

光ファイバー温度分布計測システムによる設備監視

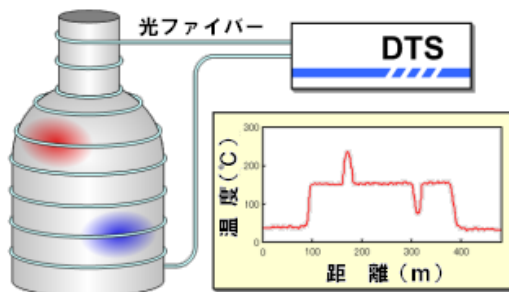
有限会社ワイケー技研 久保田俊輔

1. はじめに

光ファイバー温度分布計測システムDTS(Distributed Temperature Sensing)は光ファイバー自身が温度センサーとなり、光ファイバー全長に沿った長距離の連続的な温度分布を測定する一種の接触式温度計である。温度センサーは安価で高い耐久性を有する石英ファイバーであり、一本の光ファイバーがセンサーと信号線を兼ね、簡単な施工で膨大な温度情報が得られる。また測定領域に電気的動作部がないため本質安全性を有しており、可燃性ガス雰囲気など多くの分野に適応する。

DTSは1982年に英国サザンプトン大学における光ファイバーによる温度分布計測の実証を経て、1986年に英国YORK Sensors社(現Sensa社)により商品化され、まもなく日本国内にも紹介された。その後日本企業との共同開発を経て1992年に工業用監視装置に使用可能な実用的製品が発売され、今日に至っている。このほかに国内では主として一部の光ファイバーメーカーにより開発が進められ、1990年代前半には各種製品が発表されている。

本論ではDTSの概要について説明するとともに、各種設備の監視例を紹介する。



左: 光ファイバー温度分布計測システムDTSの概念

下: DTSによる温度分布測定の様式図

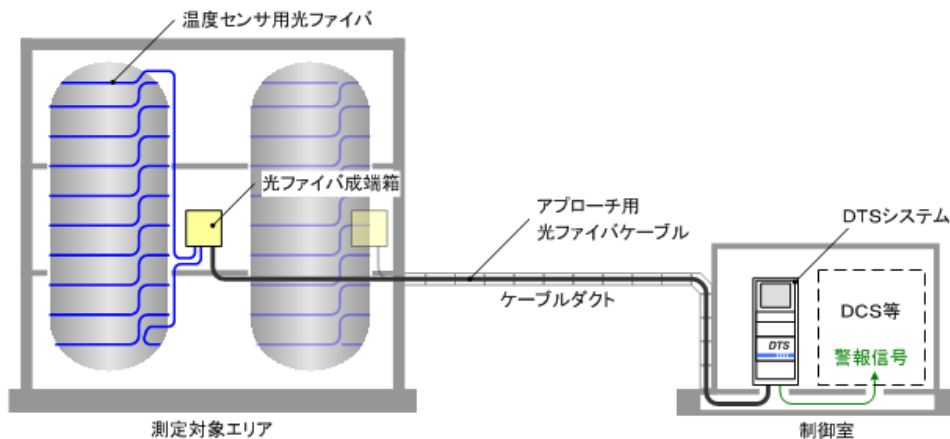


図 1 光ファイバー温度分布計測システムの概念

2. 温度分布測定の実理

DTSを構成する主な要素は温度センサーとなる光ファイバー、レーザー光源・光検出器からなる計測機本体である。光ファイバーの一端からレーザーパルスを入射すると光路内のパルスの進行に沿って以下のような各種散乱光が発生する。

- レーリー散乱(Rayleigh Scattering)
- ブリルアン散乱(Brillouin Scattering)
- ラマン散乱(Raman Scattering)

