

# 光ファイバセンシング—熱センシングとその応用

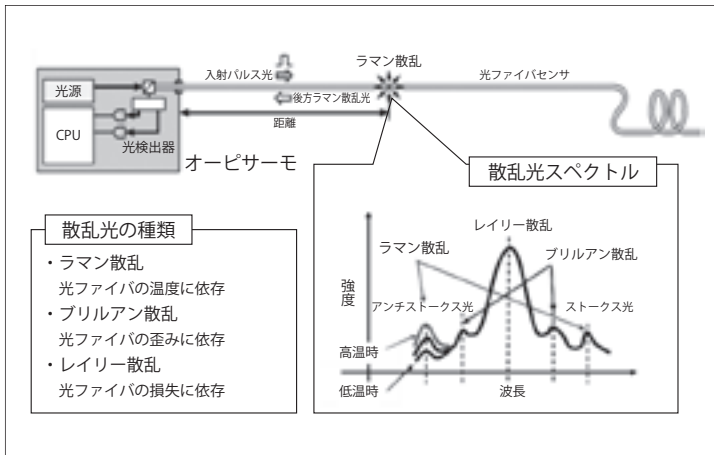
ジェイ・パワーシステムズ 加藤 一

先月号の総論では、光ファイバを用いたセンシング技術全般について説明しているが、ここでは Raman 散乱光の原理を応用した分布型温度センサ(ROTDR)について詳しく説明する。こ

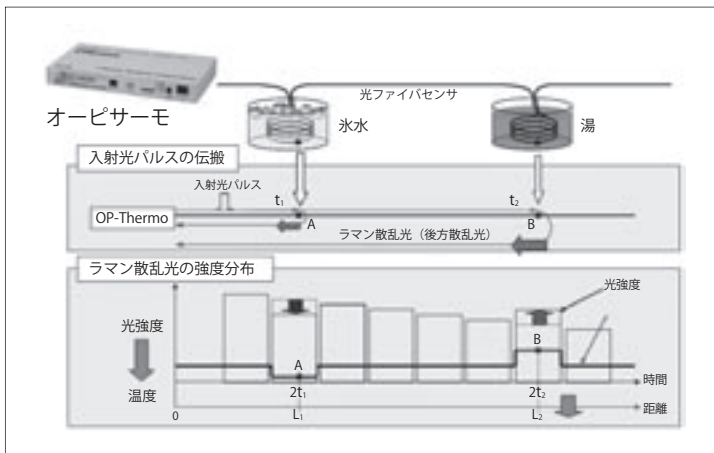
の ROTDR は DTS(Distributed Temperature Sensing system)とも呼ばれている。

なお、オーピサーモは、ジェイ・パワーシステムズの分布型温度センサの商品名である。

図表—1 温度測定の原理



図表—2 位置特定の方法



## 1. 原理

### 1.1 温度測定

光ファイバにパルス光を入射すると、その光は光ファイバ中を伝搬していくにつれて、各部においてごくわずかだが散乱しながら減衰していく。この散乱光の大部分は、レイリー散乱光と呼ばれ、光ファイバ中の微小な屈折率のゆらぎにより発生するもので、その波長は入射した光と同じ波長である。

散乱光の中には光ファイバの石英分子の格子振動とエネルギーの授受を行い、その結果、入射光の波長が若干シフトするものがある。これをラマン散乱光という。このラマン散乱光には2つの成分がある。1つは格子振動にエネルギーを与えた光が長波長側にシフトするストークス光と、もう1つは格子振動からエネルギーを得て短波長側へとシフトするアンチストークス光である。とくにアンチストークス光の強度は散乱を起こした

位置での光ファイバの温度により、大きく変化する。したがって、ラマン散乱光の強度を測定することによって、光ファイバの温度を知ることができるわけである(図表—1)。

### 1.2 位置特定

光ファイバ中で散乱した光は、その大部分が光ファイバ外に放出されるが、一部は光ファイバ中を逆進し、入射端に戻ってくる。パルス光を入射してから、散乱光が入射端に戻ってくるまでの時間を計測すれば、光ファイバ中の伝搬速度は既知であるため、その散乱が生じた位置を特定することができる(図表—2)。

