propagation model)が構築される。続いて、レイトレーシング、伝播時間分析及び反復トモグラフィ-速度決定法(iterative tomographic velocity determination)が、実行され、更新 $V_p$ 及び $V_s$ 伝播モデル(updated  $V_p$  and  $V_s$  propagation model)が得られる。続いて、上記のワークローを使用し、更新 $V_p$ 及び $V_s$ 伝播モデルに適用されるレイトレーシング分析を用いて、セグメント1509-1~1509-kにおける非線形特性及び $V_p/V_s$ 速度比が抽出されてトロイダル交差領域における空間位置にマッピングされる。円錐ブロードキャストの全ての仰角及び送信機のボアホール内の全ての垂直方向位置について測定を繰り返すことにより、非線形特性及び $V_p/V_s$ 速度比の非線形特性の画像がボアホール周囲の全ての混合ゾーンについて構築される。全ての走査された混合ゾーンについての画像は、続いて、重みつきスタッキング法(weighted stacking method)等の当業者に知られている好適な処理方法を用いて結合され、非線形特性及び $V_p/V_s$ 速度比の3次元画像が得られる。

10

20

#### 【0108】

垂直抗井について低周波数円錐音響ブロードキャストを用いるシステム及び方法は、岩石層が方位角の対称性を持たない場合にうまく機能する。しかしながら、伝播速度 $V_p$ 及び $V_s$ について岩石層の方位角の対称性が高く、その影響として $V_p/V_s$ 速度比が大きい場合には、地層の特性における方位角の変動を解決し、3D画像を生成する際に困難を生じる可能性がある。図15bを参照して、トロイダル交差領域のセグメント1509-1~15090-kの非線形相互作用により生成された非線形信号は、完全な方位角の対称性がある場合には、各受信機に同時に到達する。この場合、トロイダル交差領域内の複数のセグメント1509-1~15090-kで生成されたパルスは、相関処理された信号 $M$ においてパルスが同時に発生するので、これらを分離することは困難である。これにより、マッピングを実行する際に曖昧さが持ち込まれてしまう。上記の困難性は、ボアホール又はボアホール系が方位角の対称性に起因する限界を克服するように設計されている場合に回避することができる。以下では、この目的を達するために設計された様々な掘削孔の構成を利用する測定システム及び方法の非限定的な例を説明する。

30

#### 【0109】

図16a及び図16bは、受信機アレイ1603がボアホールの直線部分に配置され、送信機1601及び1602の中心が受信機アレイの延長軸1625上に配置されている、非円錐状の混合配置の例を示す。線形フェイズドアレイの場合には、送信機は、送信機アレイと整列した軸を有する円錐1604及び1605の形状の音響エネルギーをブロードキャストする。円錐及びその交差軌跡1607は、本発明の態様に従って、図16及び16bに図示されている。図16aに示されているように、交差軌跡は、一連の交差領域セグメント1608-1~1608-kと考えることができる。このうちの4つが、1608a、1608b、1608c、及び1608dとして特定されている。幾何学的分析に基づいて、2つの交差領域セグメントが同じ収束角を有している場合には、対応する伝播時間の差(下方の送信機から交差領域セグメントまでの伝播時間と上方の送信機から交差領域セグメントまでの伝播時間との差) $t_1 - t_2$ は異なることが示される。したがって、2つの送信機からのコード化ブロードキャスト間の周波数比 $d$ 及び時間遅延 $\tau$ を制御することにより、類似の収束角及び $V_p/V_s$ 速度比を有する、混合ゾーンに対応する交差軌跡の反対側の2つの位置を個別に活性化することができる。同様に、同一の伝播時間差 $t_1 - t_2$ を有する2つの混合ゾーンは、混合セグメントに同時に到達する音響信号が

40

50

、当該2つの位置においてのみ  $V_p / V_s$  速度比、周波数比  $d$  及び収束角 に関する選択条件を満たすようにするために、異なる収束角 を有する。

