

AIを活用した光ファイバー温度測定による予兆監視ソリューション

Symptom Monitoring Solution by Optical Fiber Temperature Measurement Utilizing AI

● 齋藤賢二

● 宇野和史

● 笠嶋丈夫

● 有岡孝祐

あらまし

発電所やプラント、製造業の工場などでは安心・安全が重視され、安定して稼働することが求められる。特に、機械や設備のトラブルは、故障すると発電能力や製造能力に影響を及ぼすだけでなく、不良品の生産によって大きな損失を生じさせることもある。富士通ではこうした問題を解決するため、人工知能(AI)による予兆監視機能も備えた「FUJITSU Business Application Operational Data Management & Analytics 予兆監視モデル for 光ファイバー温度測定」を開発した。本製品では、機械や設備などの温度検知を光ファイバーを用いて常時行うことによって、これらの発熱状況を監視し、異常や故障につながる予兆を検知できる。また、従来の測定器では困難であった狭い場所などでも温度測定が可能になった。

本稿では、開発した光ファイバー温度測定技術とその特徴、および適用事例について述べる。

Abstract

At power stations, plants, and manufacturing factories, priority is given to safety and security, and guaranteed stable operations are required. Regarding problems with machines and equipment, in particular, failures do not only affect power generation capacity and manufacturing capacity but also cause significant losses due to the production of defective products. In order to solve these problems, Fujitsu has developed “FUJITSU Business Application Operational Data Management & Analytics Symptom Monitoring Model for Optical Fiber Temperature Measurement,” which is equipped with a symptom monitoring function that utilizes artificial intelligence (AI). This product is capable of detecting symptoms potentially leading to errors and failures by using optical fiber for the constant temperature detection of machines and equipment to monitor their heat generation conditions. It also allows temperature measurements in confined spaces, something difficult with conventional measuring instruments. This paper presents the developed optical fiber temperature measurement technology as well as its features and examples of its applications.

まえがき

高速な通信を可能にする光ファイバー通信技術は、現在の情報化社会を支える上でなくてはならない存在である。光ファイバーに近赤外線領域のレーザー光を入射すると、光ファイバーを構成する石英ガラスの物性・状態に起因する様々な散乱光が観測される。散乱光の種類には、入射光と同一の波長であるレイリー散乱光、音響フォノンやマグノンとの相互作用により波長がわずかに変化したブリュアン散乱光、および光学フォノンとの相互作用により波長が変化したラマン散乱光が知られている。

ラマン散乱光におけるストークス散乱とアンチストークス散乱は、フォノン順位間の遷移により起こる散乱である。そして、ストークス散乱光とアンチストークス散乱光の強度比と熱平衡を仮定したときのボルツマン分布から温度が求められる。^{(1)~(6)}

ラマン散乱光を利用した光ファイバー温度測定器では、光ファイバーにパルス状のレーザー光を入射して、光ファイバー各所で後方散乱光を発生させ、その強度を光ファイバー中を伝達する遅延伝達時間とともに測定する。その強度変化は光ファイバー各所の温度に対応し、遅延伝達時間は光ファイバーの距離に対応する（図-1）。

光ファイバーの耐熱温度は、ガラス中の不純物が熱拡散する温度以下であれば、保護用被覆の耐熱温度に相当する。例えば、ポリイミドなどの耐熱性に優れた樹脂材料を用いれば、300℃程度の高温環境下でも測定可能である。^{(7), (8)} ラマン散乱光を用いた光ファイバー温度測定技術は、トンネル内の火災検知や送電線、あるいはプラントの温度異常監視、石油掘削や地質調査におけるボーリング孔中の温度分布測定などに広く応用されている。^{(9)~(14)}

