光ファイバの真価が問われる油井孔のセンシング

ゲイル・オーヴァートン

原油価格の高騰をきっかけに、エネルギー会社は、資源抽出を最大化するために、油井孔（ダウンホール）の石油と地熱環境における温度と圧力のモニタリングに光ファイバセンサを使い始めた。

エネルギー供給会社は、油井収率を改善し、有効エネルギー資源を拡大するために、新方式の探求をし続けている[(1)、(2)]。光ファイバセンサは、資源抽出を最大にするために、油井孔の石油と地熱貯留層、井戸、パイプラインのモニタリング用として確立された方式であり、温度と圧力の情報を、ほどなく行われる化学分析の結果とともに、提供することができる。

残念ながら、油井孔の環境は光学系に対して優しくない。振動や腐食性の化学物質に加えて、極端に高い温度と圧力が、光学系や関連するヘッドエンド測定機器をそれらの許容限界へと押しやることになる。しかし、いくつかの光技術がダウンホールセンシングの難題に立ち向かっている。

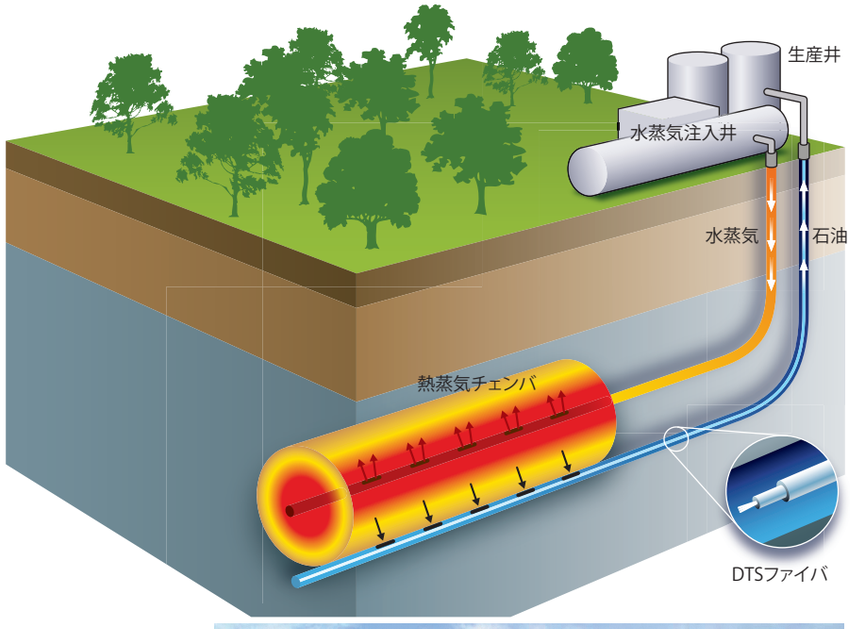


図1　入手可能なエネルギー資源の深さは、温度や圧力同様に拡大を続けているため、オイルサンド資源を回収するためのSAGDなどの代替技術が必要になる。ここでは、光ファイバが、燃料回収過程を最適化するために温度と圧力を監視する。（資料提供：LIOSテクノロジー社）

図2　カナダのSAGD井に配置されているダウンホールセンサの場合、光ファイバケーブルはより大きなコイル状チューブ内に他のセンサとともに統合されている。全センサ「ストリング」はサービス掘削装置を使って油井内に挿入される。（資料提供：ペトロスペック・エンジニアリング社）

過酷な条件

米クォレックス社（Qorex）の創立者であり、テクニカルマーケティングとビジネス開発部門の代表を勤めるポール・サンダーズ氏（Paul Sanders）は、「1980年代にいくつかの小規模な試験的導入が開始したとはいえ、既存の数万もの地上、オフショア、海中の油井やガス井のなかで光センサを装備している割合はわずかだ」と語っている[3]。普及率が低いのは、浅く回収が容易な石油では永続的な油井孔のモニタリングを行うことによる追加費用負担を正当化できないという経済的な理由によるものだ、とサンダーズ氏は指摘する。しかし、この「回収容易」な石油もやがては枯渇するため、エネルギー供給会社は、一般に熱、蒸気、薬品などを資源に直接注入して、使用可能な石油やガスを地上で回収する方式のオイルシェールやオイルサンドの埋蔵量に注目している（図1、2）。

サンダーズ氏は、「光センサは高温の熱回収用途において重要である。資源抽出を最適化し、安全性と環境面の理由から井戸の完全性を確実に残すために、地中の実態を知ることが必要になるためだ。その場ビチューメン回収のための水蒸気支援重力排油法（SAGD）のような、従来センサに代わって光ファイバ技術がどうしても必要となるプロセスが、250～300℃の温度でも動作する光センサを採用するきっかけになった」と語っている。

