

光ファイバーセンシング テクノロジーによる パイプライン監視の強化

パイプラインは、天然資源を採掘地から需要地まで運ぶために使用されており、世界のエネルギーインフラの重要な要素となっています。パイプラインは、気体または液体の形で天然資源を非常に長い距離運ぶことができます。天然資源の価値と漏出の影響を考えると、パイプラインの監視はきわめて重要です。



はじめに

パイプラインは、石油やガスなどの天然資源を長距離輸送するための主要な仕組みです。パイプラインが建設されれば、輸送にタンカーを使用する必要がなくなり、これに伴う渋滞や環境汚染を回避できます。

一般に、パイプラインが輸送するものは非常に高価であり、多くの場合、揮発性であるため、管理されずに流出すると環境に深刻な影響を与える可能性があります。パイプラインは老朽化、偶発的な損傷、改ざんの影響を受けやすく、厳しい環境条件の地域を通るものも多いため、流出リスクは非常に高くなっています。したがって、パイプラインの完全性を確保するための監視はきわめて重要です。

シングルモードファイバー、カプラー、スプリッターなど、光ファイバー通信用に開発されたコンポーネントやインフラは、電氣的刺激に対する固有の耐性、長距離伝送範囲、耐腐食性などの利点も加わり、他のインフラの光ファイバーセンシングにも同様に適しています。

1990年代初頭、分布型光ファイバーセンシングは、温度、歪み、圧力、音響、その他の測定に広く使用されるようになりました。このテクノロジーは石油・ガス産業で採用され、その多大な利点が活用されています。

従来のパイプライン監視方法

パイプライン監視の最も一般的な方法の一つは、(頻繁ではないにせよ) 定期的な間隔で技術者を現場に派遣し、パイプラインを物理的に検査することです。多くのパイプラインは遠隔地にあるため、派遣自体が困難である場合があり、現場が人を寄せ付けない状況であることも少なくありません。

パイプラインは埋設されていることが多いため、画像検査(通常のカメラや赤外線カメラを搭載したドローンやヘリコプターの使用を含む)の価値は通常限られており、他の技法を使用する必要があります。地中レーダー(GPR)はそうした技法の一つです。ここでは、レーダーパルスを使って地下を画像表示し、パイプラインの異常を検出します。ただし、この技法は特別な訓練を受けた要員を必要とし、地盤の状態や深さによって制限されます。

アコースティックエミッション試験では、漏出や構造変化によって発生する音を継続的にモニタリングすることができます。しかし、これを行うには数千キロにも及ぶ可能性のあるパイプラインの長さに沿ってセンサーを設置する必要があります。センサーが適切な場所になれば漏れを検知できず、それでも小さな漏れは大きくなるまで見逃されることが多いため、技法としてはやや限界があります。さらに、音響システムの分解能はセンサーの位置／密度によって決まり、このことはシステムのコストに影響する可能性があります。

別のアプローチとしては、圧力と流量を監視して異常を検出する方法があります。この種の監視は継続的に行われますが、すでに環境に影響を及ぼしている可能性のある重大な異常(主に漏出)の検出に限定されます。このアプローチの分解能は、展開された流量センサーの数にも支配されます。つまり、数が多ければ多いほど、漏れを見つけるのは容易になります。しかし、同時にシステムのコストも高くなります。

どの方法にも長所と短所がありますが、どれも本当に100%満足できるものではありません。多くの場合、定期的なテストが行われますが、いずれも小さな問題を検出することはできません。そのため、それぞれに環境リスクと風評リスクが伴います。たいていの場合、特に合理的なレベルの分解能でシステムを展開するには、高いコストがかかります。

光ファイバーセンシングテクノロジー

光ファイバーケーブルは、テストシステムとセンサーの間に簡単な通信経路を提供することができます。これは「外部センシング」と呼ばれます。ただし、ファイバー自体がセンシングシステムとして機能する場合は、「内部ファイバーセンシング」として知られています。内部センシングでは、ファイバーと外部センサーの間に個別のインターフェイスを必要としないため、信頼性を高めながら複雑さとコストを削減できます。

光ファイバーセンシングでは、光ファイバー上を移動する光の物理的特性を利用して温度、歪み、振動（音響）、その他のパラメータの変化が検出されます。この技法では、ファイバーそのものをセンサーとして利用するため、ファイバーの長さ方向に何千もの連続的なセンシングポイントを効果的に形成できます。