富士通では、ラマン散乱光を用いた光ファイバー温度測定技術を活用し、データセンター内で効率的に温度調整するためのセンシング手段として、空間分解能の向上やサーバラックなどへの効果的な光ファイバー敷設技術をはじめとした網羅的な技術開発を行ってきた（図-2）。⁽¹⁵⁾ 更に、従来の光ファイバー温度測定適用分野であるインフラ、発電所、化学プラントなどで蓄積した技術や知見に基づいて、新しい使い方や価値の提供を目指して検討を行ってきた。その結果、光ファイバー温度測定技術に専用の人工知能（AI）による予兆監視機能を加えた「FUJITSU Business Application Operational Data Management & Analytics (ODMA) 予兆監視モデル for 光ファイバー温度測定」を提供している。

本稿では、本製品の技術開発から適用例までを

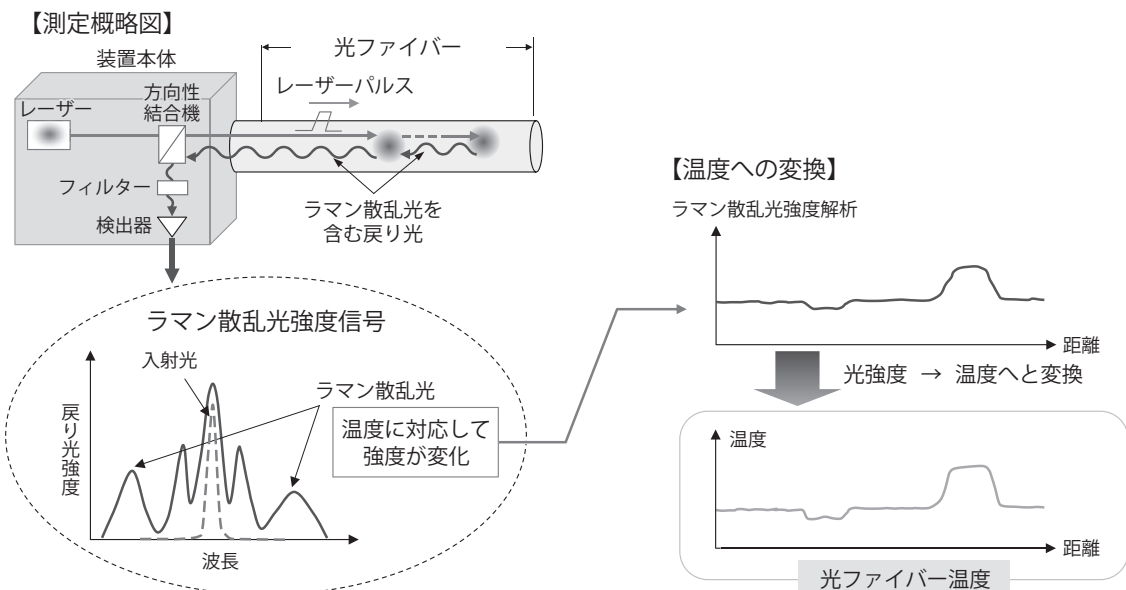


図-1 光ファイバーによる温度測定技術

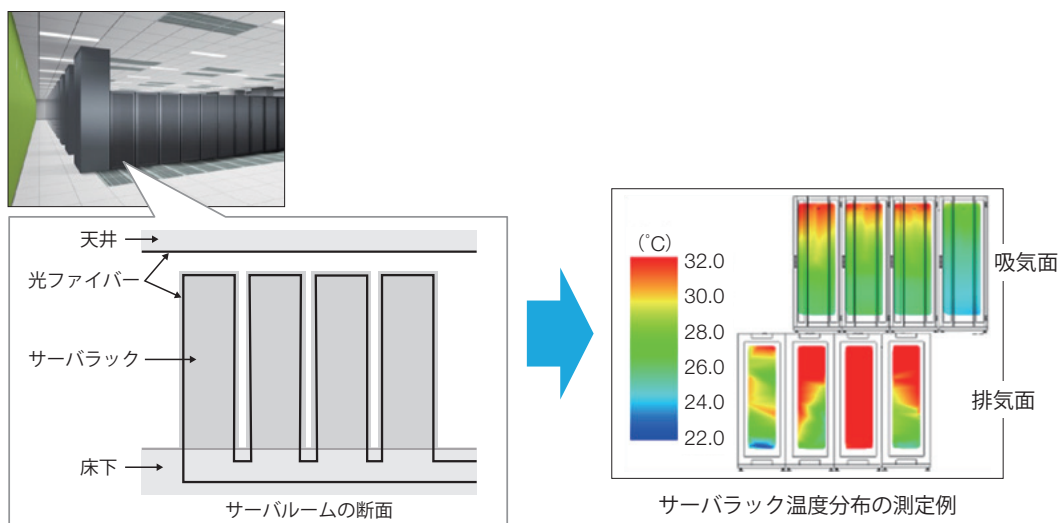


図-2 光ファイバーによるデータセンター内の温度監視システム

紹介する。

温度測定技術の開発

温度算出に用いるラマン散乱光の強度は、入射光と同一波長で比較的強度が大きいレイリー散乱光に比べ、 10^{-6} 程度と極めて微弱である。このため、アバランシェフォトダイオードなどの光電子増倍効果を持つ高感度検出器を使用する必要がある。したがって、回路ノイズであるショット雑音も同時に増倍される。温度は散乱光強度値から求められるため、散乱光強度とノイズとの比であるS/N比が温度精度に直接影響することに留意する必要がある。特に、測定器から遠方位置に当たる散乱光強度は、光ファイバー中の伝送損失の影響で小さくなるためS/N比が小さくなり、温度精度が低下する。

重要設備の温度監視では、温度にしきい値を設けて異常を判断することが一般的である。精度が低く温度誤差が大きい測定値を用いると、異常の誤検知や検知遅れの原因になるため、温度誤差を小さくすることが重要である。