米インテリジェント・ファイバ・オプティック・システムズ社（Intelligent Fiber Optic Systems）のフェレイドン・フェアリジャン氏（Fereydoun Faridian）は、「キロバール圧力と超高温度以外に、ガラス製のセンシングファイバコア内への水素拡散現象、いわゆる水素ダークニングがダウンホール光センシング

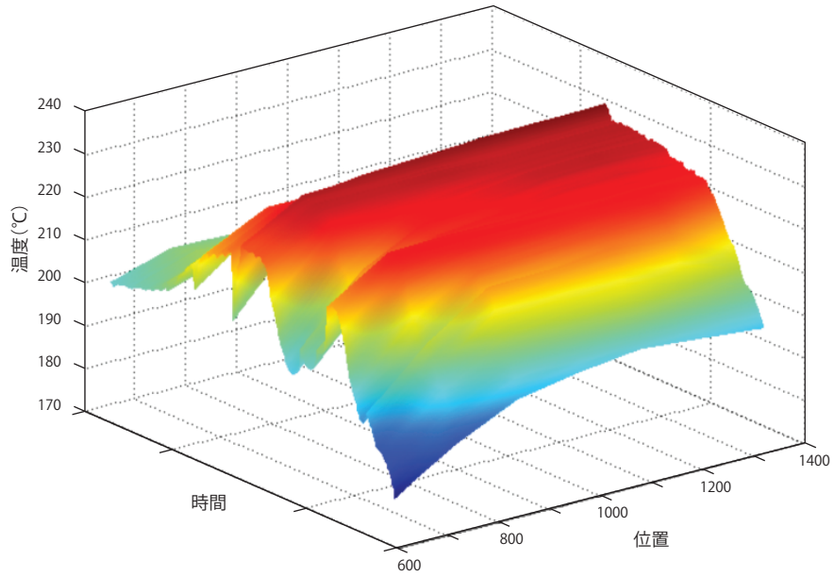


図3　光分散型温度検出のユニークな能力を水平熱回収井での時間／温度／位置データプロットによって図示した。他のいかなるセンサ技術もこのような実時間での完全掘削孔モニタリングは不可能である。（資料提供：クォレックス社）

システムの実際的な利用を長年にわたって拒んできた。幸いなことに、事実上全く曇らない改良密閉コーティングとパッケージング技術を使った最新の純シリカファイバによって最高700℃の温度でのファイバ動作が可能になった」と語っている。

センシング方式

フェアリジャン氏は、「多くのダウンホール光センシングシステムはラマン分布型温度センシング（DTS）を使用している。光の光子と物質の分子との非弾性ラマン相互作用において、分子は光子からのエネルギー獲得（ストークス散乱）あるいは光子へのエネルギー損失（反ストークス）を起こすであろう。後者は、温度に強く依存するプロセスであり、ファイバ長に沿った温度測定に利用されている。これは数kmまたはそれ以上の深さまで1mごとに1℃以下の分解能で測定する。温度勾配を知ることができれば、水蒸気または熱水支援生産井の位置が分かる（図3）。また、井戸の深度方向に沿った温度勾配の予期せぬ変動は、例えば、ケーシングにおけるピンポイント欠陥の可能性がある」と語っている。彼は、「科学は素晴らしいが、価格性能比の実現はエンジニアリングがすべてである。したがって、すべてのDTSシステムが優劣なく作られることはない」と指摘する。

米GEグローバル・リサーチ社（GE Global Research）のシニアフォトニックシステムエンジニアであり物理学者でもあるホア・シァ氏（Hua Xia）は「ラマンDTS、ブリルアン分散温度／歪みセンシング（DTSS）、ファイバブラッググレーティング（FBG）に基づく光センサなどはいずれも温度、歪み、流量、圧力の分散型センシングを実行する。ラマンシステムは歪に対するその不感性により最も一般的である。ブリルアンDTSSは歪みと温度をモニタリングするために後方散乱信号の周波数シフトと強度を測定し、一方、FBGはブラッグ共鳴条件を満たす反射光の波長を測定する。この反射ピークの波長がFBGでの温度

と歪みの両方の変化に対応する[4]。ラマンとブリルアンは0.1～1mの空間分解能での連続センシングを提供し、FBGは0.01m程度の小さい空間分解能での離散的または準分散型センシングを提供する」と語っている。

これらのセンシング技術は機能性だけでなく価格や複雑さも様々である。シァ氏は、「ラマンシステムは5～10万ドル、ブリルアンDTSSは10～15万ドル、FBGシステムは1万5000～2万5000ドルである。ファイバ自身がセンサでもあるため、ファイバケーブルがラマンとブリルアンシステムで必要なすべてである。しかし、FBGセンサはファイバ内部に刻みこまれ、それからFBGごとに圧力、温度、流量、地震、または歪みセンサとしてパッケージングされなければならない。多くのパッケージングされたFBGセンサを含むセンシングケーブルの作製は相対的に複雑であり、多くの加工努力と費用が必要になるだろう」と語っている。