## 2. 特徴

光ファイバ温度分布計測システムには、以下の特徴がある。

- ① 光ファイバ自体がセンサ
- ② センサ部に電源不要
- ③ センサ部は電磁誘導の影響を受けない
- ④ 1m 間隔で数 km の温度分布計測が可能

上記の特徴から、電力ケーブルの長手方向の温度分布を光ファイバで計測することを目的に研究開発が行われ、現在ではさまざまな用途に用いられてきている。

## 3. システム

### 3.1 計測方式

この ROTDR は、次の 2 種類の計測方式を選択することが可能である。

1 つは、センサ用光ファイバを、ひとふで書きで配線し、その遠端を終端とするシングルエンドと呼ばれる方式で、もう 1 つは、センサ用光ファイバを計測装置端まで戻して配線し、始端側および終端側の両端から計測するループと呼ばれる方式である。

図表—3 シングルエンド方式とループ方式の比較

項目	シングルエンド方式	ループ方式
システム 系統	計測装置 光ファイバセンサ	計測装置 光ファイバセンサ 光スイッチ
特徴	○配線が簡便でシンプル ○計測系統が 1 系統 ●断線時以降の区間計測不可	●配線距離長い ●計測系統が 2 系統(時間が倍) ○1 個所の断線なら断線部以外計測可

図表—4 FTR3000 の仕様

項目	仕様			備考
測定レンジ	500m	1000m	2000m	
測定時間(※ 1)	10sec.	20sec.	60sec.	
温度精度(※ 2)	± 1°C (Typ.)			1 σ (1S.D.)
サンプリング間隔	1m			
応答距離	2m (Typ.)			10-90% Step
	3m (Typ.)			Hot spot
適合光ファイバ	GI 50/125			
適合光コネクタ	E2000-APC			IEC60852-1-2001
自己診断機能	ファイバ断線、光源異常など			
インターフェース	LAN/USB			
データ保存	SD カード			
動作温度範囲	0 ~ 40°C			
保管温度範囲	- 20 ~ 60°C			
湿度範囲	最大 85% (無結露)			
電源	DC12 ± 1.5V (AC90-264V AC アダプタ付属)			
消費電力	8W (20°C)			15W (最大)
寸法	300W × 160D × 37 (mm)			
質量	3kg			

(※ 1) USB/LAN 接続の場合

(※ 2) 温度精度は当社の推奨する光ファイバセンサを用いた場合の代表値であり、使用する光ファイバセンサの仕様や中継接続点の数に依存する

図表—5 FTR3000 の外観



る方式である。

上記 2 方式を比較して、図表—3 に示す。

センサファイバ断線の際に、断線以降で温度監視できないというデメリットがあるが、センサ

ファイバ断線の確率が低いことから、通常であれば、シングルエンド方式が多く採用されている。

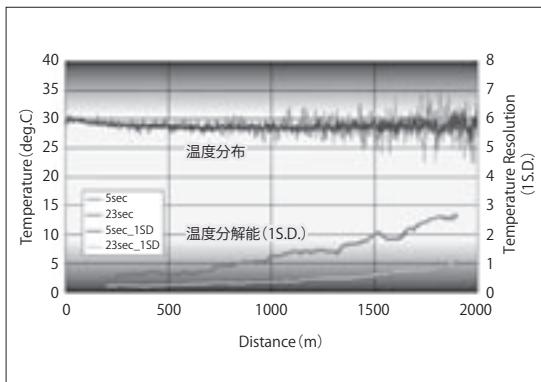
### 3.2 計測装置仕様

最大 25km まで計測できる機種もあるが、ここでは最大 2km の光ファイバの温度分布を計測する計測装置である FTR3000 という機種の仕様を、参考例として図表—4、5 に示し説明する。

この FTR3000 には、以下の特徴がある。

- 小型・軽量(ポータブル)
- 制御 PC 不要(単独測定可能)
- 温度データ自動保存(SD カード)
- バッテリー駆動可能(低消費電力)
- 温度警報判定・出力機能

