

リアルタイム超多点温度測定技術

Super-Multipoint Temperature Measurement Technology

あらまし

ITインフラの高速大容量化とサーバなどIT機器の著しい増加に従い、データセンタで消費されるエネルギーは飛躍的に増大しつつある。データセンタのエネルギー消費において空調が占める割合は約40%程度と多く、地球温暖化防止を背景にデータセンタにおける空調エネルギーの削減が大きな課題となっている。データセンタの省エネに向けた綿密な温度環境の測定を実現するため、著者らは、光ファイバのラマン散乱光測定に基づく温度測定原理を採用した温度分布測定装置において、その出力信号処理を独自のアルゴリズムで補正することにより、従来比2倍以上の空間分解能に高める補正技術を確立した。また、サーバラックへの光ファイバ敷設を高速かつ確実にを行うことができる敷設技術を開発した。これらの技術により、データセンタ内の温度分布を正確かつ綿密に行うことが可能となり、空調の適正化による省エネ効果が期待される。

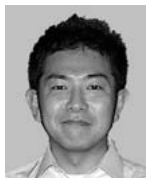
Abstract

Energy consumption in data centers has recently increased remarkably. For energy-efficient data centers, optimization of server room cooling is becoming very important because about 40% of the total energy is consumed by this air conditioning equipment. We have developed super-multipoint temperature measurement technology based on optical time-domain reflectometry of optical fibers to obtain accurate and detailed temperature distributions of data center server rooms. A special signal correction algorithm has been developed to enhance the spatial resolution to up to twice that of conventional equipment. We have also developed technology for laying out optical fiber as a sensor for obtaining accurate and efficient temperature distributions.



武井文雄 (たけい ふみお)

基盤技術研究所 所属
現在、エネルギー利用技術および機能性ポリマー材料の研究開発に従事。



宇野和史 (うの かずし)

基盤技術研究所環境技術研究所 所属
現在、エネルギー利用技術の研究開発に従事。



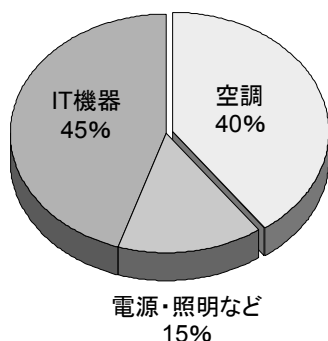
笠嶋丈夫 (かさじま たけお)

基盤技術研究所環境技術研究所 所属
現在、エネルギー利用技術の研究開発に従事。

ま え が き

近年、インターネットインフラの普及やサーバをはじめコンピュータの高性能化により、IT社会を支えるITシステムは目覚しく発展している。これに伴い、データセンタの面積とそこで稼働するサーバの台数も飛躍的な伸びを示しており、データセンタにおける電力消費は著しく増大している。データセンタにおける電力消費量は2006年には世界の電力消費量の約1%を占め、このままでは2025年には2006年比5～9倍に激増すると推定されている⁽¹⁾⁽²⁾。このため、データセンタにおける省エネ化は地球温暖化問題およびエネルギー資源の保全の観点から、極めて大きな環境課題になっている。

一般的に、データセンタには数十から数千台に上る多数のサーバが設置されており、稼働中のサーバからは少なくない量の排熱が発生する。これを冷却し室内の温度を規定値以下に保つため大型のエアコンによる空調は不可欠であり、空調に要する電力はデータセンタ内で消費される電力の約40%にも上っている(図-1)。このことから、データセンタにおける空調用エネルギーの削減は省エネデータセンタの実現に必要不可欠である。富士通では、環境配慮型データセンタの構築を支援する「グリーン・インフラ・ソリューション (GIS)」を適用することで、空調をはじめとするファシリティの省エネ性能の向上を図っている。本稿では、GISにおける次世代温度計測技術である光ファイバによる温度技術について述べる。



※2006年度富士通実績値

図-1 データセンタにおけるエネルギー消費比率
Fig.1-Energy consumption ratio in data centers.