【0110】

上記の説明から理解されるように、2つの円錐音響ブロードキャストの交差は、トロイド形状の交差領域を定義する。本開示においては、トロイドは、多角形、円、楕円又はこれら以外の閉領域を定義するための形状等の平面幾何学形状を回転させることによって生じる「環状」の形状として定義される。一実施形態において、トロイドは、平面視の幾何学形状又は断面形状が軸周りで回転される円である、リング上の環状体またはリングである。他の実施形態においては、トロイドは、閉領域を形成ために楕円形に回転される多角形形状として定義される。トロイド領域は、複数の交差領域セグメントにセグメント化される。非線形選択規則及びブロードキャスト音響信号間の開始時間差及び周波数比を含む様々なパラメータの慎重な選択によって、一又は複数の交差領域セグメントが「活性化」され、一又は複数の混合ゾーンが提供される。この混合ゾーンでは、2つの円錐ブロードキャスト信号が非線形に相互作用し、当該ゾーンの岩石層の非線形特性を表す信号が生成される。

10

【0111】

上述の符号化方法、測定及び信号処理プロトコル、及び画像化方法は、図16a及び図16bに図示されている測定系に適用できる。この適用の際には、上述した一般的なアプローチに従う。図15の直線的なボアホール構成とは異なり、 $(t, \quad, d)$  空間内の同時到達の問題は存在しない。このように、故意に曲げられた軌道を有するボアホールを用いる図16の測定系は、非線形特性及び  $V_p / V_s$  速度比の一般的な3D画像化についてロバスト性が高い。画像化方法の副生成物は、画像化処理の中間工程におけるトモグラフィ速度反転法によって生成される  $V_p$  及び  $V_s$  伝播モデルである。

20

【0112】

屈曲し又は斜めになっているボアホール軌道の構成における方位角の対称性の不存在、及び、図16に示されている傾いた円錐音響波ブロードキャストは、直線上のボアホール内で小さな送信機アレイの軸をオフセットすることによって、又は、ワイヤー線又はパイプ伝送型の検層装置等によっても実現できる。

【0113】

図17a及び17bは、ボアホール周辺の岩石層の非線形特性及び  $V_p / V_s$  速度比の3D画像を生成するために用いられる様々な軸方向や円錐角度を有するボアホール構成における送信機 - 受信機配置の追加的な例を示す。図17aは、折り曲がった孫井戸を有する単一抗井配置の例を示す。ここでは、上方の円錐内で下方の円錐が完全に交差する。例えば、図17aに示されるように、上方の送信機1702は、下方の送信機1701によって生成されるより幅狭の円錐1704よりも幅広の音響エネルギー1705の円錐を生成するように構成され、これにより、下方の円錐が上方の円錐内で完全に交差する。送信機1701及び1702はいずれも、孫井戸1706内に配置される一方、受信機1703は、主垂直ボアホール1700内に配置される。図15及び図16a~図16dの構成と同様に、送信機1701及び1702は、ボアホール内の点音響源のアレイ、例えば線形アレイとして構成されてもよい。送信機1701及び1702によって生成される音響エネルギーは、交差ゾーン内の非線形物質中で相互作用し、音響エネルギーは、上記のとおり、選択規則に従って受信機1703において受信される。非線形混合ゾーンは、円錐1704と円錐1705との間にある交差軌跡1709を含む。この交差位置1709は、ボアホール1700に最も近い位置1707とボアホール1700から最も遠い位置との間に架け渡されている。

30

40

【0114】

図17bは、より急に折れ曲がった孫井戸を有し、下方の送信機がボアホール1700の軸とほぼ直交するようにエネルギーを放射するようになっている、単一抗井配置の他の例を示す。これらの抗井において、円錐同士の交差は、上述のような楕円では無く、双曲線である。しかしながら、類似の測定方法、符号化、データ処理及び画像化プロトコルを

50

適用することができる。また、円錐同士の交差は、閉曲線ではないため、調査の深度は、音響源の強さ、受信機の感度、及び信号処理アルゴリズムの効率性によって決定される。

#### 【0115】

楕円閉交差軌跡が得られる構成と双曲線開軌跡が得られる構成との間の相違は、閉楕円交差軌跡においては、周波数比の走査を最も近い点における方位角よりも高い方位角に対応する低い周波数比  $f_2 / f_1$  (例えば図10b参照) から開始することができる点にある。周波数比  $f_2 / f_1$  は、その後、例えば楕円上の最も近い点が活性化されるまで、増加される。走査は、最も遠い点に到達するまで継続されてもよい。遠方の周波数比  $f_2 / f_1$  を増加させることにより、活性化されるゾーンがなくなって信号が受信されなくなる。他方、交差が開曲線の場合には、周波数比  $f_2 / f_1$  の走査は、最も近くの点から開始され、双曲線のいずれかの側からの受信機への帰還信号が検出できなくなるまで継続されてもよい。