測定精度の向上には、前述したS/N比におけるノイズの低減が効果的である。通常の信号処理におけるノイズ低減処理では、周波数帯域ごとに異なるフィルター処理を行うことが一般的である。光ファイバー温度測定においてフィルター処理を適用する場合、散乱光強度や温度分布の空間周波数を扱うことになる。これらは測定対象であり、ど

のような周波数帯域の信号を取得するかは既知ではないため、単純なフィルター処理の適用は難しい。そこで、富士通が開発した統計解析やデータ分析の手法を取り入れた信号処理により、得られた信号に基づいてノイズを選択的に低減する手法を開発した。これにより、測定器遠方位置においても大幅に高精度化された温度の測定が可能となった。

予兆検知AIアルゴリズムの開発

インフラ、発電所、化学プラント、更に製造業など、一般に温度を精密に測定すべき領域は極めて広い。また、測定した温度をしきい値によって監視する方法に加え、従来では検知できなかった温度の変化をより迅速に検知したいという要望が近年増加している。これは、人による監視の限界や人的負荷を減らす目的、更にトラブルや異常の早期検知、つまりは改善箇所をいち早く察知することが企業の生産活動に直結し、製造品質の向上や設備の安定稼働において、極めて重要なためである。

富士通は、光ファイバーから得られる多点の温度データとAI技術を融合して、温度分布の「いつもと異なる兆候（アノマリ）」を早期に検知可能な予兆検知システムを開発した。多点温度データを温度分布のパターンとして捉え、測定温度分布がいつものパターンから外れた際にアノマリと判断することを基本として。しきい値設定による監視に加え、AI技術による高度な検知を組み合

わせることで、従来にはない温度監視を実現した(図-3)。

AI技術やアルゴリズムは世の中に数多く存在するが、富士通は温度の異常を捉えること、更に誤検知なくアノマリのみを検知することが重要と考えた。温度変化の全てをAIのアルゴリズム計算だけで見つけるのではなく、「ある時点から特有の危険な温度変化が発生している」状態に着目し、その変化を見つける独自の予兆検知AIアルゴリズムを開発した。