これらのうち温度感受性の高いラマン散乱光が光ファイバー温度分布測定に利用されている。

DTSの基本構造と温度測定原理を以下に記す。

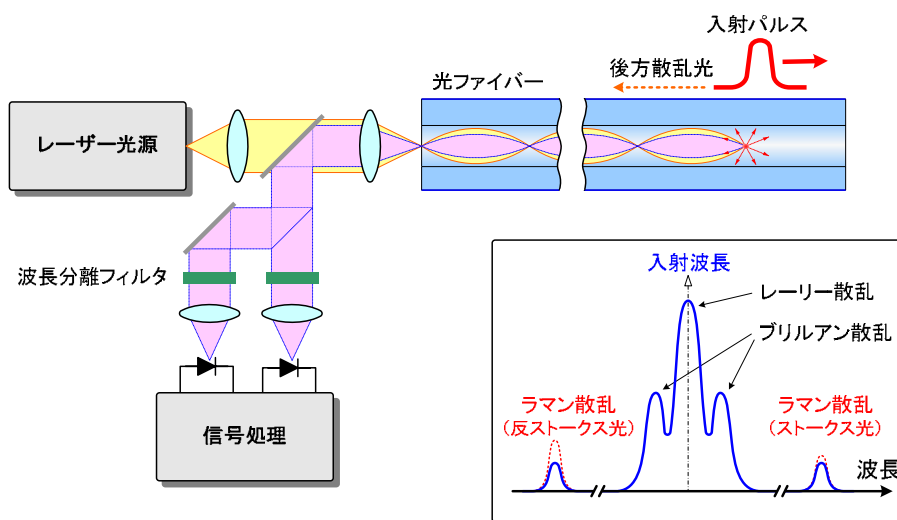
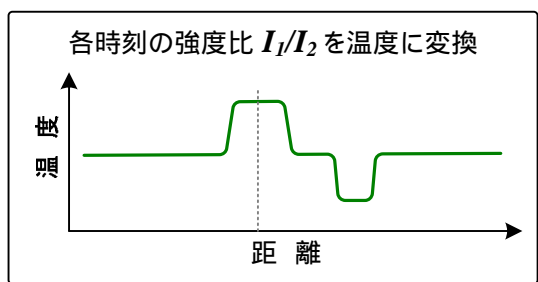
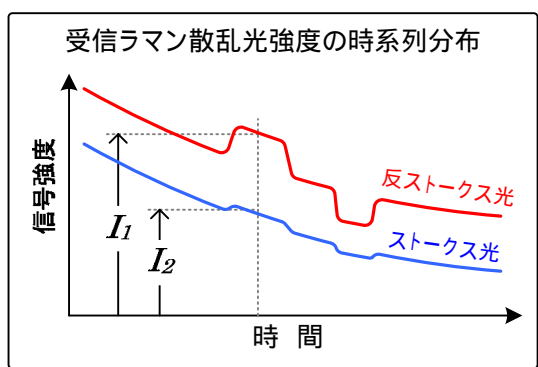


図 2 DTSの基本構造と原理



光ファイバー内で発生した散乱光の一部は後方散乱光として手前に戻り、当該位置までの距離に対応して時系列的に光源側で受信される。

受信光は波長分離フィルタにより反ストークス・ストークス光の各ラマン散乱光が分離されて時系列的に記録される。

両ラマン散乱光の温度感受性が異なるため、それらの時系列強度比から光ファイバー長に沿った温度分布が求められる。

光ファイバー全長の温度分布は一度の測定でも得られるが、非常に微弱な信号を処理するため、実際の機器では繰返し測定して平均化処理することで実用的な精度を得ている。

ちなみに最も強度の高いレーリ散乱光は光ファイバーの断線や減衰をチェックする光ファイバーテスター (OTDR) で利用されている。

次いで強度の大きいブリルアン散乱光は温度と光ファイバーの歪みの両者に強く依存することから、歪みセンサーとして商品化されている。しかし、ブリルアン散乱は温度に対しても感受性も高いことから、実用的な測定のためには温度と歪みを明確に分離できる光ファイバーセンサーの構造的な工夫が必須となっている。

3. 光ファイバー温度分布計測システム

3.1 DTSの製品例

代表的なDTS装置の外観を図3に示す。各社より多様な製品が発表されているが、概ね測定可能な距離、使用する光ファイバーの種類により機種が分類されている(次頁の表-1参照)。