図18aは、抗井の垂直部分に受信機を有する垂直な抗井及び側線の例を示す。図18bは、本発明の態様に従って、受信機が側線内に設けられている垂直なパイロットホール及び水平な側線の他の例を示す。主垂直ボアホール1800は、音響エネルギー1804の垂直円錐を生成するように構成された送信機1801を備え、一方、側線ボアホール1806は、音響円錐1805を生成するように抗井された送信機1802を備える。受信機1803は、その用途に応じて、図18aに示すように主垂直ボアホール1800内に設けられても良く、側線ボアホール1806内や主ボアホール1800と側線ボアホール1806の両方に設けられてもよい。図17a~図17cの例に示したものと同様に、送信機1801、1802及び受信機1803は、それぞれ送信機アレイ及び受信機アレイを含んでも良い。側線ボアホール1806内の送信機1802は、主垂直ボアホール1800内の送信機1801の上方に設けられても良くその下方に設けられても良い。

#### 【0116】

採掘及び操作の観点からは、図17a、17b及び図18a、18bの抗井は、複雑さの点で幾らか異なるが、2つの円錐の交差までの距離を最大化することにより、ボアホールから離れたより深度の大きな検査を行うことができるなど、異なる構成を用いることには多くの利点がある。また、ボアホールに対して垂直に近い方向に音響エネルギーを生成する送信機は、小さな円錐角によって定義される走査に関するより大きな検出能力 (power) や角度解像度を提供することができる。上記の図は、利用可能な複数のボアホール構成の使用の構成例に過ぎない点に留意されたい。当然、上記以外にも、様々な方位角や仰角において2つの一次音響アレイの配置を可能にする構成がある。

#### 【0117】

上記の技術、選択規則と信号符号化の組み合わせは、ボアホール内で所定の距離だけ離れている2つの送信機からの音響エネルギーによって形成される2つの交差する円錐によって定義される領域を走査し画像化するために用いられ得る。上記の説明は、P + P S V相互作用を説明したものである。しかしながら、これ以外の可能な相互作用についても、表1の例を用いて、同様の方法で使用され得る。

#### 【0118】

上記の説明から理解されるように、岩石層を検査する様々な方法は、測量計画 (survey planning)、データ取得や保存、及び画像化の処理や解釈のためのシステムとともに実現され得る。図19は、本発明の実施形態に従って、測量計画、データ取得や保存、及び画像化の処理や解釈のためのシステムを示す。一実施形態において、掘削孔の中心における岩石層の円筒状領域の非線形特性、 $V_p / V_s$  速度比、及び伝播圧縮速度や伝播せん断速度の3D画像を生成することができる。一実施形態において、非線形特性及び  $V_p / V_s$  速度比の3D画像は、例えば、数百メートルの測定半径の外部に延びる、非線形特性及び  $V_p / V_s$  速度比の画像を含むことができる。

#### 【0119】

一実施形態におけるシステムは、ハードウェア及び/又はソフトウェア又はモジュール

化サブシステムのパッケージと考えることができる。サブシステム1900～1904は、測量計画及びその実行、坑内工具(downhole tool)の運搬、送信される音響波の符号化及びブロードキャスト、及び非線形信号の記録及び検出のために用いられる。サブシステム1901及び1905は、測量後の画像処理のために用いられる。サブシステム1900は、測量設計、データデザインの取得、制御及び記録のために用いられる。サブシステム1901は、予備的な非線形性及び速度の画像化のために用いられる。サブシステム1902は、受信機及びセンサの制御及び送信に用いられる。サブシステム1902は、制御された音響ブロードキャストを放射し、音響エネルギーを受信するように構成される。サブシステム1903は、ブロードキャスト信号を生成するために用いられる。サブシステム1904は、非線形信号の検出のために用いられる。サブシステム1905は、非線形性及び速度の画像化のために用いられる。