本アルゴリズムは、過去のデータから各温度の関係性を学習し、最新の温度変化が学習した状態からどの程度乖離しているかを計算することを基本としている。また、学習の頻度やタイミング、再学習を判断する独自のアイデアが多数取り入れられており、単なる温度の上昇や下降ではなく、人が注意すべき特異な温度変化のみを検知できる。本アルゴリズムは、実際にプラントや製造業の現場において何度も調整を行い、実際の現場で使えるアルゴリズムを目指して開発されたものである。AIによる検知精度を支えている基盤技術は、温度測定部分で開発したノイズ低減処理であり、AIによる検知の精度や正しさは、極論すれば入力されるデータのS/N比に大きく左右されることになる。

本製品は多数の独立したセンサーから構成され

るものではないため、複数のデバイス間で生じる個体差は発生せず、AIに入力される温度データの精度が安定している。更に、専用のAIによる分析を組み合わせているため、監視のためのAIアルゴリズムの選択や、データの前処理、そしてAIによる分析結果の判断に頭を悩ませる必要はない。すなわち、光ファイバーをどこに敷設して何を監視するのか、それによりどの問題・課題を解決するのかということに利用者は意識を集中できる。

適用事例

本章では、本製品を駆使して富士通が取り組んでいる数多くの試験導入やトライアルの一部を紹介する。

● 火力発電所の事例

火力発電所には、熱に関する非常に重要な設備が多数存在する。火力発電所を安定稼働するためには、それらの設備一つひとつに対し、高度な監視と制御が欠かせない。とりわけ、ボイラーやタービンに近い燃料配管や蒸気配管、煙道などの温度変化を監視し、設備の状況を常に把握しておくことが早期に異常を検知するために重要である。発電所やプラントでは、一般的に温度測定手段として熱電対やサーモカメラを使用している。しかし、防爆対策や多点計測する際のセンサーケーブルの

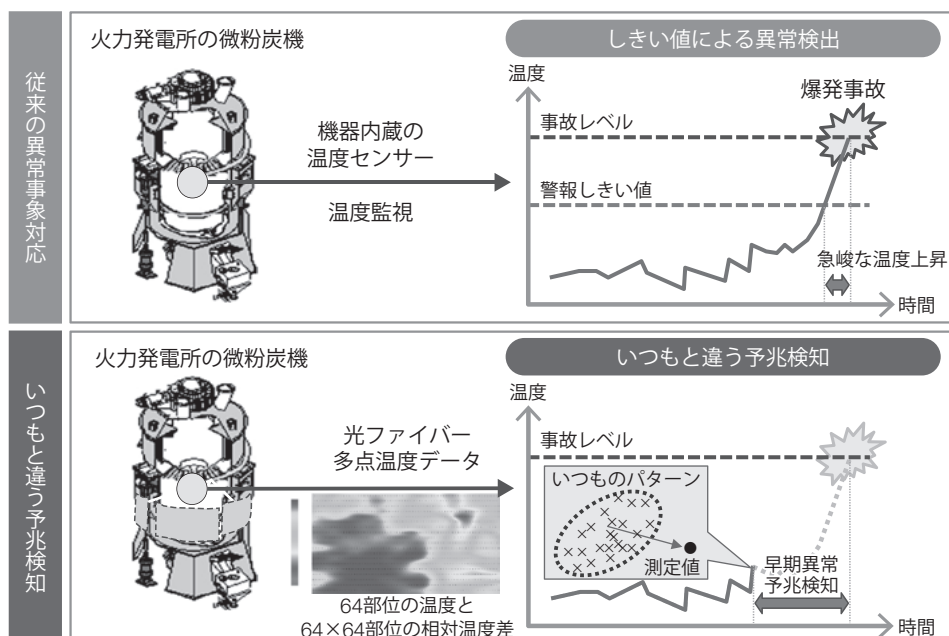


図-3 発電所の設備を例とした予兆検知の考え方

取り回しができなかったり、設備形状の複雑さから測定が困難であったりする領域が多数ある。それらの課題に対し、光ファイバー温度測定では数km以上の長さにわたって10 cm間隔で温度を測定できることに加えて、光を使用した測定技術であるため防爆対策の必要がないといったメリットを活かすことができる。