これは分布型光ファイバーセンシング (DFOS) と呼ばれ、ラマン、ブリルアン、またはコヒーレントレイリー後方散乱効果を使用して、ファイバーに沿って温度、歪み、または振動（音響波）による外部刺激を測定するために標準または特定のファイバーを使用することを目的としています。

	・老朽化監視 ・水漏れや流路の詰まり ・貯水池監視 ・熱油回収
	・漏れ検出 ・地盤変動／地震監視 ・パイプライン監視 ・脅威の検出とセキュリティ
	・ホットスポットの検出と位置特定 ・電流容量 (リアルタイムの熱定格 [RTTR]) ・スマートグリッド ・送電線監視
	・ひび割れ検出 ・インフラの管理と設計 ・ダム、堤防、橋、建物の監視 ・地震活動
	・埋設光ファイバーケーブルの監視 ・アンテナケーブル監視 ・オーバーストレスファイバーの識別 ・ファイバーエージング

図 1: DFOS は幅広い各種産業に応用できる可能性を秘めています。

光子がファイバー材料によってランダムに散乱される現象は、レイリー散乱と呼ばれます。この原理は、検出器に後方散乱された光の強度、波長、およびタイミングによって、光ファイバー内の減衰と反射イベントの大きさと距離を決定できるため、光時間領域反射率計 (OTDR) などのさまざまなタイプのファイバーテスト技術で有用であることが証明されています。

- ラマン散乱は、ストークス帯域内の光源に後方散乱される光子に温度による変化をもたらします。ストークスおよび反ストークス帯域の後方散乱光の強度差を測定することで、ファイバーに沿った任意の位置での温度を正確に決定できます。
- ブリルアン散乱も、後方散乱光の波長が外部の温度や音響刺激によって予測可能な形で影響を受ける同様の現象です。このデータに同位置での温度の知識を加えて、ファイバーが受けた歪みを正確に決定し、ファイバーのどの領域（ゾーン）が影響を受けたかを判定できます。
- レイリーコヒーレント散乱は、振動や音響波の検出に利用できます。光の位相シフトは、光ファイバーケーブルが経験する振動や音響波の影響を受けます。これらの位相シフトを分析することで、ファイバーの全長における振動の位置と強度を正確に知ることができます。

ラマン散乱は分布型温度センシング (DTS) に、ブリルアン散乱は分布型温度と歪みセンシング (DTSS) に、レイリー散乱は分布型音響センシング (DAS) に使用されます。これらの測定方法を利用して、温度、歪み、振動を数十キロにわたって正確にモニターすることができます。

DFOS の実用的用途

DTS および DTSS 機能を備えた VIAVI OneAdvisor プラットフォームのようなポータブル型計測器を使用することで、作業者はファイバーのフィールド測定を行うことができます。また、VIAVI ONMSi と DTS、DTSS、または DAS 機能を備えたラックマウント型ファイバーテストヘッドを使用すれば、ファイバーを長期にわたって監視し、変化やイベントが検出された場合にアラームを発生させることができます。

VIAVI DTSS インテロゲータはブリルアン OTDR (BOTDR) を使用し、光ファイバーセンサーとして使用されるファイバーに短パルスの光を照射します。前方への光の伝播によりブリルアン後方散乱光が 2 つの個別波長でファイバー上のすべての点に生成されます。

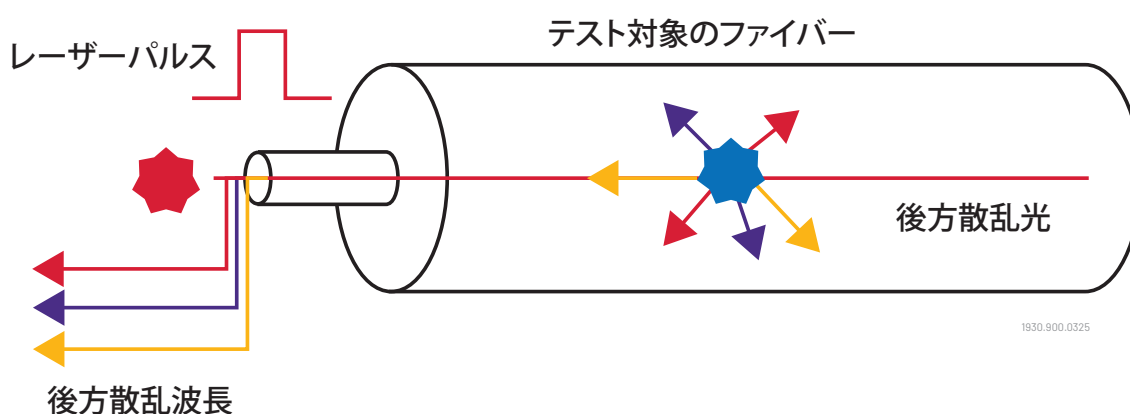


図2: 後方散乱光を検出・分析して問題点を特定

ブリルアン後方散乱光の波長は、前方入射光の波長とは異なり、「ストークス」または「反ストークス」と名付けられています。ストークスと反ストークスのブリルアンレベルと周波数の違いは、ファイバー上の温度と歪みのイメージです。