10

#### 【0120】

一実施形態において、サブシステム1900は、取得モジュール1907、データ取得制御部1908、データ前処理及び増強モジュール1930、及びデータ記憶装置1921をモデル化することを含む。一実施形態において、サブシステム1901は、初期速度モデルモジュール1906、及び、伝播圧縮速度及びせん断速度の画像、 $V_p/V_s$ 速度比の画像、及び混合ゾーンにおける非線形相互作用により生成された計測信号の振幅に関連する非線形性の画像を含む3次元画像の予備的な生成のためのモジュール1931を含む。一実施形態において、サブシステム1902は、工具運搬輸送モジュール1909、工具機械的制御部1910、第1音響源(S1)の方位角及び傾角を制御する方位角傾角制御部1917、及び第2音響源(S2)の方位角及び傾角を制御する方位角傾角制御部1918を含む。一実施形態において、サブシステム1903は、コード化信号生成器1911、周波数乗算及び時間遅延モジュール1912、第1の音響源(S1)に送信する信号を生成する信号増幅器1913、及び第2の音響源(S2)に送信する信号を生成する信号増幅器1914を含む。一実施形態において、サブシステム1904は、受信機R1、R2、・・・Rnから信号 $u_3(t)$ を受信する受信モジュール1922、受信モジュール1922から受信した信号を増強する非線形信号増強モジュール1924、テンプレート信号 $u_5(t)$ を生成するテンプレート信号生成モジュール1927、及び上記のように受信信号 $u_3(t)$ をテンプレート信号 $u_5(t)$ と相関処理する信号相関モジュール1928を含む。一実施形態において、サブシステム1905は、データ前処理及び増強モジュール1932、速度モデル反復モジュール1933、画像化反復モジュール1934、速度比の画像及び/又は非線形性の画像のための出力画像モジュール1936、決定された速度 $V_p$ 、速度 $V_s$ 、及び/又は $V_p/V_s$ 速度比を出力する出力速度モジュール1935を備える。

20

30

#### 【0121】

本明細書において、モジュールという語には、ハードウェア装置、ソフトウェアプログラム、又はその両方が含まれる。例えば、画像反復モジュールは、反復処理を実行するように構成されたハードウェアの一部であってもよく、コンピュータ上で実行され当該反復処理を実行するソフトウェアであってもよく、ハードウェアの一部とソフトウェアアプリケーションの両方であってもよい。

40

#### 【0122】

動作において、データ取得の前に、圧縮波及びせん断波のスローネス(compressional and shear slowness)に関する記録、及び、側方の連続性に関する情報を使用して、モジュール1906を用い、採掘孔から側方に延びる初期地層モデルが構築される。モジュール1906からの初期速度モデルは、前方モデル取得モジュール1907によって用いられ、オペレータがオペレータ入力を用いてデータ取得制御部1908をプログラムするために使用するデータ取得のための計画が提供される。

#### 【0123】

サブシステム1902が工具運搬輸送モジュール1909を解してボアホール内に配置され、必要に応じて工具機械的制御部1910によってボアホールの壁部に固定された後

50

、入力命令がコード化信号生成サブシステム 1903 に送信され、コード化信号生成モジュール 1911 によってコード化パルス列が生成される。コード化信号生成モジュール 1911 によって生成されたコード化信号は、周波数調整され、周波数乗算及び時間遅延モジュール 1912 によって遅延される。信号は、信号増幅器 1913、1914 によって、送信機又は音響源 S1 (1915) 及び S2 (1916) に提供され、例えば図 12a に示したとおり S1 及び S2 からの信号が混合ゾーンに同時に到達するように、これらの信号は遅延されてブロードキャストされる。

#### 【0124】

音響源 S1 (1915) 及び S2 (1916) からの音響ブロードキャストの傾角及び方位角を含むブロードキャストの形状 (geometry) は、データ取得制御部 1908 からの命令によって制御される。データ取得制御部 1908 は、角度制御命令を坑内の方位角及び傾角制御部 1917、1918 に送信する。工具運搬モジュール 1909、工具機械的制御部 1910、方位角及び傾角制御部 1917、1918 からの工具構成 (tool configuration) 及びブロードキャスト配置 (broadcast geometry) に関連する全てのデータは、本明細書において、記録取得パラメータ 1919 と呼ばれ、データ記憶装置 1921 に記録される。本明細書において記録ブロードキャスト情報と称される、コード化信号生成サブシステム 1903 からの符号化体系も、同様にデータ記憶装置 1921 に記録される。