2014年6月から2015年3月にかけて、東北電力株式会社様と共同で、東北電力秋田発電所の燃料配管と蒸気配管、およびボイラー煙道の温度変化を継続して測定する実証実験を行った。高温の排気ガスだけでなく振動も加わる過酷な環境において、長期にわたり本製品が使用できることを確認すると同時に、測定した温度データの変化から設備の異常を解析により検知することが目的である(図-4)。^{(16), (17)}

その結果、蒸気配管の測定温度データを解析することにより、蒸気配管内の水蒸気の液化や滞留の発生を検知できた。更に、蒸気配管と燃料配管の温度上昇と下降タイミングの比較から、それぞれの配管が正常な状態であるかどうかを把握することにも成功した。

図-5は光ファイバー温度測定により取得した蒸気配管と燃料配管の各部位の温度を示している。燃料配管温度は蒸気配管により一定に保たれてい

るが(⑤, ⑥), 蒸気供給部(①)の温度上昇から3分遅れて蒸気配管(③, ④)が温度上昇し、戻り部温度(②)が下降している(点線の間)。すなわち、供給された蒸気の液化・滞留が発生していることが明らかになった。また、各部位の温度を総合して分布を評価する手法の適用により、異常の予兆を早期に検知できることを確認している。

更に、120℃に達する高温の排気ガスが排出され、継続的な振動にさらされるボイラー煙道においても、60日間連続して温度監視を実現した。これによって、高温・高振動環境下でも本技術を活用したリアルタイム温度監視を行い、設備の異常検知が可能であることを実証した。

東北電力株式会社様では、洞道と呼ばれる専用管路内に設置されているOFケーブル(Oil-Filled cable)の状態を監視する目的でも、本製品を使用している。光ファイバーによる温度測定技術により、ケーブル1本レベルの状態を精密にモニタでき、安全性の向上が実現されている。

● 製造業の事例

一方、製造業では、生産している製品の品質管理や改善に向けて、本製品の利用が進んでいる。製造現場においても熱を扱う加熱や乾燥の工程があり、その工程が品質に直結するようなケースにおいては、空間的な温度監視やAIによる温度の特