空調の省エネに向けて

空調の省エネには、高効率なエアコンの導入に加え、冷却の現場における適正な冷却が必要である。すなわち、サーバの過熱を防ぐため、一般的にサーバールームの室温制御目標値は低めに設定されており、過剰な冷却によるエネルギーロスが発生していると言われている⁽³⁾。また、本来冷風が供給されるべき箇所(サーバの吸気面)に、排熱で暖められた空気が何らかの原因で回り込み、冷風の温度が上がることによる冷却効率のダウンも懸念されている。

よって、空調の最適化による省エネのためには、サーバ近傍での正確で綿密な温度分布の把握が必要である。従来から、温度測定には熱電対やサーミスタ、白金抵抗測温体などのディスクリート型の温度センサが用いられてきた。最近では、温度センサと通信機能をワンチップに集約したIC型温度センサも実用化され、様々な場面での温度測定に使用されている。著者らは、信号線敷設や計測時間短縮、コストなどの面で従来の温度センサでは困難な、数百から数千台のサーバに対する温度測定手法を実現すべく、以下に述べる光ファイバを利用した温度計測手法をベースに技術開発を進めた。

光ファイバによる温度測定

光ファイバは、現代の高速・大容量通信の実現においてなくてはならない存在である。この光ファイバに、近赤外光領域のレーザ光を入射した場合、光ファイバを構成する石英ガラスの物質状態に起因する各種の散乱光が発生する。散乱の種類には、同一の波長で散乱するレイリー散乱、20 nm程度の波長シフトを伴うブリリュアン散乱、そして50 nm程度の波長シフトによるラマン散乱が知られている。このうち、ラマン散乱光は、光ファイバの温度変化に敏感なアンチストークス光(入射光-50 nm)と、温度感受性の低いストークス光(入射光+50 nm)から構成されているため、この比率を測定することで光ファイバの長さ方向の温度分布測定が可能である⁽³⁾⁻⁽⁸⁾。

実際は、光ファイバに数nsの短いパルス状のレーザ光(励起光)を入射し、それが伝達しながら光ファイバの各所で発生するラマン散乱光の後方散乱強度を1 ns単位の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各所の温度に対応し、距離は光ファイバ中を伝達する光の速度（約 2×10^8 m/s）にラマン光の遅延伝達時間をかけることで求まる（図-2）。例えば10 kmの光ファイバに対し、励起光は50 μ s程度で反対側まで到達するため、わずか100 μ s後には10 kmの光ファイバ全体の温度情報が得られる。また、石英を母材とする一般の通信用光ファイバは、耐熱性にも優れており、保護用被覆の種類にもよるが、一般的には200°C以上の高温に対しても測定可能である。さらに、ここで用いられる光ファイバの種類としては、1 Gbpsクラスの普及帯のマルチモード光ファイバで十分であるため、コスト的にも有利である。

この方式を用いて、自動車や地下鉄のトンネル内の火災検知や、送電線あるいは化学プラントの温度異常度監視、石油採掘や地質調査などにおけるボーリング孔中の温度分布測定などに応用されている⁽⁹⁾⁻⁽¹⁴⁾

しかし、これらの用途では光ファイバの長さ方向に沿っての空間分解能は数m程度で十分であり、このままでは極めて複雑な温度分布をとるデータセンタ内の効率的な温度分布測定には不向きであった。このため著者らは、空間分解能の向上をはじめ、光ファイバ方式の温度センシングをデータセンタに適用可能とするため、次章で述べる技術開発を総合的

に行った。

データセンタへの適用に向けた開発

● 高分解能化

光ファイバ中を進む励起光のパルス長は約2 m程度であり、通常、この長さ以下の温度情報を求めることは困難である。そこで著者らは、光ファイバに種々の温度プロファイルを与え、これによって出力される温度応答を詳細に調査することで、空間分解能の向上を試みた。

(1) 補正手法の開発

励起光パルスに基づくラマン散乱光は装置内の光検出器に入り、その信号の積算値から温度を検出する。このため、測定対象の光ファイバに励起光のパルス幅に相当する長さに均一に熱を加えないと正確な温度計測はできない。この正確な温度計測に必要な光ファイバの長さを最小加熱長と呼ぶ。

光ファイバの一部をステップ状に加熱した場合、すなわちある長さの部分のみを均一に加熱した場合、得られる計測温度の長さ方向の分布は緩やかな凸状のいわゆる正規分布的な曲線を描く。加熱部の長さが最小加熱長よりも短い場合は、計測温度分布データのピーク値は実際の温度よりも低くなり、測定誤差が生じる。