また機器の特性上、一般的には設置環境は塵埃が少なく、周囲温度 0~40 であることが望ましい。特に精度が必要な用途では 10~30 で使用することが推奨される。

上: 代表的な機種の外観

下: 外部インターフェース

右: 監視盤への実装例



図 3 代表的な測定装置の外観

3.2 仕様の例

次頁の表 - 1 に代表的な製品仕様の例を示す。表は製品群の体系概要の理解の一助となるよう代表的な特性値を示したものであり、実際の性能や保証値は各派生機種および測定条件等によって異なるため、必ずしも下表とは一致しない。

表-1 市販製品の仕様の例(代表値)

モデル名	LTS200	DTS-Ultra		DTS800S
特色	低コスト	高性能		長距離
主な用途	火災・異常発熱検知	プラント, 地質調査	電力ケーブル監視	
測定距離	2 ~ 4 km	4 ~ 8 km	8 ~ 15 km	15 ~ 30 km
測定間隔	1.0 m	0.1 ~ 1.0 m	0.5 ~ 1.0 m	2.0 m
温度範囲	-20 ~ 150	-190 ~ 600	-20 ~ 150	0 ~ 85
温度分解能	0.5	0.5 未満	0.5 ~ 2	1 ~ 2.5
測定時間	2 ~ 10 秒	5 ~ 120 秒	1 ~ 5 分	5 ~ 20 分
光源波長	900 nm	1064 nm		1550 nm
測定方式	シングルエンド・ダブルエンド			シングルエンド
光ファイバー	マルチモード			シングルモード

3.3 温度測定方式

石英光ファイバーは温度変化に対しては十分安定しているが, 実際の設備監視では主に熱応力歪みや施工上必要な光ファイバー接続点の増加により, 全長の光減衰率が不均一になる場合が少なくない. DTSによる温度測定では測定点までの光減衰量の積分値の関数としてラマン散乱係数が求まるため, 光ファイバー減衰率の不均一は温度精度に影響を与える.

この問題を解決する手段として一本の光ファイバーの両端から測定するダブルエンド方式がある. この方式では同じ光ファイバーを両端から交互に測定し, 両結果を演算処理することで減衰率分布の影響を消去している. これにより 200 以上の高温環境でも安定した温度分布測定が可能となる. (図4参照)

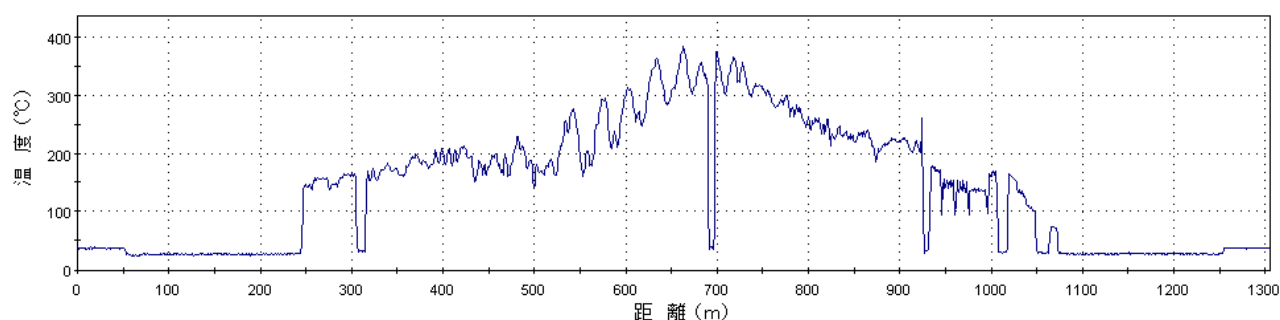


図 4 ダブルエンド方式による高温ガス化炉表面温度の測定例

したがって一般的に高温設備監視では, ダブルエンド方式が強く推奨されるが, 測定範囲全体の温度が比較的均一で, 緩やかな曲率半径で光ファイバーが布設される用途においてはシングルエンド方式でも十分な精度が得られる.