図表—6 温度精度



- ネットワーク(TCP/IP)、USB 接続可能

### 3.3 仕様定義説明

#### (1) 測定時間

散乱して戻ってくる非常に微弱な光を計測する必要があるため、信号光からノイズ成分を分離していかなければならない。そのため、測定時間は、数秒~数十秒必要である。

#### (2) 温度精度

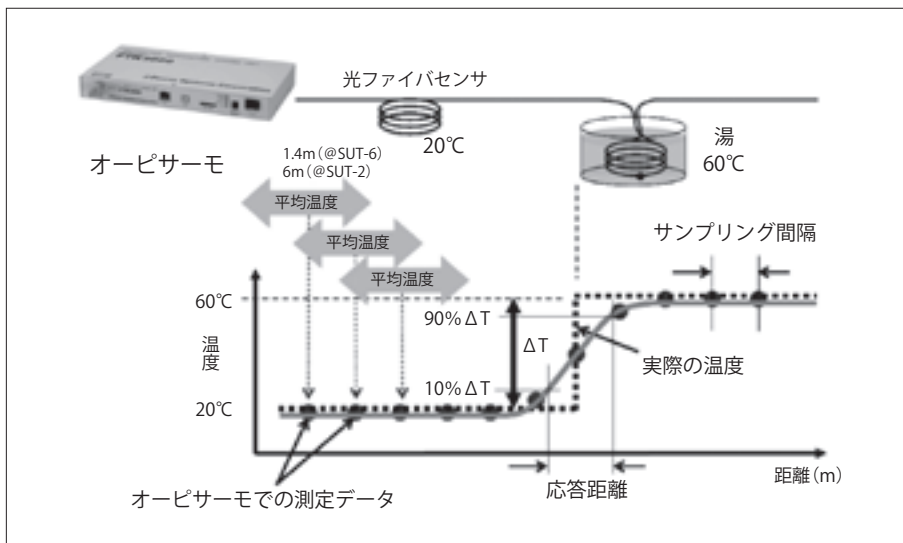
散乱光は、光ファイバ中を伝搬していくにしたがい減衰していくので、遠端側では、温度計測のバラツキが大きくなる。このバラツキを評価するのに測定値の標準偏差(1σ)1S.D.の値で評価する(図表—6)。

#### (3) サンプリング間隔

光ファイバの長さ方向数 10cm ~ 1m の範囲で平均化処理を行う。分解能を細かくするには、数 m のセンサ用光ファイバの束を、計測したい個所に設けることで対応可能である。

#### (4) 応答距離

この ROTDR の特徴は、光パルスを送出して、戻ってくる散乱光強度を計測しており、光パルスの幅が、そのまま温度ひろがりとなって計測されてしまい、ある一定ファイバ長がないと、その場所の正確な温度を計測することができない。そこで、その必要ファイバ長を、応答距離という仕様



図表—7 応答距離の説明

で示している。この応答距離とは、光ファイバセンサ部に手前側 20℃とその後方に 60℃の区間を構成し、計測される温度が 24℃ (ΔT 10%) から 56℃ (ΔT 90%)までの区間をいう。また、HotSpot とは、実際の温度を 1 ポイント以上計測できるための最小のファイバ長である(図表—7)。

#### 4. センサ用光ファイバケーブル

##### 4.1 光ファイバ

入射光量を多くとれるマルチモード光ファイバ GI-50/125 が一般的に常用される。ただし、高温での長期使用や、長距離で低損失が必要な場合は、シングルモードファイバで計測できる装置もある。

光ファイバ自体は、石英ガラスで数 100℃までの耐熱性があるが、必ず被覆を施し、保護しなければならない。光ファイバの被覆の種類は限られており、用途に応じて選択する(図表—8)。

##### 4.2 ケーブル

布設環境により種々異なるが、基本的には、温度変化や外的環境変化により、光ファイバに歪みが加わったり、損失変動することなどがないようにケーブル構造を設計・選定する(図表—9)。

