

平成21年3月31日現在

研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18360428
 研究課題名(和文) 坑井掘削音を利用したインテリジェント光ファイバLWDシステムの開発
 研究課題名(英文) Development of an intelligent LWD system using drill-bit signal as a source
 研究代表者
 浅沼 宏(ASANUMA HIROSHI)
 東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
 研究者番号：50250717

研究成果の概要：

光ファイバ内部に作成したファイバブラックグレーティング(FBG)をセンサとして利用する多機能LWDシステムの開発を目的とし、掘削時にビットから発生する弾性波を音源として、地層内音波速度を計測するシステムを開発し、試験井内で性能を評価した。一本の光ファイバから、地層内音波速度、地層内圧力、地層内温度、泥水温度、泥水圧力、掘削システムの振動を検出可能なインテリジェントLWD計測器について検討した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,900,000	0	8,900,000
2007年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	1,830,000	16,830,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・地球・資源システム工学

キーワード：LWD, FBG, 遅延時間推定, 掘削音

1. 研究開始当初の背景

坑井の掘削は、鉱山、土木分野に加え、地下流体資源の採取や地球科学上の情報収集のため不可欠な手段として古くから用いられてきた。また、その一方で、近年、技術開発や事業化が進みつつある土壌汚染調査、廃棄物地下保管、二酸化炭素地下貯留(CCS: Carbon Capture and Storage)、構造物の健全性評価等でも坑井掘削は不可欠な工程のひとつとなっている。また、石油に代表される地下流体資源開発ではスリム/ウルトラスリムホールと呼ばれる直径数センチ以

下の小口径の坑井掘削により、開発期間およびコストの低減が進められつつある。さらに地球科学では、新たな地球深部探査船が稼動し、深海底の大深度掘削が試みられる予定であり、これらの分野でも掘削技術が開発/調査の中心的工程として担う役割は大きくなりつつある。

掘削時には掘削状況や掘削井周辺の地下情報をリアルタイムに計測することにより、工程監視、ターゲットへの到達検知、地下構造情報取得等のために有用な情報を取得できる。特にスリムホール掘削や大深度海洋底

掘削では、掘削終了後の坑井内計測（検層）が不可能な場合が多く、このため掘削時リアルタイム検層（LWD：Logging While Drilling）技術の重要性が指摘されている。しかしながら既存のLWD機器は既存の検層機器を改造・改良し掘削システムに組み込んだものがほとんどであるため、システムの大規模化・高コスト化を避けることはできない。このため、LWDを使用できる事例が限定されているのが現状である。

一方、光ファイバ自体をセンサとして用いる光ファイバセンシング技術についてみると、光ファイバ上に作られた光学フィルタの一種であるファイバブラックグレーティング（FBG）をセンサとして使用する試みは、フローメーターや圧力センサへの適用を中心に様々な分野で研究が行われている。これらの研究では、対象とする現象のみに対してFBGセンサが感度を有するように、センシング部の構造、信号処理法等に関する研究が実施されているが、FBGセンサをコーティングした場合の感度変化を理論的に検討し、それにより多物理量計測を実現した例はない。

本研究の代表者らは、坑井内弾性波計測システムの開発、FBGセンサを用いた坑井内流速計測器の開発、非定常連続型掘削音の解析による掘削工程モニタリングおよび坑井前方イメージング技術の開発、時間一周波数領域での多成分信号処理法の開発等について実績を有しており、これらの知見を生かして本研究を計画した。

2. 研究の目的

本研究は上記の背景を鑑み、光ファイバ内部に作成した一種の光学フィルタであるファイバブラックグレーティング（FBG）をセンサとして利用し、多機能LWDシステムを開発することを目的として実施した。本助成期間の研究により、掘削時にビットから発生する弾性波を音源として、地層内音波速度を計測するシステムを開発し、実規模テスト坑井内で性能を評価することとした。また、FBGセンサが複数の物理量に対して感度を有することを利用して、一本の光ファイバから、地層内音波速度、地層内圧力、地層内温度、泥水温度、泥水圧力、掘削システムの振動を検出可能なインテリジェントLWD計測器のプロトタイプを実現し、本システムの実用化へ向けた技術の基礎を構築することを計画した。

研究で開発するシステムは、掘削システム、および、掘削井近傍の多様な情報を掘削作業を停止することなく連続的に取得できる点が特徴である。これは掘削にかかるコスト、時間の低減に直接的に寄与する。また、1つのシステムの構成を変更することなくソフ