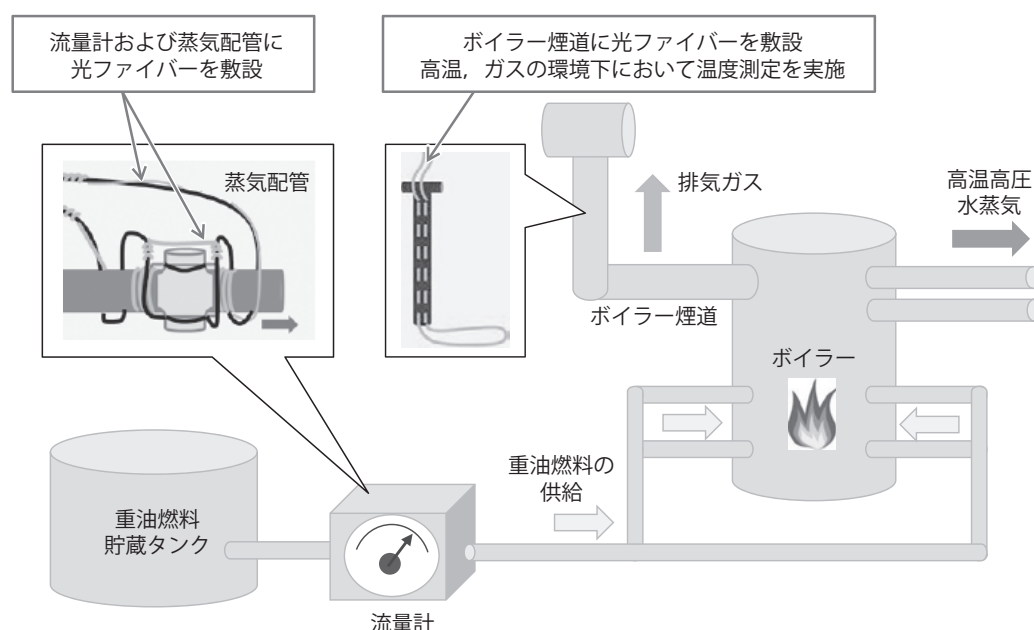


図-4 発電所設備への光ファイバーの設置

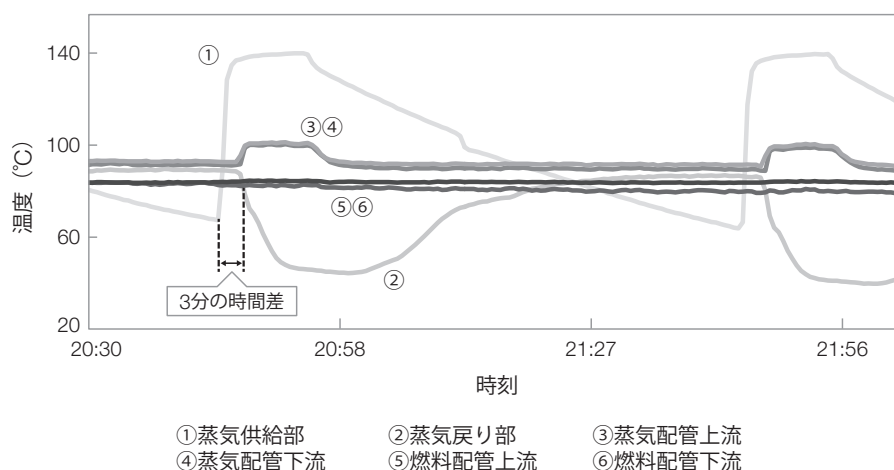


図-5 光ファイバーによる配管温度測定結果

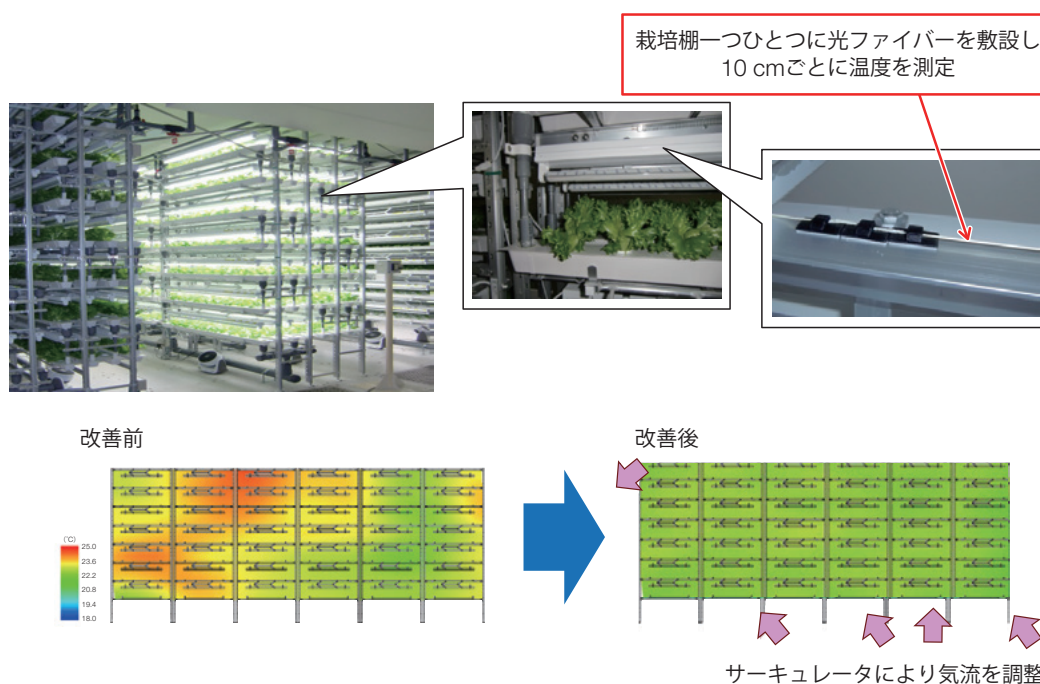


図-6 栽培棚の温度均一化

異なる変化で予兆を見つけることは大変重要となる。温度の変化を見逃すと、最悪の場合、大量の廃棄や不良品の発生を引き起こすことになる。しかし、温度の管理は現場のベテラン技術者のノウハウに頼っているケースもあり、数値化されていないという課題も多数存在する。

富士通では、福島県会津若松市に構築した「会津若松Akisaiやさい工場」で、低カリウム野菜などを半導体工場のクリーンルームを活用して生産している。その生産現場において、半導体製造で

培った品質管理の考え方と本製品による温度測定の技術を組み合わせて、新鮮度とおいしさが長く維持できる野菜を生産している。

野菜の生育速度は温度の影響を大きく受けるため、植物工場での温度管理は重要である。栽培棚の温度分布が不均一な場合、野菜の生育がばらつくため、出荷時期を分割したり、場所を入れ替える必要がある。また極端に栽培容器内で野菜の生育度がばらついた場合は、廃棄することもある。空間的に広大で、栽培棚のような構造物が

多数存在する植物工場において網羅的に温度分布を把握することは、従来の熱電対やサーモカメラでは困難である。

富士通では、温度センサー用光ファイバーを工場内に張り巡らせて室内の温度分布を可視化することによって、空調の温度、風量、サーキュレータの風向などを調整し、温度分布が均一になるように改善した(図-6)。こうして、栽培環境の均一化と歩留まりの改善に貢献できた。