10

#### 【0125】

一実施形態において、単数又は複数の受信機 1923 (例えば各受信機は、ハイドロフォンや 3 成分ジオフォン又はその両方 R1 ~ Rn を備えていてもよい) に記録されている信号モジュール 1922 からの信号は、非線形源の成分を強化し、線形相互作用源や雑音を減少させ又は実質的に抑圧するために、非線形信号強化モジュール 1924 によって処理される。符号 1925 で示されている信号受信モジュール 1922 からの生信号及び符号 1926 で示されている強化信号は、データ記憶装置 1921 に記憶される。テンプレート信号生成器 1927 で生成されたテンプレート信号  $U_s(t)$  は、図 12 ~ 図 14 の例に関して説明したように、信号生成器 1912 及び周波数乗算及び時間遅延モジュール 1912 によって生成される信号  $U_1(t)$  及び  $U_2(t)$  に由来し、1928 において、1925 で示されている受信信号と相関処理される。テンプレート信号  $U_s(t)$  と受信信号又は検出信号  $U_3(t)$  との相関処理は、相関信号出力モジュール 1929 により、相関処理された信号  $M(t, d, z_3)$  を抽出するために用いられる。相関処理された信号も、データ記憶装置 1921 に記憶される。

20

30

一実施形態において、構成要素又はモジュール 1909 ~ 1929 を用いて実現されるデータ取得処理は、抗井中の複数の位置 ( $z_3$ ) において、様々なビーム配置を用いて、繰り返し行われてもよい。一実施形態において、既に記録されているデータを、取得パラメータの変化を導くために用いることができる。例えば、記憶装置 1921 に記憶されたデータは、例えば前処理及びホドグラム処理モジュール 1930 におけるホドグラム分析により、さらに強化されてもよい。記憶装置 1921 に記憶されているデータは、画像化モジュール 1931 において非線形特性及び / 又は  $V_p/V_s$  比を生成するために、初期速度モデルモジュール 1906 からの初期速度モデルとともに用いられる。これらは、取得設計モジュールによるモデリング、及び / 又は、データ取得制御部 1908 によって制御される取得パラメータを精緻化するために用いられる。

40

#### 【0126】

調査が完了した後、データ処理が、データ前処理及び強化モジュール 1932 によって実行される。一実施形態において、最終分析用にデータの前提条件を調整するために、ホドグラム分析が実行される。モジュール 1906 における初期速度モデル及びモジュール 1931 からの画像は、速度モデル反復モジュール 1933 を通じた速度モデルのさらなる反復、及び、速度モデリングモジュール 1933 及び画像化モジュール 1934 を通じた非線形特性及び / 又は  $V_p/V_s$  比の画像化の反復の開始点として使用される。反復の最終結果は、出力モジュール 1935 を通じた最適速度モデル出力、及び、出力モジュール

50

ル 1 9 3 6 を通じた  $V_p / V_s$  比画像及び / 又は非線形特性画像を含む画像である。

【 0 1 2 7 】

一実施形態において、上記のようなシステムの実行は、採掘孔から比較的遠方（例えば、数百メートル）の画像化に好適であり、信号対雑音比及び複雑な石油物理学的な、層序の、構造的な文脈からの微弱信号の検出を最大化するように設計された構成を含む。比較的小さな領域を調査し特性の変化が小さく強い帰還信号が得られる採掘孔近傍の用途においては、信号検出や速度モデル反復に関するシステムの一部の態様又は部分又はモジュールを省略することもあり得る。同様に、要求が厳しくない条件では、ハードウェアの一部の態様は、単純化され得る。例えば、固定された 3 成分ジオフォンは、中心に搭載された構成のハイドロフォン受信機で代替され得る。

10

【 0 1 2 8 】

また、システムのデータ取得部分をシステムの画像化部分と結びつけて説明したが、データの取得は、 $V_p / V_s$  比及び / 又は非線形特性とは別個に実行されてもよい。実際に、取得データは、第 1 のエンティティとデータ記憶装置 1 9 2 1 に記憶されたデータにより実現され得る。データ記憶装置 1 9 2 1 内の取得データは、次に、第 2 のエンティティに送信される。第 2 のエンティティは、第 1 のエンティティと同じでもよく異なるものでもよい。当該第 2 のエンティティは、 $V_p / V_s$  及び / 又は非線形特性の画像を得るために、上述した画像化サブシステム又は画像化方法を用いることができる。

【 0 1 2 9 】

また、以上の説明においては各モジュールは特定の機能を持つように説明したが、一以上のモジュールにおける任意の機能は、任意の一又は複数のモジュールに移転されてもよい。例えば、コード化信号生成サブシステム 1 9 0 3 の一部又は全部の機能は、非線形信号検出サブシステム 1 9 0 4 に移転され得る。