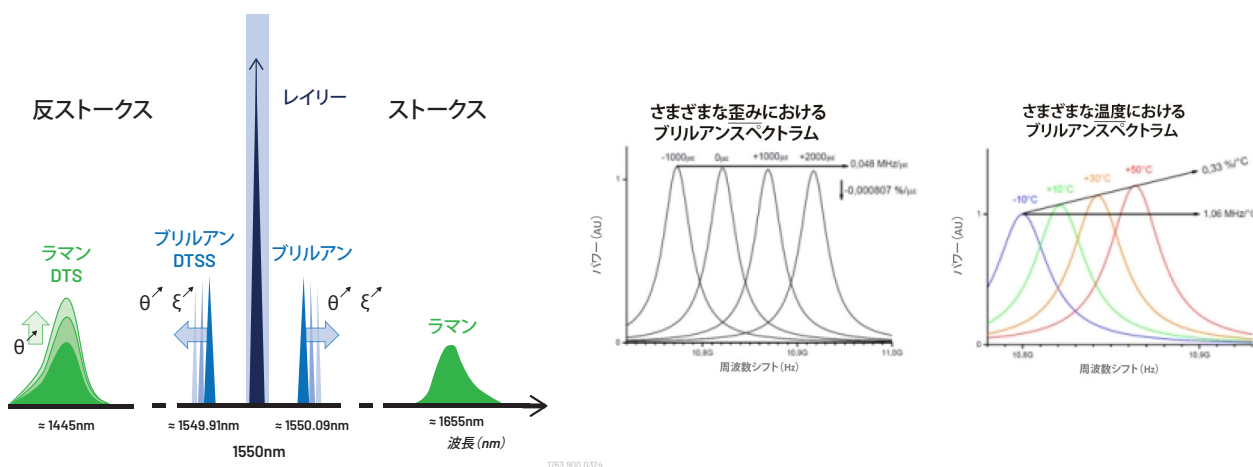


図3: ブリルアン後方散乱は、特定の場所の温度と歪みを測定可能

実際のアプリケーションと利点

パイプラインで考えられる最悪の事態は、何らかの形でパイプに亀裂、破裂、破碎が生じ、漏出が発生することです。商業的な観点からは、資源が失われるばかりでなく、供給の中断による潜在的な収益の損失があります。これに加え、流出が環境に与える影響も避けられず、清掃に多額の費用がかかるだけでなく、パイプライン事業者の評判を落としかねません。

問題を検出する従来の方法の多くは、漏れが発生し、検出するのに十分な規模であることに依存していますが、DFOS ははるかに高感度で、漏れが発生する可能性のある兆候を探し出します。

特に地下のパイプでは、従来の方法では発見できなかったような小さな漏れが、問題の最初の兆候となる場合もあります。ただし、ほとんどの漏れは、パイプの内容物が漏れ始めると何らかの音を発します。DAS はこれを検知して、正確に特定することができるため、ごく初期の段階で警告を発し、問題が大惨事になる前に対処することができます。

DFOS はまた、洪水、地滑り、地震（環境破壊）によって引き起こされる可能性のある、パイプ周囲の土壌の変化によって引き起こされる応力や歪みも測定することができます。応力や歪みの規模によっては、パイプが変形し、最終的には破裂する可能性もありますが、DTSS は問題を即座に正確に特定し、修理を行うことができます。

パイプラインの損傷は、偶発的なものであれ、悪意あるものであれ、人為的な行為が直接の原因となることがあります。機械的損傷の最もよくある原因の一つは、建設作業、特に採掘や掘削で、作業員がパイプラインに気づかなかつたり、正確な位置を計算していなかったりすることです。

多くの国にとってパイプラインが戦略的に重要であることを考えれば、悪意ある活動ももう一つの現実的な可能性です。場合によっては、パイプラインが損傷し、使用できなくなることもあります。あるいは、内容物を盗んだり、横流ししようとしたのかもしれません。