トウェアにより計測する物理量を選択することより、現場の状況に対応した計測を機動性を有して実施できる。さらに本システムは通常の汎用的な小出力レーザ機器および光学回路部品を使用するため、小型、シンプルかつ安価なシステムを実現できる。

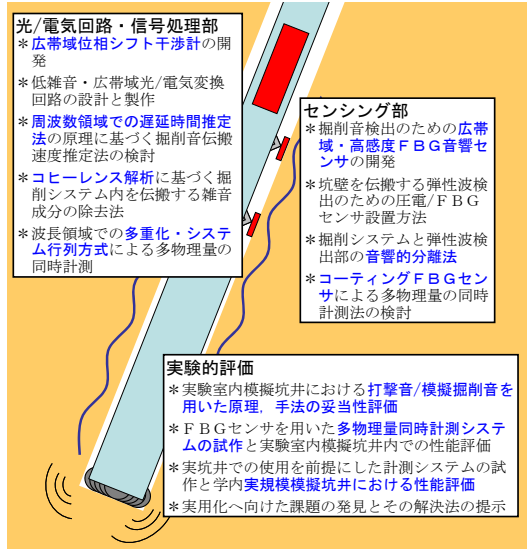
本研究で研究開発するシステムでは通信用の光ファイバおよび光回路を使用するため、使用可能な温度には上限が存在するものの（約100℃）、廃棄物地下保管、地圏環境モニタリング、浅部地下流体資源開発、土木工学、地殻工学におけるLWD技術として使用可能である。また、本研究の一部であるコーティングFBGセンサと、多重情報の逆解析の一種であるシステム行列を用いた多物理量の同時計測技術は、ほぼそのまま他の計測分野へ適用可能である。たとえば、建築構造物内にFBGセンサを埋め込んだ「インテリジェント構造物」や海底光通信ケーブルへ圧力、温度、振動等のセンシング機能を付加した「大規模海底計測ネットワーク」などへの適用が考えられる。

本研究の主たる学術的特色は、(a)掘削音を音源として利用する地層内弾性波速度計測法の開発と(b)一本の光ファイバを利用した多物理量の同時計測技術の開発にある。既存の手法と比較した本手法の特色ならびに学術的な研究課題は以下の表のようになる。

	既存の手法(音波検層)	本手法
弾性波源	圧電トランスミッター、電歪素子	掘削ビット
検出器	圧電超音波センサ	FBGセンサ
弾性波の性状	単発信号	非定常連続信号
速度推定法	センサでの弾性波到達時刻	2つのセンサ間での遅延時間
掘削時リアルタイム計測	通常は不可能	可能
多機能計測	他の既存システムと併用することにより実現	1本の光ファイバ上の複数のFBGセンサにより実現
実現のための主な研究課題		<ul style="list-style-type: none"> * 非定常連続信号の2点計測による遅延時間推定法 * 掘削システム内を伝搬する不要振動/不要モード弾性波除去のための機構と信号処理法 * 表面コーティングによるFBGセンサの感度変化法 * システム行列解析による各情報の分離・抽出法 * 実坑井内での安定性評価

3. 研究の方法

本研究における研究課題とその達成方法を下図に示す。



	光/電気回路部	信号処理部	センシング部	実験的検討
FY18	<ul style="list-style-type: none"> 広帯域位相シフト干渉計・光/電気変換回路の設計と試作 	<ul style="list-style-type: none"> 遅延時間推定法の原理に基づく掘削音伝搬速度推定法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 坑壁へのセンサ接触法の検討 掘削システムとセンシング部の音響的分離方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> マイクロフォンを使用した掘削音検出のための広帯域・高感度FGB音響センサの開発 坑壁を伝搬する弾性波検出のための圧電/FGBセンサ設置方法 掘削システムと弾性波検出部の音響的分離法 コーティングFGBセンサによる多物理量の同時計測法の検討
FY19	<ul style="list-style-type: none"> 多重化のための光/電気回路部の設計・試作 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削システム内を伝搬する雑音除去法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削システムとセンシング部の音響的分離方法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> FGBセンサを使用した掘削音検出のための広帯域・高感度FGB音響センサの開発・試作 FGBセンサを使用した掘削音検出のための圧電/FGBセンサ設置方法 掘削システムと弾性波検出部の音響的分離法 コーティングFGBセンサによる多物理量の同時計測法の検討
FY20	<ul style="list-style-type: none"> 多重化のための制御方法・ソフトウェアの検討・試作 	<ul style="list-style-type: none"> 多物理量同時計測のためのシステム行列理論に基づく情報復元法の検討 	<ul style="list-style-type: none"> 多物理量同時計測のためのコーティング型FGBセンサの理論的検討・設計 コーティング型FGBセンサの試作・センシング機能の評価 	<ul style="list-style-type: none"> FGBセンサを使用した掘削音検出のための広帯域・高感度FGB音響センサの開発・試作 FGBセンサを使用した掘削音検出のための圧電/FGBセンサ設置方法 掘削システムと弾性波検出部の音響的分離法 コーティングFGBセンサによる多物理量の同時計測法の検討