20

【 0 1 3 0 】

また、用語「プロセッサ」は、ここでは、1 又は複数のプロセッサを包含することは理解されるべきである。1 又は複数のプロセッサは、ここで記述した方法又は方法の一部を実行するように構成することができる。1 又は複数のプロセッサは、例えば、分散コンピューティング環境のように、1 又は複数のコンピュータに配置することができる。一の実施形態において、本発明の実施形態に従って方法を実行するプログラムは、パーソナルコンピュータ又はサーバのようなコンピュータにおいて、又は、複数のコンピュータを備える分散コンピューティング環境において、プログラムプロダクトとして具体化することができる。プロセッサに対して言及された場合、その用語はこのようなあらゆるコンピューティング環境を包含することを理解すべきである。コンピュータは、例えば、デスクトップコンピュータ、ラップトップコンピュータ、ハンドヘルドコンピューティングデバイスを含み得る。コンピュータプログラムプロダクトは、上述した方法をコンピュータが実行するようにプログラミングするために用いられ記憶された命令を有するコンピュータ読取可能な媒体、又は、記録媒体を含み得る。好適な記録媒体の例は、フロッピーディスク、光ディスク、DVD、CDROM、光磁気ディスク、RAM、EPROM、EEPROM、磁気又は光カード、ハードディスク、フラッシュカード（例えば、USBフラッシュカード）、PCMCIAメモリカード、スマートカード、又は他の媒体を含むあらゆるタイプのディスクを含む。或いは、一部又は全体のコンピュータプログラムプロダクトを、リモートコンピュータ又はサーバから、例えば、インターネット、ATMネットワーク、広域ネットワーク（WAN）又はローカルエリアネットワーク等のネットワークを介して、ダウンロードすることができる。

30

40

【 0 1 3 1 】

現時点で最も実用的であり好ましいと考えられる態様に基づいて、本発明を例示のために詳細に説明したが、このような詳細な説明は例示のみを目的としたものである。本発明は開示された実施形態に限定されるものではなく、むしろ添付された特許請求の範囲の趣旨及び範囲に入る変形や均等な配置も本発明に含められることが意図されている。更なる例として、本発明においては、あらゆる実施形態の一又は複数の特徴を他の実施形態の一