シァ氏は、地熱井内部に分布する温度と圧力の測定に適した光センサの開発を目標とする米国エネルギー省（DOE）から2年契約で260万ドルの資金援助を受けて2010年1月に開始されたプロジェクトのチームメンバーである[5]。このシステムは<1%の圧力測定精度と<1%の長期ドリフトで10kmまでの深度の高温（最高374℃）、高圧（最高220バール）の環境における測定を実行しなければならない。

商用オプション

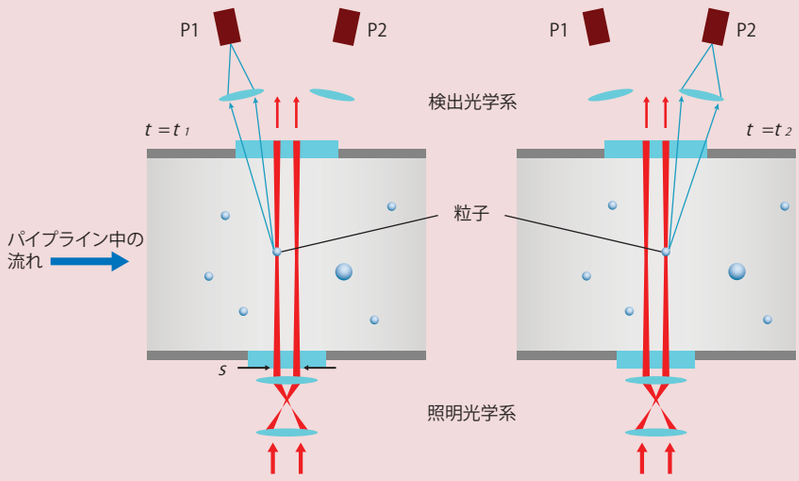
サンダーズ氏は、「FBG技術は油井孔環境においてDTSに次いで多く利用されている光センサ技術である。FBGは二つの基本的な実装で使用されている。FBGは有名なことだが、大抵の歪みに対して使われている干渉計測センサや音響トランスデューサを構成することによって点歪み／温度検知素子として使用されている。また、最近ダウンホール用途向けに精密化されたFBGは主要な生産間隔の監視や海中海底施設のモニタリング用の分散型多点センサとして使用されている」と言う。幸いなことに、例えば、米マイクロンオプティクス社（Micron Optics）製の走査レーザを使ったFBGインタロゲーション機器は米アルフィオン社（Alphion）などのメーカー製の半導体光増幅器（SOA）からも恩恵が受けられる。SOAは、ヘッドエンドから50マイル程度離れた数百台の分散型FBGセンサを使って高サンプリング速度で同時測定するためのレーザ入力信号を増幅する（ただし、多くのダウンホールセンサシステムは5マイル以下の深度に分散）。

カナダのオズオプティクス社（OZ Optics）製のブリルアン光時間領域解析（BOTDA）システムは、ポイント・ツー・ポイントFBGセンサと異なり、双方向光路内の2本の対向伝搬するビームによる誘導ブリルアン散乱（SBS）を利用して歪みと温度を同時に測定するこ

光学式ガスフレア監視

油井孔モニタリング用の一式の干渉計測センサ以外に、フォトン・コントロール社は油井孔プロセスに関係する産業ガスのガスフレアと流量監視用の「レーザ2焦点」（L2F）システムも提供している（図）。レーザドップラー流速測定（LDV）は高コストで、流れをシードする粒子が必要であり、信号対雑音（SN）比が低いため、このような応用には適用できないという認識に立ち、フォトン・コントロール社はL2F光学式過渡時間速度測定法を選択し、現在、100システム以上をフィールドに配備して0.1～150m/sの流速で直径4～36インチのパイプ内を流れるガス流を監視している。

L2F技術は、粒子がシステムを通って流れるときに2台の検出器上で散乱された光の時間間隔を分析することによって、ガスフレアまたはパイプライン中の粒子の流れを監視する。これらの光学系は、性能がガス組成の影響を受ける熱散逸質量流速計や、高いガス流速、価格、設置費のために実現できない超音波気体流量計を代替する。



とが可能である。ブリルアンは、分散FBGシステムでの離散的な±1μstrainと±0.4℃の精度に比して、0.1mの空間分解能に加えて、±2μstrain精度と±0.1℃温度精度を同時に達成する。