DAS システムは、このような建設関連の掘削作業や、地表を移動する車両や歩行者さえも検知することができます。パイプラインに近接しているため、その脅威を評価し、対応することもできます。都市部を通過するパイプラインでは、近隣でのごく普通の活動とされていても、遠隔地では調査に値する懸念事項を示していることがあります。

すべての問題が1回で急激に起こるわけではありません。パイプラインの劣化は、比較的ゆっくりとした経年劣化の結果である場合もあります。ここでも DFOS は早い段階で問題を特定し、その場所を正確に示すことができます。これにより、都合の良い時間に、可能な限り低コストで予防保守を実施することができます。

漏出を防ぐためのデータの解釈

もちろん、後方散乱光を検出できることと、実世界のシナリオでデータを解釈することは全く別のことです。

温度と歪みのセンシングが絶対的な測定値を提供することを重視するのに対し、音響センシングは少し異なります。後方散乱の強度と位相の変化からイベントが発生していることがわかり、後方散乱光子のタイミングから距離情報が得られますが、実際の原因が何であるか（歩行者、自動車、機械による掘削と手作業での掘削など）を明らかにできるのは音響シグネチャまたはパターンです。音響シグネチャのデータセットからなるライブラリ（長年にわたる実環境への展開と経験の蓄積）、発見的アルゴリズム、および業界トップの量のエッジ処理を活用することで、DAS 用 VIAVI ファイバートテストヘッド (FTH-DAS) は、インテロゲータとしても知られ、より高い確度と信頼性で音響イベントの発生源／原因を特定することができます。FTH-DAS は、危険の種類を正確に特定できるため、後方散乱データを、パイプライン事業者が利用することができる意味のある実用的なアラートに変換します。

地理情報システム (GIS) と組み合わせることで、提供されたイベントデータと高解像度の GPS 座標を地図上で重ね合わせることで、問題が発生した場所を正確に示すことができます。業界トップのわずか 0.67m の空間分解能を持つ FTH-DAS は、派遣すべき場所を正確に示すことができるため、漏出箇所を探す無駄な時間をなくすことができます。

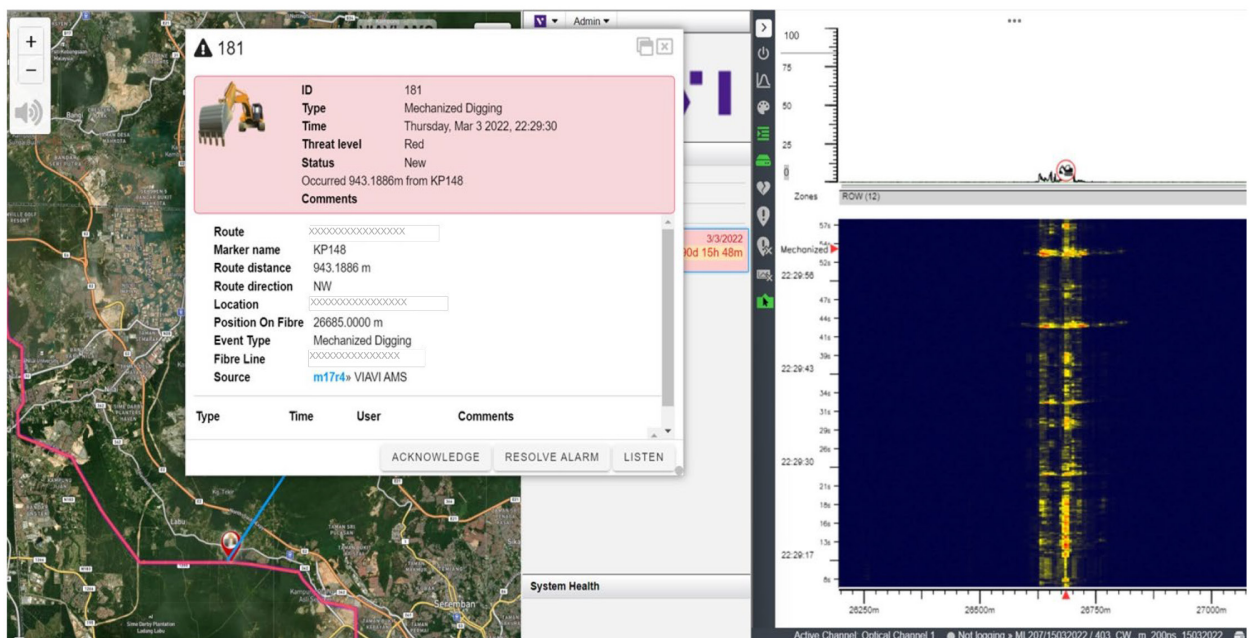


図5:使いやすい地図上に正確な位置とともに問題点の詳細を示す - アラート

DAS アラーム管理ソフトウェア (DAS-AMS) では、どのようなイベントでも、その重大度 (赤、黄、緑) を分類し、設定可能なアラームとしきい値を使って、アラートと通知の優先順位を決定することができます。