50

又は複数の特徴と可能な限り結合することができる。

【図1】

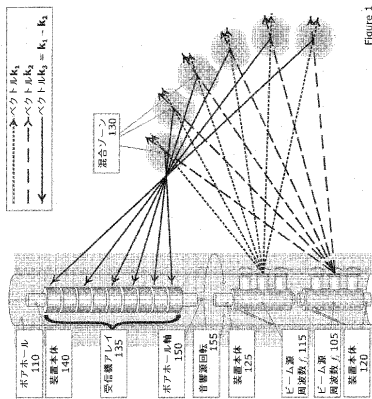


Figure 1

【図3】

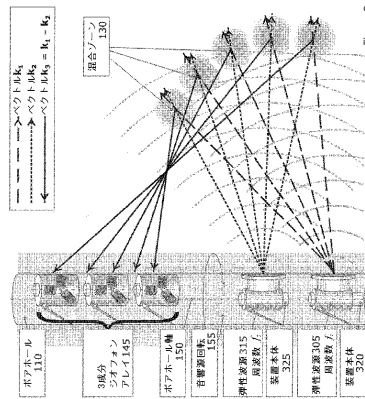


Figure 3

【図2】

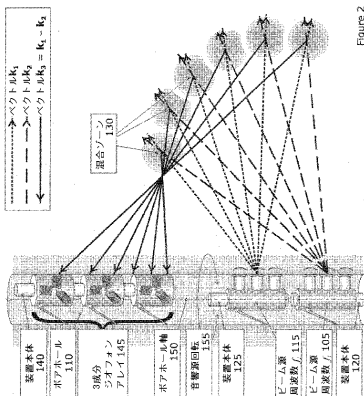


Figure 2









【 図 17 】

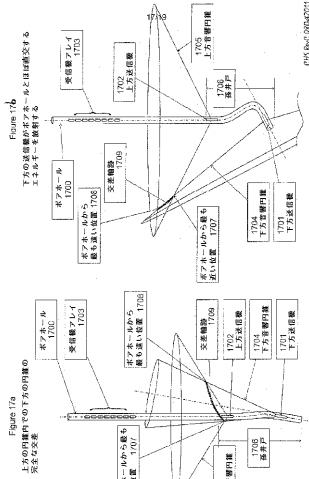


Figure 17a

上方の制御部で下方の制御部と通信する

【 図 18 】

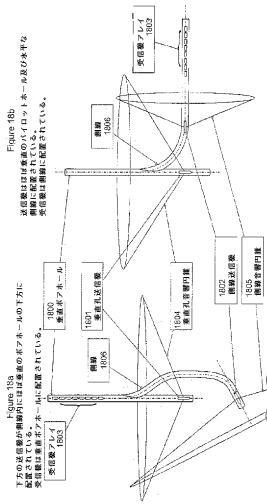


Figure 18a

下方の制御部が上方の制御部と通信する

【 図 19 】

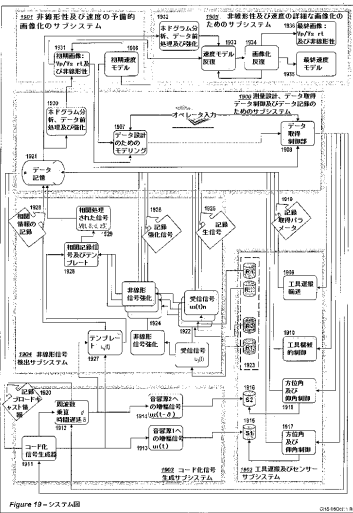


Figure 19

システム図

## 【 国際調査報告 】

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

|   |
|---|
| International application No<br>PCT/US2011/059967 |
|---|

| <b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b><br>INV. G01V1/46<br>ADD.   |   |  |
|---|---|--|
| According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC   |   |  |
| <b>B. FIELDS SEARCHED</b><br>Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)<br>G01V  |   |  |
| Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched   |   |  |
| Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)<br>EPO-Internal, WPI Data  |   |  |
| <b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>   |   |  |
| Category*   | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages  | Relevant to claim No.                              |
| X   | US 2010/265794 A1 (JOHNSON PAUL A [US] ET AL VU CUNG [US] ET AL)<br>21 October 2010 (2010-10-21)<br>abstract; claims 1-10,14-19,34-39; figures 1,4-6<br>paragraphs [0020] - [0025], [0028], [0030] - [0032], [0036], [0039] - [0041], [0044], [0045]<br>----- | 1-22   |
| <input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.  |   |  |
| * Special categories of cited documents :<br>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance<br>"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date<br>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)<br>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means<br>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed<br>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention<br>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone<br>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art<br>"&" document member of the same patent family |   |  |
| Date of the actual completion of the international search   |   | Date of mailing of the international search report |
| 14 December 2012  |   | 21/03/2013   |
| Name and mailing address of the ISA/<br>European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2<br>NL - 2280 HV Rijswijk<br>Tel. (+31-70) 340-2040,<br>Fax: (+31-70) 340-3016  |   | Authorized officer                                 |
|   |   | Fernandes, Paulo                                   |

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

Information on patent family members

International application No

PCT/US2011/059967

| Patent document<br>cited in search report | Publication<br>date | Patent family<br>member(s) | Publication<br>date |
|---|---------------------|----------------------------|---------------------|
| US 2010265794                             | A1                  | 21-10-2010                 |                     |
|   |                     | AR 076325 A1               | 01-06-2011          |
|   |                     | AR 076326 A1               | 01-06-2011          |
|   |                     | AU 2010236139 A1           | 27-10-2011          |
|   |                     | AU 2010236226 A1           | 10-11-2011          |
|   |                     | CA 2758938 A1              | 21-10-2010          |
|   |                     | CA 2758959 A1              | 21-10-2010          |
|   |                     | CN 102395903 A             | 28-03-2012          |
|   |                     | CN 102395904 A             | 28-03-2012          |
|   |                     | EA 201171254 A1            | 30-03-2012          |
|   |                     | EA 201171255 A1            | 30-05-2012          |
|   |                     | EP 2419762 A1              | 22-02-2012          |
|   |                     | EP 2419763 A1              | 22-02-2012          |
|   |                     | JP 2012524271 A            | 11-10-2012          |
|   |                     | JP 2012524272 A            | 11-10-2012          |
|   |                     | US 2010265794 A1           | 21-10-2010          |
|   |                     | US 2010265795 A1           | 21-10-2010          |
|   |                     | WO 2010121200 A1           | 21-10-2010          |
|   |                     | WO 2010121202 A1           | 21-10-2010          |

-----

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/US2011/059967

**Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)**

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1.  Claims Nos.:  
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
  
2.  Claims Nos.:  
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
  
3.  Claims Nos.:  
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

**Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)**

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

see additional sheet

1.  As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
  
2.  As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
  
3.  As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
  
4.  No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

1-22

**Remark on Protest**

- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
- The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- No protest accompanied the payment of additional search fees.