ただし、図5の電力ケーブル温度分布監視例に見られるように、遠方ほど温度分解能が低下するのは避けられない。また厳密には設置時に遠端付近の温度を別の方法で測定して、温度精度を補正する必要がある。

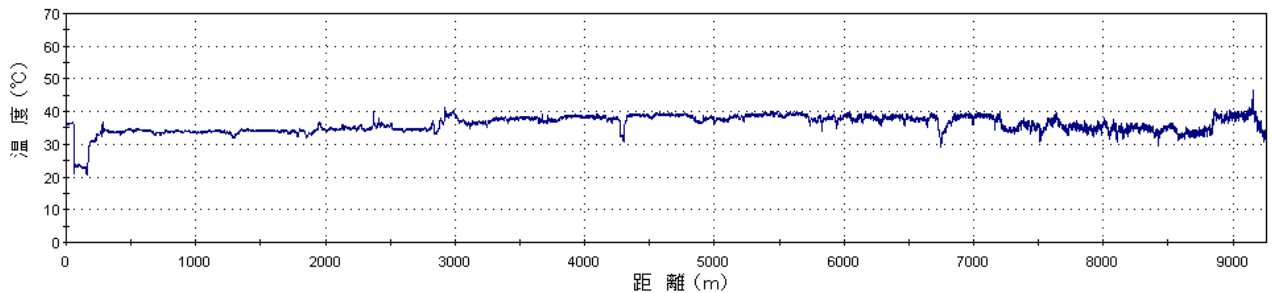


図 5 シングルエンド方式による電力ケーブルの温度分布測定例

4. 特性

DTSは距離方向に沿った連続的な分布データを得る独特の概念の温度計測器であるため、その特性値に関しても独特な項目があり、温度監視システムを構築するにはこれらを考慮して設計する必要がある。

4.1 距離応答性

距離応答性は距離分解能と表現される場合もあるが、距離方向に沿った実際の温度分布に対する再現性を表す特性値であり、図6に示すようにステップ状の実温度分布に対して測定値が10%応答する地点から90%応答する地点までの距離で定義される。

DTSでは光ファイバー光路を移動するレーザーパルスが温度計の感温部に相当するため、各温度測定値は当該点前後影響を受けた移動平均値に近くなるのが避けられない。

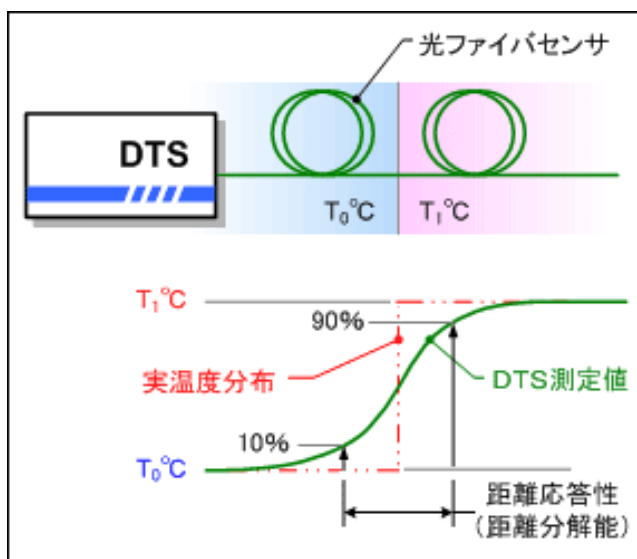


図 6 距離分解能の定義

距離応答性は主に入射するレーザーパルス長(持続時間)に比例し、レーザーパルス長を短くするほど鋭敏に応答するが、信号エネルギーの低下により温度分解能は低下する。

現行製品では1m未満の距離応答性で0.1程度の温度分解能を達成しているものもあるが、トレードオフ関係にある距離応答性と温度分解能の高いレベルのバランスは初期から一貫してDTS開発の主要な課題の一つとなっている。

4.2 温度分解能

DTSの性能を評価する上で、もう一つの重要なパラメータが前述の距離応答性とトレードオフ関係にある温度分解能である。

DTSでは温度の均一な一定区間の温度測定値の標準偏差を温度分解能と定義している。測定時間の大部分は、繰り返し測定による平均化処理に費やされているため、ある区間の温度分解能は測定時間に強く依存し、概ね測定時間の平方根に反比例している。実測例を図7に示す。

