油井探査用光ファイバセンサ

山手 勉^{†1}, Rogerio T. RAMOS^{†2}, Robert J. SCHROEDER

Schlumberger-Doll Research, Schlumberger Oilfield Services, Ridgefield, CT USA

Fiber Optics Sensors for the Exploration of Oil and Gas

Tsutomu YAMATE,^{†1} Rogerio T. RAMOS,^{†2} and Robert J. SCHROEDER

Schlumberger-Doll Research, Schlumberger Oilfield Services, Ridgefield, CT USA

(Received January 12, 2005)

A large variety of sensors are used in the oil service industry for the exploration of oil and gas. These sensors should operate under severe conditions such as high temperature, high pressure, etc. Several fiber optical sensors have been used in the oil field industry and new fiber optical sensors are under research and development. Applications where fiber optical sensors have been successfully used and the fiber optics pressure sensors with small temperature, pressure cross sensitivity for this industry will be reviewed.

Key Words: Optical fiber, Fiber Bragg grating, Side hole fiber, Pressure sensor

1. はじめに

2010年頃までには石油可産量のMid Pointを迎えると予想され¹⁾, 新規の油田開発はますます困難になる。現状の回収効率は30 %程度なため、既存の油井で回収効率を上げる技術が特に重要である。回収効率を最大にするには、貯留層にセンサを埋め込み、リアルタイムで油井を監視し、貯留層を管理するシステムが効果的である。例えば、一本の油井は、傾斜掘削、水平掘削の技術により地下で複数の枝分れしている。各層は異なる油、ガス、水の比率、温度、圧力等を持つため、各層で物理量を計測する必要がある。このような監視技術に、航空宇宙分野で開発されたスマートストラクチャ技術が応用できる²⁾。時分割多重や波長分割多重を用いて、一本の光ファイバで分布測定や複数の異なる物理量を測定し、光ファイバネットワークにより貯留層全体をパーマネントに監視するシステムである。環境に敏感な光部品や光計測器を地上に設置し、光ファイバセンサのみを坑井に設置する。従って、高価な光部品や光計測器を複数のセンサで共有でき、センサ単価を下げる事が可能である。また、油井は高温高压(摂氏175度, 1360気圧)となるため、エレクトロニクスの信頼性が問題である。光ファイバシステムの場合、センサエレクトロニクスが不要なため、信頼性の向上が期待できる。

ここでは分布型温度センサを用いた油井監視システムの応用例の紹介と、研究開発が行われているファイバブラッググレーティング(Fiber Bragg Grating, FBG)の圧力センサに関して解説する。

2. 分布型温度センサ

油井で使われている分布型センサにラマン散乱を利用した分布型温度センサがある(Distributed Temperature Sensor, DTS)²⁾。光ファイバの片端から光パルスを入射すると、光パルスはファイバ中を伝搬しながら散乱を生じ、減衰していく。散乱光の内、ラマン散乱光は波長が若干シフトし、短波長にシフトした光(反ストークス光)の強度は温度により大きく変化するので、光ファイバの温度がわかる。また、位置情報は散乱光が入射端に戻るまでの時間を測定すれば、散乱を生じた位置を特定できる。測定間隔は光のパルス幅で決まる。このようにして、分布型温度センサは1 m間隔で数キロ以上に渡り連続的な温度測定ができる。

石油探査の分野では、例えば水蒸気圧入法(steam flooding)の際の温度分布測定に用いられている³⁾。水蒸気圧入法は石油層に熱エネルギーを与えることにより原油の粘度を下げて採取率を増加させる方法である。圧入された水蒸気の移動分布や生産井に到達する現象を坑内の温度

^{†1}現在の所属: シュルンベルジェ(株) (〒229-0006 神奈川県相模原市淵野辺2-2-1)

^{†1}Present Address: Schlumberger K. K., 2-2-1 Fuchinobe, Sagami-hara, Kanagawa, 229-0006 Japan

^{†2}Present Address: Sensa Schlumberger, Gamma House, Chilworth Science Park, Southampton, Hampshire, SO16 7NS, UK

分布を連続的に測定する事により監視する事ができる。

Fig. 1は水蒸気圧入の監視井戸の分布型温度測定の実例である。注入井戸からの水蒸気圧入後、下位の2砂岩層は圧入直後から温度上昇が観測され、その後水蒸気が到達している。一方、上位の1砂岩層は15ヶ月後水蒸気圧入が観測されている。

シュルンベルジェ社では300以上の油井に分布型温度センサを設置しており、分布型温度センサはオイルフィールドで広く使われている。

3. FBGを用いた圧力センサ

3.1 スタンダードファイバ

ファイバブラッググレーティング(FBG)技術は光通信の分野で応用されているが、センサとしても優れた特徴を持っている。FBGは小さく、歪みに対する優れた線形性を持ち、波長分割多重や時分割多重を用いて分布計測ができるため、貯留層全体をパーマメントに監視するシステムへの応用が期待されている。FBGは波長選択性を持つ反射鏡の役目をする。FBGの波長は温度や圧力等の外部からの物理量の作用を受けてシフトするため、物理量に比例した信号が得られる²⁾。シュルンベルジェ社では、高温高圧下の分布計測用のセンサとしてFBGを用いたセンサの研究を行っている。