International Application No. PCT/US2011/059967

**FURTHER INFORMATION CONTINUED FROM PCT/ISA/ 210**

This International Searching Authority found multiple (groups of) inventions in this international application, as follows:

## 1. claims: 1-22

System/method for investigating rock formations comprising 2 acoustic sources emitting intersecting signals at different frequencies and a receiver to detect the resultant signal at a frequency equal to the difference of frequencies of the sources.

---

## 2. claims: 23-64

System/method for investigating rock formations comprising 2 acoustic sources emitting intersecting signals at different frequencies and a receiver to detect the resultant signal at a frequency equal to the difference of frequencies of the sources wherein the acoustic signals comprise a plurality of pulses.

---

## 3. claims: 65-107

System/method for investigating rock formations comprising 2 acoustic sources emitting intersecting signals at different frequencies and a receiver to detect the resultant signal at a frequency equal to the difference of frequencies of the sources wherein a storage device is provided to store specific measurement parameters.

---

## 4. claims: 108-128, 134-153, 186, 187, 215, 216

System/method for investigating rock formations comprising 2 acoustic sources emitting intersecting signals at different frequencies and a receiver to detect the resultant signal at a frequency equal to the difference of frequencies of the sources wherein the acoustic signals comprise a plurality of pulses and a second processor is provided to generate a 3D image of non-linear properties of a rock formation.

---

## 5. claims: 129-133, 154-158, 183-185, 212-214

System/method for investigating rock formations comprising 2 acoustic sources emitting intersecting signals at different frequencies and a receiver to detect the resultant signal at a frequency equal to the difference of frequencies of the sources wherein a 3D image of non-linear properties of a rock formation is generated and a wave velocity model is iteratively updated.

---

## 6. claims: 159-182, 188-211



International Application No. PCT/US2011/059967

**FURTHER INFORMATION CONTINUED FROM PCT/ISA/ 210**

System/method for investigating rock formations comprising 2 acoustic sources emitting intersecting signals at different frequencies and a receiver to detect the resultant signal at a frequency equal to the difference of frequencies of the sources wherein the acoustic signals are conical.

---

7. claim: 217

Plurality of interconnected subsystems for investigating non-linear properties of a rock formation.

---

## フロントページの続き

(81) 指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN

(71) 出願人 510341075

ロスアラモス ナショナル セキュリティ リミテッド ライアビリティ カンパニー  
 Los Alamos National Security LLC  
 アメリカ合衆国 ニューメキシコ州 87544, ロスアラモス, 私書箱1663, メールストップ  
 エー187  
 Mail Stop A187, P.O. Box 1663, Los Alamos, New Mexico 87544 United States of America

(74) 代理人 100126572

弁理士 村越 智史

(74) 代理人 100125195

弁理士 尾畑 雄一

(72) 発明者 ヴー, カング カック

アメリカ合衆国 テキサス州 77005 ヒューストン, ラファイエットストリート 2811

(72) 発明者 スケルト, クリストファー エイチ

アメリカ合衆国 テキサス州 77042 ヒューストン, インウッドドライブ 10219

(72) 発明者 ニヘイ, カート ティー.

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94618, オークランド, エイミードライブ 5839

(72) 発明者 ジョンソン, ポール アラン

アメリカ合衆国 ニューメキシコ州 87506 サンタフェ, カントリーロード 113 サウス  
 04

(72) 発明者 ゴヤー, ロバート エー.

アメリカ合衆国 ネバタ州 89503 レノ, ディッカーソンロード 2020

(72) 発明者 テンケイト, ジェームズ エー.

アメリカ合衆国 ニューメキシコ州 87544 ロスアラモス, トッドループ サウス 542

(72) 発明者 ル パス, ピエール イヴ

アメリカ合衆国 ニューメキシコ州 87544 ロスアラモス, ラバジャダ 625

(72) 発明者 ラーマット, カレン エス.

アメリカ合衆国 ニューメキシコ州 87544 ロスアラモス, 11番ストリート 1051

Fターム(参考) 2G105 AA02 BB02 CC01 DD04 EE04 LL07 LL09 LL10