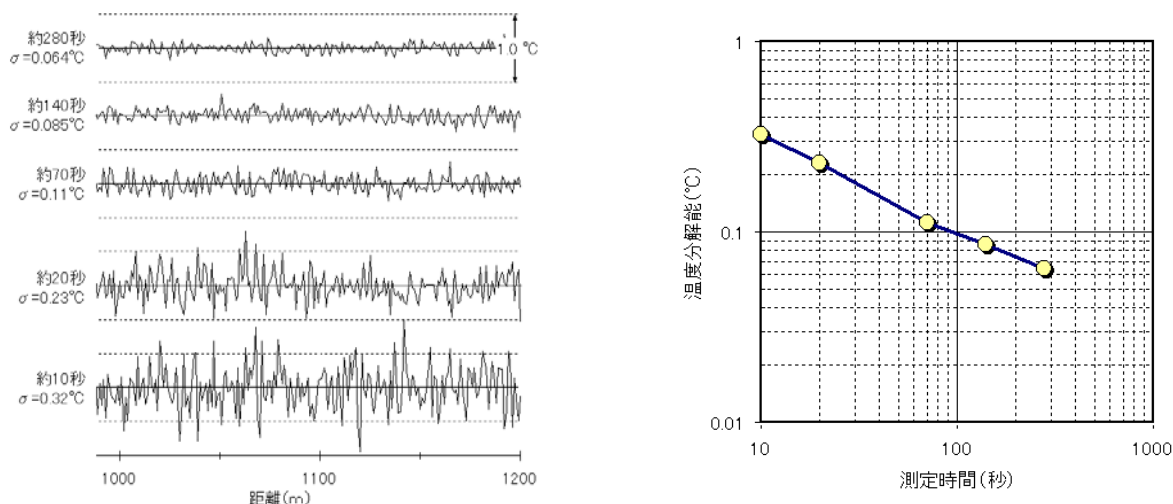


図 7 測定時間と温度分解の関係

5. 光ファイバーセンサー

DTSに使用される光ファイバーの基本仕様は通信用に広く使用されているマルチモードファイバー (GI 50/125 等) またはシングルモードファイバー (SMタイプ) と同一のものであるが、現場で使用される光ファイバー温度センサーは耐久性と熱特性を考慮して適当な外装を施している。

代表的なものとしては、外径 2~3 mm 程度の薄肉ステンレス鋼管に光ファイバー素線を挿入した FIMT (Fiber in Metal Tube) が多く使用されており、用途に応じてさらにポリエチレン被覆などの補強外装を施している。(図8参照)



図 8 光ファイバー温度センサーの構造例 (左:高温用, 右:一般用)

通常の光ファイバーはガラスクラッド表面にアクリル樹脂等をコーティングしているが、高温用ではポリイミド樹脂被覆が使用されている(図8 左)。この高温用光ファイバーセンサーは 350 程度までの高温で連続的に使用可能で、多くの製鉄設備やガス化炉等で実績を重ね、6年以上の耐久性が確認されている。

高温用光ファイバーセンサーでは耐熱温度(350 程度)を大幅に超えると、ポリイミド被覆が破壊されるが、機能要素である石英部分は影響を受けないため、600 程度まで測定が可能で、その後かなりの期間継続使用できる場合が多い。ただし機械的な振動や金属管の変形を伴う場合は、被覆が焼損してから断線に至るまでの時間は短くなる。

また高周波設備や電力関連設備のように電磁界の影響や電氣的絶縁性を考慮する必要のある用途では、補強材をFRP等で置き換えて完全にノンメタリックのセンサー化できるのもDTSの大きな特徴である。

6. 高温設備監視

高温の容器や配管の表面には様々な原因で異常発熱が生じることがある。特に高圧ガスや高温流体を処理する設備では重大事故に結びつくため、確実な予知・検出方法が求められている。

熱電対温度計は一般的な方法であるが、測定点数増加が直接コストに影響するため、監視密度と範囲に制約が少なくない。近年普及しているサーモグラフィーは有効な方法であるが、監視できるのは見通し範囲に限られる上に、現場に高価な機器を多数配置しなくてはならないことが多い。

