

特定非営利活動法人・光防災センシング振興協会の 取り組み：標準化・啓発・開発

村山英晶*

* 東京大学 大学院工学系研究科 システム創成学専攻
東京都文京区本郷 7-3-1
* Department of Systems Innovation, School of Engineering, The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan
* E-mail: murayama@sys.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード：防災 (disaster prevention), 維持管理 (maintenance), 光ファイバセンサ (optical fiber sensor), 標準化 (standardization).
JL 0003/12/5103-0293 ©2012 SICE

1. はじめに

自然災害は多くの人命を奪うばかりでなく、社会に大きな経済的損失を与える。経済活動がグローバル化した現在、被害は一国の問題にとどまらず、世界的な問題へと発展し、大きな混乱を生じさせることがある。昨年（2011年）は、東日本大震災、タイの洪水を目の当たりにし、このことを現実の問題、将来の問題として捉え、備えの重要性を強く認識した読者も多いことと思う。

古来、わが国は自然災害、特に二大災害と言われる風水害と地震に苦しめられてきた。ゆえに、時代やリーダーによって程度の差こそあれ、家族単位、団体、企業、自治体、国といったそれぞれの枠組みで、自然災害に対してハード・ソフトの両面からさまざまな取り組みをしてきたはずである。しかし、東北を中心とする太平洋沿岸域に壊滅的な被害を与えた大震災は、これまでの備えが十分であったのか、またそれが想定通りに機能したのか、これから検証を進めていかなければならない。

自然災害のように、頻度は高くないが被害が大ききリスクに対しては、そのリスクを移転する、という対策が取られることが多い。すなわち保険である。人口と社会資本が集中する大都市での自然災害が保険業界に与える影響は大きい。そのため自然災害によるリスクを総合的に分析するため、ミュンヘン再保険は大都市の自然災害リスク指数を作成している¹⁾。東京・横浜はリスクの最も高い都市としてランクされ、指数は710となっている。リスク指数は、危険 (Hazard)、脆弱性 (Vulnerability)、そしてリスクにさらされる資産価値 (Exposed values) の3つの指数を掛け合わせたものであり、東京・横浜はそれぞれ10.0、7.1、10.0となっている。サンフランシスコ (167) ロサンゼルス (100) に続き、大阪・神戸・京都 (92) が4番目にランクされている。このような情報が日本の投資や取引に影響を与える可能性は否定できない。したがって、自然災害リスク指数を下げるため、日本の社会は自然災害に対する備えを都市の機能としてもたなければならぬ。

自然災害は、それまで構築してきた社会インフラを一瞬にして崩してしまう一方で、老朽化は長い時間をかけて徐々

に機能不全に陥れてしまう。わが国では、重要な橋梁の多くが1960年代から70年代の高度経済成長期に架けられ、今後、建設から50年を超える橋の数が急激に増加することになる²⁾。日本に先立ち、1980年代に多くの橋梁の年齢が50歳を迎えたアメリカでは、十分な維持管理が行われなかったことが理由で、崩落、損傷、通行止めがあいついだ³⁾。橋梁だけでなく、上下水道、ガス管等のライフライン、道路、鉄道、港湾、堤防、ダム、プラントといった社会の基盤となる設備についても、今後より効率的かつ効果的な老朽化対策、維持管理が必要となるだろう。

特定非営利活動法人光防災センシング振興協会（以下協会）は、以上のような背景のもと、光ファイバセンシングを基盤技術として、自然災害に対する脆弱性の改善、そして社会インフラの維持管理に資するシステムの実現に関わる事業を実施・支援することをおもな目的として2009年2月に設立された⁴⁾。おもな事業は、資格・認定・標準化事業委員会、啓発・普及事業委員会、プロジェクト事業委員会、コンサルティング事業委員会からなる4つの委員会によって取り組まれており、31社（2011年12月現在）の会員企業が中心となって各委員会やその他の活動を支えている。

著者は協会の理事として、プロジェクト事業委員会を受け持っている。このプロジェクト事業委員会では、基本的に省庁、自治体、企業などからの委託を受け、それぞれの案件で複数の企業が連携してプロジェクトを立ち上げ、光ファイバセンサを活用した防災や構造物の維持管理システムの研究・開発に取り組んでいる。現在、鉄道や都市の災害情報システム、橋梁の構造モニタリングなどについてプロジェクトなどを実施している。これらのプロジェクトを進めていく経験から、光ファイバセンシングの今後のさらなる発展のためには、協会、またより広くこの技術に関わる研究・開発者が、つぎの課題にこれまで以上の努力を払う必要があると感じている。