製造現場での利活用については、温度測定による異常や予兆を見つけるだけでなく、ベテランオペレーターの制御ノウハウの見える化、更に強化学習などのFUJITSU Human Centric AI ZinraiのAI技術を組み合わせることによる自動制御を視野に入れた活用も可能である。

多数のセンサーを新規に導入する場合、デバイスの個体差や調整に時間を要し、運用時にセンサーデバイスそのものの状態監視が必要となるケースもある。一方、本製品では個体差の概念がなく、精度も含めて常に安定したデータ取得が可能であることから、製造現場において高度にIoTを活用するための基盤に位置付けることができる。

む す び

本稿で紹介した「ODMA予兆監視モデル for 光ファイバー温度測定」は、広範囲かつ精密な温度の測定と、専用AIによる高度な監視を実現した。その適用範囲は、データセンター、プラント、インフラ、製造業へと広がっている。富士通は、温度そのものの測定と監視も重要であるが、更に重要なことは、温度を切り口にした問題・課題の解決であると考え、過去の経験およびノウハウをベースに解決のための専門技術提案を積み重ねている。AIについては、より高度な分析技術の導入や分析ツールの組み合わせによる精密化を目指しており、今後も機能の充実を図る予定である。また、光ファイバーについては、従来では不可能とされていた領域への適用を目指して研究開発を進めており、今後は更に高度な問題の解決に取り組んでいく。

IoTやAIを使った保守・保全というテーマは非常に重要であり、様々な手法が存在する。富士通は誤検知やミスが許されない現場においては、質の高いセンシング(測定)と専用AIアルゴリズムを