DAS は高解像度データを提供し、破壊行為、資産の窃盗、意図的でない脅威など、あらゆる不審な行動を検知して発生場所を特定します。パイプライン周辺での危険な活動 (掘削、車両の移動など) は、すべてこのシステムによって特定されます。

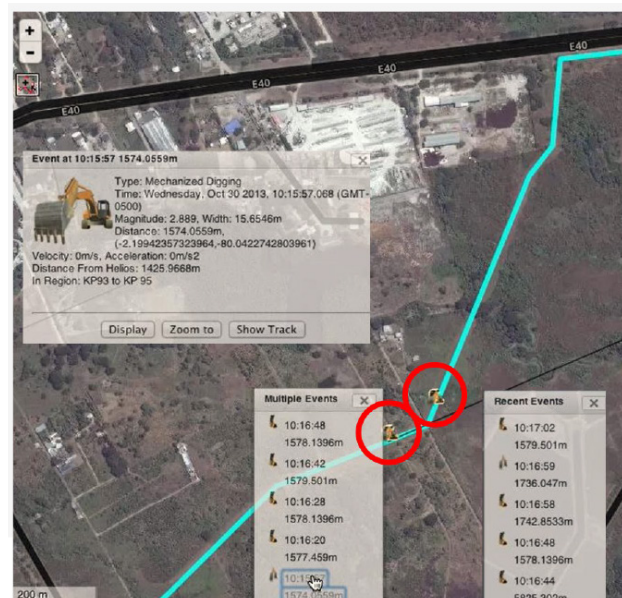


図 6: 150m 離れた場所で 2 つの掘削イベントを検出

上記の例では、2 つの別々の掘削イベントが互いに 150m 以内で発生しました。この場合、FTH-DAS は両方を検出し、2 つの異なるアラートを提供することができたため、感度の低いソリューションでは単一のイベントしか記録できず、もう 1 つのイベントを見逃してしまうような状況にも対処することができました。

漏出に関しては、FTH-DAS は小さな漏出をより迅速に検出する感度を備えています。これを業界トップの空間分解能と組み合わせることで、問題を内部システムの最大 10 倍の速さで、サブメーターの確度で正確に特定することができます。

システムのコミッショニング中の例では、東南アジアのパイプライン事業者が、34km に及ぶ 9 箇所のランダムなテストロケーションで、直径 1~5mm のピンホール 4 個など 45 個の個別漏出 (OP 20bar、OF @20リットル/分) を発生させました。この場合、分布型音響センシングは 100% の成功率で検知・特定し、適切なアラームを提供しました。

まとめ

各パイプラインは老朽化と損傷のどちらにも脆弱であるため、いずれか一方が重大な結果をもたらし、その範囲は大規模なもの（収益の損失）から壊滅的なもの（環境災害）まで多岐にわたる可能性があります。

DFOS、特に DAS は、従来のアプローチに取って代わりつつあり、多くの場合、技術者がパイプの長さに沿って定期検査を実施する必要性を不要にして、必須の監視要件になりつつあります。

より高い分解能でより遠くを監視し、即座に正確なアラートを発することができるため、迅速な対応が可能となり、時間と費用を節約し、評判を守るのに役立ちます。

この非常に高性能なテクノロジーは絶えず進化しており、データの収集と分析が進むにつれて、その確度は日々向上しています。

VIAVI の包括的な DFOS 製品群についての詳細は、viavisolutions.jp/fiber-sensing をご覧になるか、以下の QR コードをスキャンしてください。



viavisolutions.jp

〒163-1107
東京都新宿区西新宿6-22-1
新宿スクエアタワー7F

電話: 03-5339-6886
FAX: 03-5339-6889
Email: support.japan@viavisolutions.com

© 2025 VIAVI Solutions Inc.

この文書に記載されている製品仕様および内容は予告なく変更されることがあります

pipelinemonitor-wp-fop-nse-ja
30194372 900 0325