しかし、この最小加熱長以下で種々のステップ状

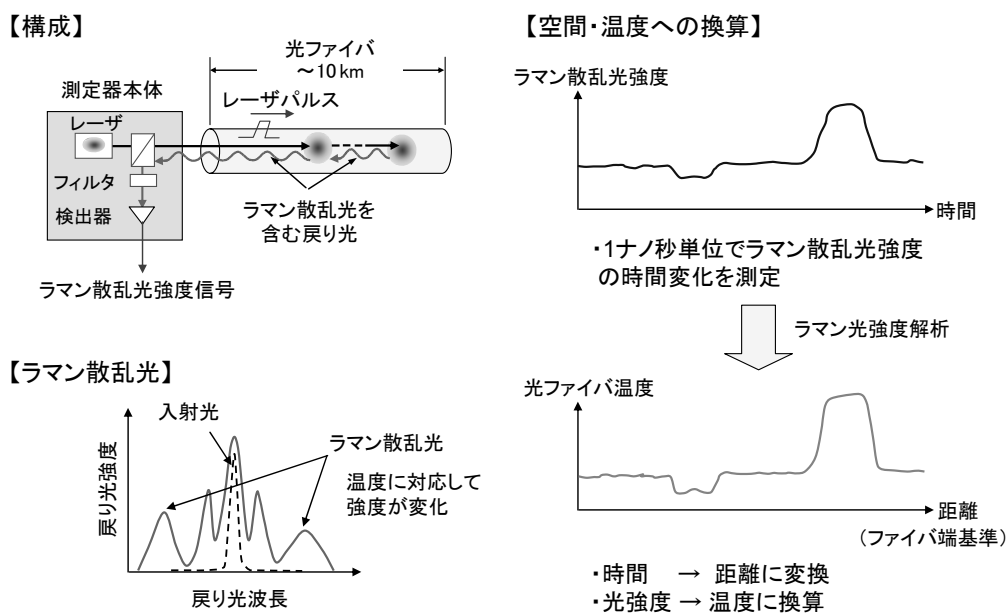


図-2 ラマン散乱光による温度測定

Fig.2-Temperature measurement principle by optical fiber.

温度を光ファイバに与え、それらの条件で得られる応答を正確に測定することで、光ファイバの温度分布に対する伝達関数が求まる。光ファイバの種類によって伝達関数は若干異なるが、実際に使用する光ファイバで伝達関数を一度決定しておけば、得られた計測温度分布データをこの伝達関数でデコンボリューション（逆畳み込み）することで、元の温度プロフィールを再現することができる。

(2) 温度基準点の導入

多くのデータセンタでは、冷却は床下の空間（フリーアクセスフロア）からの吹上げ方式を採用する場合が多い。そこで、サーバラックの底部近傍など、相対的にサーバラックのサーバ実装部よりも温度が低く安定な部分に基準温度を測る光ファイバ部を設置し、これを基準にしてサーバラック内での複雑な温度分布の測定を可能とした。すなわち、サーバラック内で想定される温度変化に対応した高次多項式を設定し、先の温度伝達関数と、上記の基準温度部分の温度情報から多次元の偏微分方程式を近似的に解き、より高精度な温度変化データの再現が可能なアルゴリズムを開発した。前項の技術と併せた高精度化の概念を図-3に示す。

これにより、光ファイバの長さで1 m以下の温度変化にも追従可能になり、従来に比べ2倍以上効率的に光ファイバを活用することができるようになった。

温度精度は積算回数とトレードオフの関係にあるが、現状、30秒の積算で $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の精度を実現しており、空調のモニタおよび制御には十分な応答と精

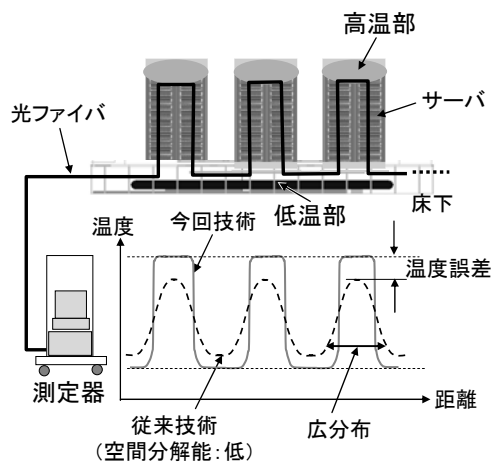


図-3 信号補正の概念図

Fig.3-Schematic diagram of signal correction.