光ファイバー温度分布計測によれば、広範囲かつ高密度の温度検出が実現する。実際の用途としてはPFBC(加圧流動床)複合発電システム(図9左)や石炭ガス化炉表面(図9右)のホットスポット監視に多数適用されている。



加圧流動床設備の例



石炭ガス化炉の例

図 9 高温設備の表面温度監視例

図9はいずれも表面温度が 200～350 に達する設備での表面温度監視例を示す。光ファイバーを測定対象に固定する方法は大別して、耐熱アルミテープ等で仮固定して最終的に保温材で押さえる方法(図9左)と専用の固定具を使用する方法(図9右)が主流となっている。

DTSによる設備監視では測定対象設備全体の温度分布状況が把握できるため、異常発熱監視にとどまらず、温度分布の把握と傾向管理により設備保全に大きく貢献しているケースも多い。

7. その他の設備監視例

7.1 火災検知

DTSは感熱型火災検知システムとして機能するだけでなく、実際の温度を測定・記録できるため、火災検知にとどまらず異常発熱検知、火災予知も可能となる。また、光ファイバーセンサーは半永久的に性能低下が無く、保守・点検コストの大幅な低減が実現する。

主な実例としては、ベルトコンベア(図 10a)や暗渠(図 10b)の発熱・火災検知がある。海外では英国ロンドン地下鉄において、エスカレータの発熱監視に大規模に採用されている例がある。



a) 石炭ベルトコンベアの火災検知

b) 暗渠内の発熱・火災検知

図 10 設備火災検知への適用例

7.2 ポイントプローブ

光ファイバー温度分布計測システムは、4.1項で述べたように距離応答性で定義される空間分解能の制約があるため、比較的寸法の小さな個別の機器類の温度を正確に測定することが難しい。そこで光ファイバーのフレキシブルな特性を利用して、適当な長さ(通常3m程度)の光ファイバーをコイル状にしたものを連続的に配置することで、多点温度測定が可能なポイントプローブが構成できる。

施工は適当な個数のポイントプローブを配置したユニットを予め製作して、これらを現場で接続する。光ファイバーのロスが一般の適用例よりも若干増加するが、1チャンネルあたり200個程度まで測定できる。信号線は1本の光ファイバーだけなので簡単な構成で防爆対策も不要なため、油圧設備や化学プラント等で個別機器類の温度監視に適している(図11)。

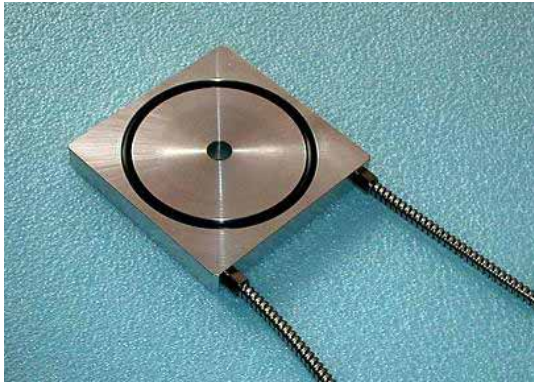


図 11 光ファイバーポイントプローブと油圧設備への適用例

8.まとめ

光ファイバー温度分布計測システムは実用的な性能の製品が市販されてから20年近くになる。その間、数多くの改良が進められ、性能・信頼性は相当向上し、施工技術を含めて十分に実用的なレベルに到達していると言える。

全世界では主に電力ケーブル監視、地質調査、火災検知の分野で合わせて2000件以上の実績があると推定される。我が国では世界的に見ても早い時期から多くの企業がこの技術の開発に関わり、応用技術の開発では先んじてきたが、国内実績は200件程度と推定される。

まだ多くの未開拓分野が残されていると考えられ、この技術のさらなる普及のためにはより多くの設備技術者にDTSの有用性を理解して頂けるよう、提供者側の積極的な応用技術開発と実績作り、その結果としてのコストダウンが必要と考えられる。本論がその一助となることを期待する。

以上

この原稿は以下の講演会の予稿集より転載されたものです。

名称 : 2010年度ガラス製造技術講演会

主催 : 日本セラミックス協会ガラス部会

日時 : 2011年2月4日(金)

場所 : 日本セラミックス協会(東京都新宿区百人町2-22-17)