独LIOSテクノロジーズ社（LIOS Technologies）の石油／ガス上流セクタのキー・アカウント・マネージャを務めるダーン・バン・ラール氏（Daan Van Laar）は、「われわれのラマンOFDR［光周波数領域反射率計］は、2200プラスシステムのインストール基盤や市販の単一周波数領域に基づくDTSシステムと並んで、現在入手可能な最も費用効率の高いシステムである」と語っている。ラマンOFDRは、ラマンOTDR技術におけるようなパルスレーザの代わりに、各種周波数で変調された連続波（CW）レーザを使用する。周波数分布を一定周波数範囲の反ストークスとストークスラマン信号の振幅と位相を測定することによって生成し、この周波数分布を逆フーリエ変換することによって時間を求め、それにより距離依存のラマン信号を求める。次いで、これらの信号を使って光ファイバに沿って空間分解された温度プロファイルを計算する。バン・ラール氏は「ラマンOFDRの主要な利点は、長くなったレーザ寿命にとって適度なレーザピークパワーで高い信号レベルが得られるCWレーザ動作と、ヘテロダインコンセプトに基づく実用的な検出スキームにある」と付け加えた。

カナダのフォトン・コントロール社（Photon Control）のCTO、イワン・メルニク氏（Ivan Melnyk）は、「光ファイバから利益を得ている主要なアプリケーションは油井孔のポンプの監視だ。ポンプは原油を送り出すために垂直井戸の端部に配置されている。極端な圧力と温度に加えて、砂がパイプに詰まってポンプの早期劣化をもたらす可能性がある。ポンプの置換は非常に高価な手続きである。ポンプそのものが高価なのではなく、ポンプの取外しとプロセスの中断が問題なのだ」と語っている。ポンプ側の温度と圧力のモニタリングに、フォトン・コントロール社は、二つの平行面間のわずかな変位（ファブリペローギャップ）を最高5kmまでの距離と最高300℃までの温度で光学的に測定する白色光干渉法に基づく特許取得技術を使っている。この測定はフォトン・コントロール社製の分光器を利用してダウンホール範囲750～800nmで専用スペクトル復調技術を使って実施される。

米ウェザーフォード社（Weatherford）のR&Dマネージャ、ドミノ・タヴァナー氏（Domino Taverner）は、「油井孔用途における光センシングの最も重要な利点の一つは、油井の寿命が続く限り高温で動作をし続ける能力であり、競合する電子ゲージ機能の域を超える条件での光センシングシステムの永久的配置が可能になることだ」と語っている。このメーカーはラマンDTS、FBGに基づく圧力／温度点センサ、干渉測定に基づくマルチ位相流量計、地震計測システムなどを販売している。タヴァナー氏は、「これらの検出システムは単一の0.25インチケーブル上に各種配置で多重化することができ、最も過酷な条件での複数ゾーンにおけるマルチパラメータセンサの永久的配置を可能にする。これらの各種光センシング技術の組合せは最も有益な情報と価値を顧客に提供する」と付け加えた。

石油を越えて

フェアリジャン氏は、「IFOSはわれわれの石油とガスの顧客用に三つのシステムの技術開発に集中してきた。それらはラマンDTSシステム、実時間広帯域FBGに基づく圧力センサ、方向性掘削と掘削中測定用の光ファイバジャイロである。しかし、われわれのFyber-Space側面研磨技術プラットフォームは多数の物理的、化学的、生物学的をも含む光センサ、ならびにタップカプラや偏光子などの光学部品の製造にも役立つ。NASAやDOD（米国防総省）との協力の下でいくつかのユニークな航空宇宙研究を実施しているが、DOEと協同の風力タービン翼の健全性管理と最適化の研究も等しくエキサイティングである。しかし、最も挑戦的な未開拓分野は、光センサを小型化して、画像支援外科手術において動脈や静脈に挿入する生検針やカテーテル内に納める技術だ」と語っている。

フェアリジャン氏は、「油井内部の5kmなのか、不都合な腫瘍内部の5cmなのかにかかわらず、課題はいつも同じだ。科学を機能させ、工学によって主要な産業プレイヤーに持続可能なアプリケーションの強みを提供できる機能と利点を作り出すことだ」と断言している。

参考文献
（1）"MarketBeat 4Q10," Cushman & Wakefield, http://bit.ly/gSITLQ.
（2）"Oil to Reach $100 on OPEC Capacity Drop, Goldman Says," BusinessWeek online, http://buswk.co/i1bT M1（Dec. 22, 2010）.
（3）P. Sanders, Opt. & Photon. News（OPN）, 22, 1, 36-42（January 2011）.
（4）H. Xia, US Patent 7,574,075（Aug. 11, 2009）.
（5）W. Challener et al., "Subsystem design and validation for optical sensors for monitoring enhanced geothermal systems," Proc. 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, SGP -TR -191, http://bit.ly/hZaHft（Jan. 31-Feb. 2, 2011）.

LFWJ