### 5. 応用

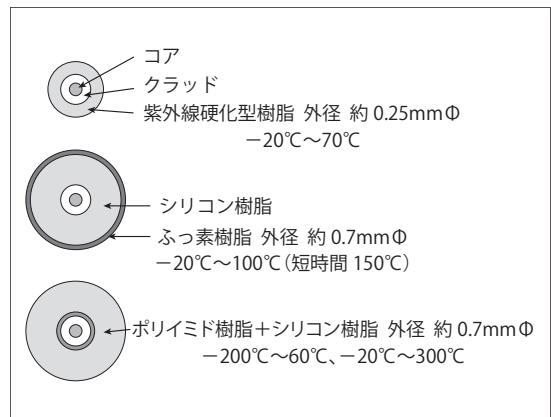
#### 5.1 ネットワーク構成

本温度計測装置には、TCP/IP のポートを搭載しているため、ネットワークを介して各所の計測装置を中央で監視することが可能である(図表—10)。

#### 5.2 火災検知

最近では火災検知の需要が多く、事前に有効性確認のため種々火災模擬実験を行っている。その事例を図表—11、12 に紹介する。

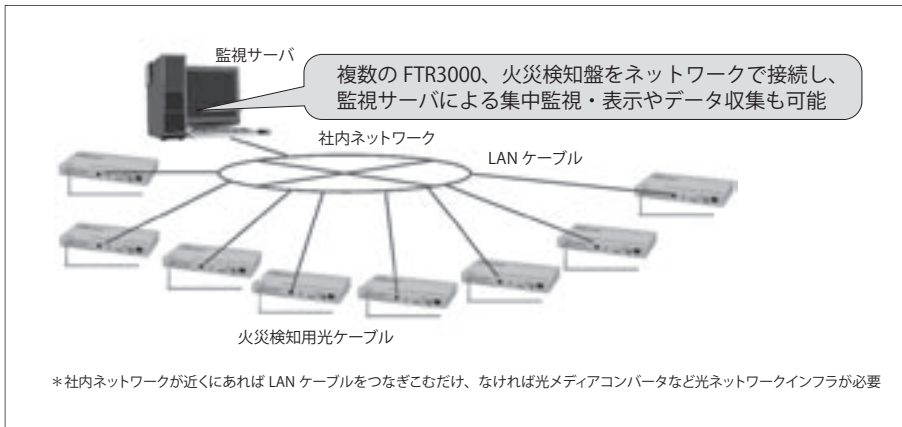
図表—8 光ファイバ被覆の種類



図表—9 ケーブル構造の例

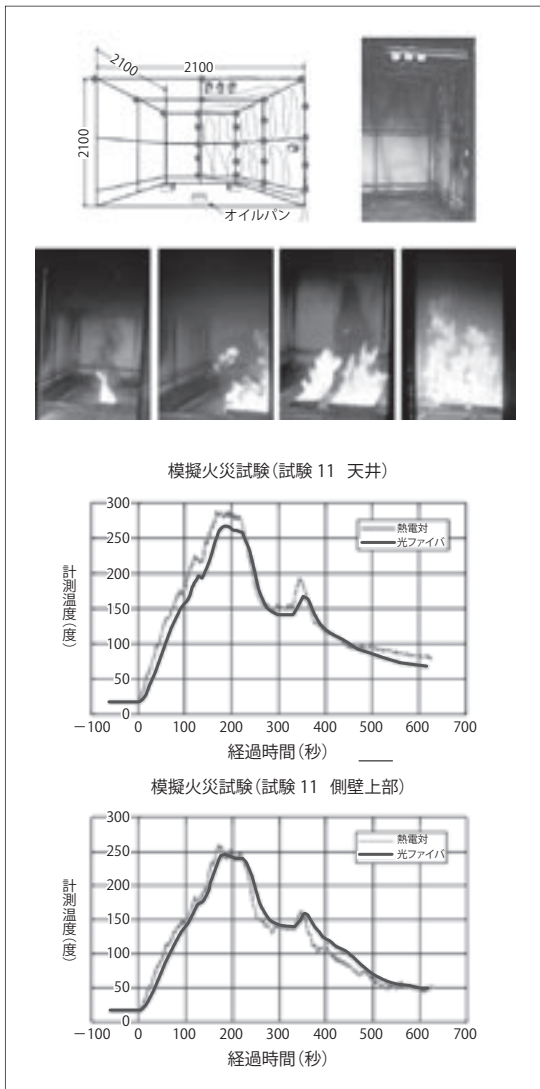
種別	ノンメタリック平型	SUS 管内蔵型	PE 被覆付 SUS 管内蔵型
構造			
温度範囲	-20~70℃(連続) 150℃以下(短時間)	-20~75℃(標準) -200~60℃(低温用) -20~300℃(高温用)	-20~75℃(標準)
適用用途	<ul style="list-style-type: none"> <li>●電力ケーブル温度監視</li> <li>●暗渠内ケーブル温度監視</li> <li>●工場内設備温度監視</li> <li>●空調制御・室温管理 等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●LNG 設備の低温検知</li> <li>●硫黄配管温度監視</li> <li>●ダム堤体コンクリート温度監視</li> <li>●地熱発電所蒸気井温度監視 等</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●電力ケーブル温度監視(直埋型)</li> <li>●ケーブルラック温度監視</li> <li>●トンネル火災監視 等</li> </ul>
サイズ	2×4mm	直径 0.9~3.2mm	直径 3~5mm