坑井掘削時の光ファイバリアルタイムインテリジェント検層システム

具体的研究内容は以下の通り

- (1) 光/電子回路および信号処理部の開発 (浅一広帯域位相シフト干渉計および光・電気変換回路の設計と試作: 掘削音から弾性波伝搬速度を高精度に検出するためには100kHz程度までの帯域を有する光/電気回路が必要である。申請者らがこれまで製作・使用してきた数kHzまでの帯域を有する位相シフト干渉計, 光/電気変換回路の原理に基づき, 回路シミュレーションの後に新たに干渉計, 回路を設計・試作し, FGBセンサを接続して性能を評価した。
- 遅延時間推定法の検討: ここでは, 信号の周波数特性に依存せずに遅延時間推定が可能で一般化相互相関関数の原理を適用し, 遅延時間の推定を行うことを検討した。周波数領域での一般化相互相関関数のコヒーレンスによる重み付け, あるいは, 最尤推定法の原理に基づく遅延時間推定を検討し, シミュレーション, および, (c)で取得した実データの解析により, 最適な解析方法およびパラメータを決定した。

- 多重化のための光・電気変換回路の設計と試作: 波長可変レーザおよび高速光スイッチを使用して波長領域での多重化により複数のFGBセンサからの反射光を1本のファイバにより伝送・分離する方法を検討した
- 掘削システム内を伝搬する雑音の除去法: 地層内弾性波速度検出用の2つのFGBセンサ, および掘削システムに組み込んだ1つのFGBセンサで取得した信号に「時間一周波数コヒーレンスフィルタリング処理」を施すことにより雑音成分を低減する手法を検討した。
- 多物理量同時計測のためのシステム行列理論の検討: 雑音成分が混入し, さらに多くの情報が重畳した場合のシステム行列の解法を検討し, 限られた数のFGBセンサから推定可能な未知数の数, 分離された信号に対するFGBセンサの感度の影響, 雑音成分の影響を検討した。
- 多重化のための制御方法の検討とソフトウェアの試作: 坑井内でリアルタイムに全ての処理を行うために, 多重化伝送された信号の復元, システム行列による多物理量の分離を自動的に行うソフトウェアを作成した。

(2) センシング部の開発

- 坑壁へのセンサ接触法の検討: FGBセンサあるいはマイクロフォンを坑壁へ接触させ, 地層内を伝搬する弾性波を効率よく検出するための機構を検討した。ここではセンサを埋め込んだメタルパッドをアーム機構を介して坑井へ接触させる方法を検討した。また, 掘削システムと弾性波検出部のリンク機構についても検討した。幾つかのプロトタイプを試作し, 岩石試験片を用いて性能を評価した。
- 掘削システムとセンシング部の音響的分離方法の検討: センシング部と掘削システム間のリンク部にダンピング機能を持たせ, 掘削システムの振動のセンサ部への伝搬を抑圧する方法を検討した。動的メカニズム設計支援CADソフトを用いて, ダンピング機構の効果をシミュレートした。この結果をもとにダンピング機構を試作し, リンク機構へ組み込んだ。
- 高感度FGBセンサの設計・試作: グレーティングの構造を検討し, 狭帯域・高感度のFGBセンサを製作する方法を検討した。
- コーティングFGBセンサの特性の検討と試作・特性評価: FGBセンサ表面に樹脂をコーティングする, あるいはFGBセンサを金属チューブ内に挿入する等によりFGBセンサの感度を変化させる方法を検討した。FGBの反射理論式を拡張し, コーティングの影響を含めた表現へ発