Fig. 2は異なる温度における、スタンダードのシングルモードファイバを用いたベアFBGの圧力応答を示す⁴⁾。静水圧下のベアFBGの圧力感度は小さく約0.03 pm/psi (pound per square inch, 1気圧 = 14.7 psi) で、例えば計測器が0.2 pmの分解能を持つ場合、約7 psi (0.5気圧) の圧力変化が測定できる。この値はシュルンベルジェ社の圧力センサ Crystal Quartz Gaugeの特性(分解能 < 0.01 psi, ドリフト < 1 psi/year⁵⁾) に比べて劣っている。さらに、ベアFBGの温度感度は約8 pm/°Cなので、7 psiの圧力計測のためには0.03 °Cのセンサ温度をモニタする必要がある。

Fig. 1 Fiber-optic temperature monitoring in steamflood observation well. DTS system detected steam breakthrough in the top sand after 15 month.

Fig. 2 Response of a bare Fiber Bragg grating with pressure and temperature.

3.2 サイドホールファイバ

シュルンベルジェ社では、高感度で、しかも、温度・圧力のクロス感度の小さい圧力センサを目的に、サイドホールファイバや偏波面保存ファイバを用いたFBG圧力センサを研究している⁴⁾。

Fig. 3, Fig. 4にサイドホールファイバの断面と13 psi (0.9気圧), 7891 psi (537気圧)でのスペクトルを示す。サイドホールファイバ径とサイドホール径はそれぞれ125 μm , 35 μm である。13 psiではシングルピークであるが、7891

Fig. 3 A photograph of the side hole.

Fig. 4 Response to pressure.

psiではデュアルピークとなる。これは、高圧下で、サイドホールにより横方向に応力差が生じ、そのため複屈折が生ずるためである。圧力値はデュアルピークの間隔を測定することで得られる。相対値測定なので、シングルピークの絶対値測定に比べ、高精度が期待できる。さらに、温度変化により、各ピークは同じように変化するため、圧力測定への影響を少なくできる。

Fig. 5 に25 °Cから100 °Cにおけるサイドホールファイバを用いたFBGセンサの圧力応答を示す。圧力応答の温度依存性はほとんどなく、温度・圧力のクロス感度は標準のファイバを用いたFBGセンサに比べ2桁程度改善されている。この特性は油井のような温度が変化する環境下での圧力計測では特に重要である。圧力感度も改善し、約1.7倍に増えているが十分ではない。

3.3 機械的な圧力感度増幅

温度・圧力のクロス感度を小さく保ち、しかも高感度なファイバ圧力センサは、ファイバに側圧力のみを与える機械的な増幅機構をもつトランスデューサーで実現できる。この方法を用いて、スタンダードのファイバを用いた場合でもデュアルピーク特性をもつFBG圧力センサが可能になった⁶⁾。

Fig. 6は圧力トランスデューサーである。ファイバへ側圧はトランスデューサーのピストンにより与えられ、ピストンの表面積に比例する。プロトタイプは1/4"直径のピストンを用いた。圧力はピストン表面に置かれた薄いステンレス製のダイアフラムとOリングによりシールされている。皮膜を取り除いた2本のファイバは2枚の石英板の間にセットされている。一本にはFBGが書き込まれ、もう一方のファイバはダミーファイバとして上下の石英板の均衡を保つように配置されている。ファイバ自体は高圧環境下にさらされていないため、高温高圧のファイバフィードスルーは不要である。

ピークセパレーションは以下のように解析できる^{7,8)}。

ファイバへの側圧は以下の関係式でコアに応力を与える。

$$\sigma_{xx} = -\frac{2F}{\pi h D} \quad (1)$$

Fig. 5 Response of side hole FBG with pressure and temperature.

Fig. 6 Structure of transversely loaded Bragg grating pressure transducer.

$$\sigma_{yy} = -\frac{2F}{\pi h D} \quad (2)$$

ここで

D : ファイバの直径

h : 側圧長

F : 側圧

この応力により生ずるコアの歪は下記の式で表される。

$$\epsilon_{xx} = \frac{1+\nu}{E} \{ \sigma_{xx}(1-\nu) - \nu \sigma_{yy} \} \quad (3)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{1+\nu}{E} \{ \sigma_{yy}(1-\nu) - \nu \sigma_{xx} \} \quad (4)$$

ここで

E : ヤング率

ν : ポアソン比

これらの歪によって生ずる波長の変化は以下の通りである。

$$\frac{\Delta \lambda_x}{\lambda_x} = -\frac{1}{2} n_0^2 \{ P_{11} \epsilon_{xx} + P_{12} \epsilon_{yy} \} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta \lambda_y}{\lambda_y} = -\frac{1}{2} n_0^2 \{ P_{11} \epsilon_{yy} + P_{12} \epsilon_{xx} \} \quad (6)$$