度をクリアしている。

● 光ファイバの最適化検討

本測定技術で用いる光ファイバとしては、先にも述べたとおり、比較的安価なマルチモードのグレーデッドインデックス型の光ファイバを適用できる。しかし、その外装形態には若干の制限がある。

一般的なデータセンタやオフィスで目にする多くのデータ通信用の光ファイバは、光ファイバコードあるいは光ファイバケーブルと呼ばれ、光ファイバ自身に機械的強度を増すためアラミド系繊維による補強材や厚い被覆材などで覆われている。このため、光ファイバのコア部まで熱が伝達するのに長い時間がかかり、時間応答性が低下すると予想された。

すなわち、光ファイバの伝熱速度はその太さに大きく依存するため、熱流体シミュレーションによって適切な光ファイバの太さを割り出した。その結果、 10°C のステップ応答に対して10秒程度の時間応答を実現するためには、直径1 mm以下の光ファイバを用いることが必要であることが導かれた。これに適合するのは、光ファイバ心線 ($\phi 0.9 \text{ mm}$) あるいは光ファイバ素線 ($\phi 0.25 \text{ mm}$) である。

また、光ファイバ被覆の材質としては、ナイロンや紫外線硬化型樹脂、ポリエステル系エラストマーなどの材料が用いられる。これらはそれぞれ、弾性や可とう性など力学的特性が異なり、設置する対象のサイズや形状に合わせて使い分ける。

● 敷設技術

光ファイバを効率的にしかも確実に敷設するため、各種設置用ツール類を特別に開発した。とくに、サーバラックのドアのメッシュに合わせて汎用的に用いることのできる光ファイバ保持具は、光ファイバの固定を確実に、かつ高速・容易に行うことを可能とする。

また、複数のサーバに対して、設置の現場で大きなリールから光ファイバを繰り出して敷設するのは効率が悪い。このため、あらかじめ所定長さの光ファイバを巻回・収納したプリロールカセットを工場で作成しておき、これを現場で適宜引き出しながら敷設することで、効率良く光ファイバの敷設が可能となった。

サーバラックへの光ファイバ敷設の様子を図-4に示す。

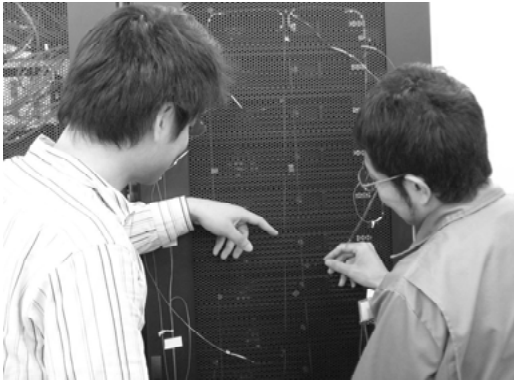


図-4 サーバラックへの光ファイバ敷設の様子
Fig.4-Installation of optical fibers for server rack.

む す び

データセンタの空調エネルギーの削減に向け、温度の正確・精密な見える化を実現可能にする光ファイバによる超多点温度測定技術を開発した。今後、本手法による温度データの測定に基づき、空調の最適化を自動で行う、いわゆるダイナミック空調制御手法へ発展させていく予定である。

参 考 文 献

- (1) U. S. Environmental Protection Agency : Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency Public Law 109-431. 2007.
http://www.energystar.gov/ia/partners/prod_development/downloads/EPA_Datacenter_Report_Congress_Final1.pdf
- (2) 経済産業省：グリーンITイニシアティブの推進。平成20年10月。
http://www.csaj.jp/seminar/2008/081006_meti.pdf
- (3) 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).
- (4) P. C. Wait et al. : A theoretical comparison of spontaneous Raman and Brillouin based fibre optic distributed temperature sensors . *Optics Communications*, Vol.144, Issues 1-3, p.17-23 (1997).
- (5) K. Hotate : Fiber Sensor Technology Today. *Optical Fiber Technology*, Vol.3, Issue 4, p.356-402 (1997).
- (6) 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).
- (7) 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) . *Sensors and Actuators A : Physical*, Vol.101, Issue 1-2, p.132-136 (2002).
- (8) 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).
- (9) M. J. Willett et al. : The use of a distributed optical fibre 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. : Fibre 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 fibres for utility tunnels . *Fire Safety Journal*, Vol.29, No.2-3, p.87-98 (1997).
- (12) G. Brambilla et al. : Optical fibre sensors for earth sciences : from basic concepts to optimising 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).