融合させることによる確実な分析・監視が重要と考えている。今後も、現場で使えるソリューションと解決提案サービスの拡充を図る所存である。

参考文献

- (1) K. Kikuchi et al. : Measurement of Raman Scattering in Single-Mode optical Fiber by Optical Time-Domain Reflectometry. IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.24, No.10, p.1973-1975 (1988).
- (2) P. C. Wait et al. : A theoretical comparison of spontaneous Raman and Brillouin based fiber optic distributed temperature sensors. Optics Communications, Vol.144, Issues 1-3, p.17-23 (1997).
- (3) K. Hotate : Fiber Sensor Technology Today. Optical Fiber Technology, Vol.3, Issue 4, p.356-402 (1997).
- (4) M. A. Farahani et al. : Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing. J. Lightwave Technology, Vol.17, Issue 8, p.1379-1391 (1999).
- (5) J. Geng et al. : The development of the model and arithmetic for the fully distributed fiber optic sensor based on Raman optical-fiber frequency-domain reflectometry (ROFDR). Sensor and Actuators A : Physical, Vol.101, Issue1-2, p.132-136 (2002).
- (6) A. L. Chakraborty et al. : Compensation for temperature dependence of Stokes signal and dynamic self-calibration of a Raman distributed temperature sensor. Optics Communications, Vol.274, Issue 2, p.396-402 (2007).
- (7) 古河電工：耐熱光ファイバ(ポリイミド被覆).
https://www.furukawa.co.jp/telecom/product/opt_fiber/specialty_pyrocoat.html
- (8) フジクラ：耐熱性ファイバ.
http://www.fujikura.co.jp/products/optical/opticaldevices/04/2044300_11305.html
- (9) M. J. Willett et al. : The use of a distributed optical fiber temperature sensing system to monitor underground mine roadways for spontaneous combustion. Mining Technology, Vol.77, No.890,

p.301-305 (1995).

- (10) E. Hurtig et al. : Fiber optic temperature sensing : application for subsurface and ground temperature measurements. Tectonophysics, Vol.257, Issue 1, p.101-109 (1996).
- (11) H. Ishii et al. : A fire detection system using optical fibers for utility tunnels. Fire Safety Journal, Vol.29, No.2-3, p.87-98 (1997).
- (12) G. Brambilla et al. : Optical fiber sensors for earth sciences : from basic concepts to optimizing glass composition for high temperature applications. Optics and Lasers in Engineering, Vol.37, No.2-3, p.215-232 (2002).
- (13) H. Li et al. : Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. Engineering Structures : The journal of earthquake and ocean engineering, Vol.26, No.11, p.1647-1657 (2004).
- (14) G. Yilmaz et al. : A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables. Sensors and Actuators A : Physical, Vol.125, Issue 2, p.148-155 (2006).
- (15) 武井文雄ほか：リアルタイム超多点温度測定技術. FUJITSU, Vol.60, No.5, p.423-427 (2009).
<http://img.jp.fujitsu.com/downloads/jp/jmag/vol60-5/paper07.pdf>
- (16) 大友陽介：光ファイバーによるリアルタイム多点温度監視技術に関する研究. 火力原子力発電技術協会 (2015).
- (17) 富士通：光ファイバー超多点温度センシング技術を活用した火力発電所の設備異常検知システムの実証実験を実施.
<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2015/11/12.html>



宇野和史 (うの かずし)

富士通 (株)
デジタルソリューション事業本部
IoTおよびAIの利活用と製品開発に従事。



笠嶋丈夫 (かさじま たけお)

(株) 富士通研究所
応用研究センター
光ファイバー関連技術および計測制御技術の研究に従事。



有岡孝祐 (ありおか たかひろ)

(株) 富士通研究所
応用研究センター
光ファイバー関連技術および計測制御技術の研究に従事。

著者紹介



齋藤賢二 (さいとう けんじ)

富士通 (株)
デジタルソリューション事業本部
IoTおよびAIの利活用と製品開発に従事。