ここで

$\Delta \lambda$: FBGの波長シフト

ϵ : 歪係数

P : 歪光学係数

n_0 : 屈折率

スタンダードファイバの場合、13 N/mの側圧により約1 pmのピークセパレーションが生じる。

Fig. 7は圧力とピークセパレーションの関係を示している。実線は理論値であり、点は実験値である。実験値は理論値に一致している。

ピークセパレーションの圧力感度は ~ 0.33 pm/psiであり、この値は静水圧下のスタンダードFBGの圧力感度(~ 0.03 pm/psi)に比べて10倍改善されている。例えば、0.2 pmの分解能を持つ計測器の場合、0.6 psiの圧力変化が測定できる。

Fig. 8にピークセパレーションの各温度における圧力依存性を示す。ピークセパレーションは線形の圧力特性を

Fig. 7 Pressure sensitivity. Experiment and calculation.

Fig. 8 Peak separation versus pressure at different temperatures.

各温度で示している。また、ピークセパレーションの温度依存性はきわめて少ない。残留温度依存性は各ピークの絶対値を用いて補正できる。

3.4 ピークスペクトラム分離技術

Fig. 7では2000 psi以下の圧力は計測していない。これは低い圧力の条件ではピークセパレーションが狭くなり、さらに圧力を下げていくと各ピークが重なり合い、通常の測定方法ではピークセパレーションを計測できないためである。この問題は光の偏光特性を用いて、各ピークを別々に読み出す方法で解決できる⁹⁾。各ピークは異なる偏光特性を持つので、その偏光特性のみを持つ光を入射することで、重なり合ったピークを別々に測定することができる。Fig. 9, Fig. 10に実験結果を示す。

4. まとめ

分布型温度センサを用いた油井監視システムの紹介と、ファイバブラッググレーティングの圧力センサに関して解説した。分布型温度センサはそのユニークな特徴(連続的な測定、省スペース、高温動作等)を生かして、水蒸気圧入の温度監視等に応用されている。温度・圧力のクロス感度の小さいデュアルピークを持つFBG圧力センサは、静水圧下のサイドホールファイバ、偏波面保存ファイバや、ファイバに側圧を与えるトランスデューサーを用いて実現できる。トランスデューサーを用いた場合、圧力感度は10倍改善し、サブpsiレベルの圧力変化の測定

Fig. 9 Dual peak spectrum before polarization control. Dual peak spectrum is overlapped.

Fig. 10 Dual peak spectrum after polarization control. Each spectrum is separated.

が可能になった。

光ファイバや光技術を用いた油井への応用例は、地層間隙流体光分析装置¹⁰⁾、光振動センサ¹¹⁾、光プローブ(混相流検出器)¹²⁾、油井用光ケーブル¹³⁾等も実現されている。このような光センサの成功例から考え、今後、油井でより高度な計測やパーマネント油井監視システム等へ光技術が応用されていくこととなろう。

参考文献

- 1) C. J. Campbell and J. H. Laherrere: Scientific American (March, 1998) 78.
- 2) E. Udd Editor: *Fiber Optics Smart Structures* (Wiley-Interscience Publication, New York, 1995).
- 3) C. Curtis, R. Kopper, E. Decoster, A. Guzmán-Garcia, C. Huggins, L. Knauer, M. Minner, N. Kupsch, L. Linares, H. Rough, and M. Waite: Oilfield Review Autumn (2002) 30.
- 4) R. J. Schroeder, T. Yamate, and E. Udd: *Proceedings 13th International Conf. On Optical Fiber Sensors*, SPIE vol. **3746** (April, 1999) p. 42.
- 5) T. Yamate, R. T. Ramos, R. J. Schroeder, and E. Udd: *Proceedings 15th International Conf. On Optical Fiber Sensors*, SPIE vol. **3746** (May, 2002) p. 535.
- 6) N. Matsumoto, Y. Sudo, B. K. Shinha, and M. Niwa: IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. **47** (2000) 346.
- 7) R. B. Wagreich, W. A. Atia, H. Singh, and J. S. Sirkis: Electron. Lett. **32** (1996) 1223.
- 8) C. M. Lawrence, D. V. Nelson, A. Makino, and E. Udd: *Proceedings of SPIE*, Vol. **3180** (1997) p. 42.

- 9) T. Yamate, R. T. Ramos, R. J. Schroeder, and E. Udd: *Proceedings 16th International Conf. On Optical Fiber Sensors* (ISBN 4-89114-036-4, 2003) p. 64.
- 10) T. Terabayashi, T. Yamate, G. Fujisawa, O. Mullins, S. Betancourt, C. Dong, A. Carnegie, and T. Torgersen: SPWLA Japan Chapter, *The 9th Formation Evaluation Symposium of Japan* (September) p. 1.
- 11) K. Nishida and M. Kondo: *Sensors and Actuators* **A21-A230** (1990) p. 445.
- 12) R. T. Ramos and E. J. Fordham: *J. Lightwave Technol.* **17** (1999) 1392.
- 13) *Sonde Off Magazine* (Schlumberger publication) vol. **37** July/August (1985) p. 14.