展させた。実用可能な幾つかのコーティング素材、金属について、コーティング/チューブの形状と感度の変化の関係を検討した。

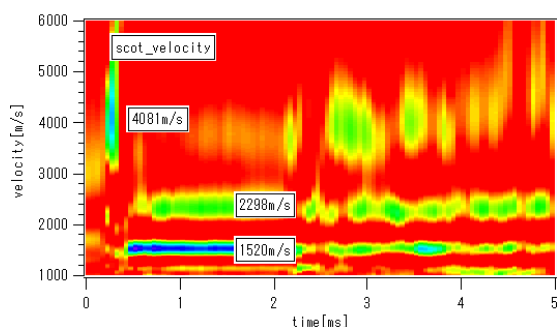
(3) システム性能の実験的評価

- －ハイドロフォンを用いた室内実験用弾性波速度計測システム的设计・試作：本研究で生じる問題を分離・簡略化するために、まず、センサとしてハイドロフォンを使用した実験システムを設計・試作した。室内実験のために、(b)で検討したセンサ接触、ダンピング機構を組み込み、直径 100mm、深さ 1~2m の坑井内で動作するシステムを作成した。
- －打撃音、模擬掘削音を使用したテスト：上記の実験システムおよびリファレンス圧電センサを設置した岩石試験片に打撃音、あるいは、ドリルによる振動を印加し信号を取得し、これにより、本システムの感度、周波数特性、ダンピング効果等を評価した。これらの結果を、課題(a)での遅延時間推定法の検討、および(b)でのセンシング部・ダンピング機構の検討へフィードバックした。
- －F B G センサを用いた模擬坑井実験用弾性波速度計測システム的设计・試作・性能評価：直径 100mm、深さ 30m 程度の坑井内で使用可能なシステムを設計・製作した。学内のテスト用坑井に本システムを降下させ、モータにより生じた模擬掘削音を音源とし、実用性能の評価を行った。

4. 研究成果

本研究の主な成果は以下の通り。

- －F B G を使用した模擬実験装置を作成し模擬掘削音を使用した室内実験を行った。その結果、弾性波の非定常性に着目した時間一周波数領域での解析を行うことにより、坑壁に沿って伝搬する縦波およびS波の速度を検出可能であることを見出した(下図参照)。また同時に、ビットから発生する弾性波は、ある程度の非定常性を有している方が各モードの分離を高い信頼性で行えることも明らかになった。このことはコア掘削時に特殊なビットを使用する必要があることを示している。



- －学内試験坑井用のプロトタイプシステムを試作し、坑井内での性能評価を行った。その結果、ダンピング機能に改善の余地があるものの、坑壁に沿って伝搬する弾性波を検出することに成功した。
- －最適なセンサ間隔、帯域、サンプリング周波数等について実験的に検討を行った結果、約 20 cm 程度のセンサ間隔の場合、最も S N 比が高く、また、実用的な速度分解能を有した計測を行えることが明らかになった。また、音源からの距離を離れた方が、各モードの分離を明瞭に行えることが明らかになった。
- －システム行列の固有値解析により、F B G センサが検出した物理量を分離できることを明らかにした。また、各 F B G センサの各物理量に対する感度の差が大きい場合、あるいは、各センサ間で検出する物理量の差が大きい場合に本手法が有効に働くことを見出した。
- －コーティングによる F B G センサの感度変化について、理論的、実験的に検討を行った。その結果 F B G をメタルチューブ内に設置し、それをポリウレタン系接着剤で固定した場合に、数倍の感度向上が得られることが明らかになった。ただし、接着剤の長期にわたる耐環境性、特に水中での耐久性については今後検討を行っていく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ①相馬宣和, 中島貴弘, 大野哲二, 中間茂雄, 浅沼 宏, 地下空洞内部における掘削振動を音源とした多成分信号処理法に基づく周辺地下構造推定法の検討, 土木学会誌, 757 巻 3-66 号, 1020-1034 (2007) (査読有)

- ②H. Asanuma, M. Tanaka, H. Niitsuma, R. Sato, Development of an optical micro hydrophone for mass production, SEG Expanded Abstracts, 巻号無, 436-439 (2006) (査読有)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅沼 宏 (ASANUMA HIROSHI)

東北大学・大学院環境科学研究科・准教授
研究者番号：50250717

(2) 研究分担者

新妻 弘明 (NIITSUMA HIROAKI)

東北大学・大学院環境科学研究科・教授
研究者番号：90108473

(3) 連携研究者