\*測定温度範囲、測定環境など、要望、用途に応じた光ファイバを用意する



図表—10  
ネットワーク構成例

図表—11 火災の実験例



図表—12 トンネル火災の実験例



## 6. 適用例

### 6.1 電力ケーブル管理/設備監視

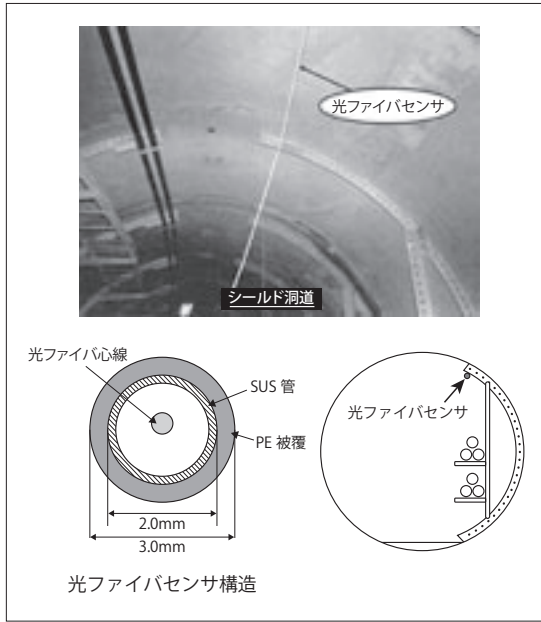
洞道天井部に光ファイバセンサを布設し、洞道内異常温度や火災を検知する(図表—13)。

電力ケーブル表面に光ファイバセンサを沿わ



せ、その表面温度から導体温度を推定し、送電システムの効率運用や信頼度向上を目的に利用する例である(図表—14)。

図表—13 洞道温度監視例



図表—14 電力ケーブル温度管理例



## 6.2 その他の事例(図表—15)

図表—15 その他の事例

- LNG タンク監視 (漏れ) ヒータ制御
  - 硫黄 / 樹脂液の硬化防止
  - 断熱材の不具合箇所、ヒータの故障箇所が即座に特定可能
- パイプライン温度監視
  - 断熱材の不具合箇所、ヒータの故障箇所が即座に特定可能
  - <パイプライン構造>
  - ヒータ
  - 光ファイバセンサ 断熱材
  - ヒータ電源投入後
  - ヒータ電源
  - 順次投入中
  - ヒータ電源投入前
  - 温度
  - 距離 (m) ジョイント箇所 (外気温)
- 油井 / ガス井 温度監視
  - 採油サービス業務
  - 石油地層構造の解析 / 石油抽出の効率化
  - 流量測定 / 圧力蒸気の状態確認
- ベルトコンベヤ火災検知
  - ベルト
  - 光ファイバセンサ
  - ローラー
  - 両脇監視
  - ベルト上部監視
  - ベルト下部監視
  - 上部両脇監視

### ■参考文献

- 1) ユニバーサル造船 木下氏 日本船舶海洋工学会誌 KANRIN 2号 '05.09「光ファイバ温度計を利用した船舶火災感知」 P60 ~ 67