- ①標準化によるユーザーの利便性の向上および大幅な低コスト化
- ②開発者の基盤知識・情報の共有化、技術者育成支援、ユーザーと開発者のコミュニケーションの向上
- ③光ファイバセンサのシステム化と得られた情報の有効活用

本稿では、①に対応して標準化について、②、③に対応してそれぞれ啓発、開発という観点で協会の現在、将来の取り組みについて以下に述べることとする。

2. 標準化

標準化とは何か、どのような場所、プロセスで誰が作るものなのか、などの一般的な話題については、現在多くの書籍が手に入るのので、ここではそれらの話題にはあまり立ち入らない。光ファイバセンサ、あるいはそれらから構成されるシステムを使いやすくまた購入しやすくするための標準化について考えてみたい。

光ファイバセンシングあるいは光ファイバセンサで何を標準化するべきか、「基本規格」、「製品規格」、「試験方法規格」、「プロセス規格」の4つの面から以下に述べていく⁵⁾。なお、本稿では標準と規格は同義の用語として使っている。

2.1 基本規格

基本規格として、研究者・技術者間、あるいは製造者とユーザー間での正確なコミュニケーションを実現するために、用語、単位の統一が図られなければならない。光ファイバセンサの研究・開発は、すでに40年以上に渡って行われているが、多点・分布計測といった優れた特徴をもつ fiber Bragg grating (FBG) や Brillouin 散乱光を利用したセンサについては、約20年前に発明・発見された技術・現象に基づいており、新しい計測原理や性能向上技術が現在も活発に報告されている。この間、多くの用語が生まれ、淘汰されてきた。現状、センサと言えば一般的には電磁気的な原理で作動するセンサを指すため、それらのセンサとは異なる性能・特性を有する光ファイバセンサでは、性能や手法に関して独特の用語が用いられることがある。しかし、光ファイバセンサに関する JIS 規格がないことはもちろん、それらの用語が定義・解説された日本語のテキストがないというのが現状であろう。

光ファイバセンサの特長として、広い範囲で効率的に計測点を多点化することがよく挙げられる。多点計測、準分布計測、分布計測などという用語について、研究者の間でも使い方に差異を感じる。1本の光ファイバに特に決まった計測点はなく、ファイバに沿った任意の計測点にアクセスできる場合を分布計測、FBGのように計測点が固定されていれば、多数のFBGが隙間なく連続に配列されて分布計測同様の出力が得られても、それは準分布計測あるいは多点計測であって、あくまで“分布的な”計測をしている、というのが著者の理解である。また分布計測において、空間分解能、読取分解能、応答距離などという用語が使われる。それぞれの用語に対して、人によって同じことを異なる言葉で説明されても、ユーザーの理解は深まるどころか、混乱することになるだろう。厳密な用語の定義は、ある技術についての正確な説明を簡略・迅速にすることができる。

協会では、本年(2012年)に「光ファイバセンサ入門」

を出版する予定である。執筆に当たって、会員各社からベテランの専門家が集い、いくつかの用語については1つ1つコンセンサスをとって取捨選択、定義されている。将来の用語など基本規格作成の参考・基本になれば幸いである。

2.2 製品規格

標準化の目的は、粗悪品の排除という面もあるが、よりポジティブに利便性の追求ととらえることができる⁶⁾。さらに、高性能のセンサを開発しスタンドアロンで使われることを目指すより、性能をなるべく維持したまま、他のセンサと組み合わせるパッケージ化を容易にすることで、より利用価値を高めたり、センサシステムをモジュール化し、部品の互換性を高めて低コスト化や汎用性の向上を実現したりすることで、巨大システムを開発するインテグレーターとの連携が生まれやすくなり、より大きなビジネスチャンスに導かれる可能性もあるだろう⁷⁾。

また寡占化を目的として、排他的標準により技術を普及させるか、あるいは部品の共通化などで普及しやすくする非排他的標準が考えられるが、協会のような業界団体が推進するのは後者である。標準化主導戦略として、他の製品と接続したり、組み合わせたりして使うための部品(各種インタフェース)や、附属品・消耗品などを標準化することができる。

業界でコンセンサスを得て標準化することは一般的に時間がかかる。光ファイバセンサの普及のためには、標準の効果、信頼性、作りやすさを勘案して、差別化部分を切り分けて早急に設定可能な部位を選定することが必要であろう。図1に光ファイバセンサの一般的なシステム構成を示す。ここでは6つの構成部品に分けて、各部の標準化の可能性および効果などについて私見を述べる。

センサ部は、光ファイバ自身を直接対象物に固定して計測する場合やセンサの設置の作業性や性能(安定性や信頼性)の向上を目的としてモジュール化したもの、センサ内の伝搬光の特性を計測量によって変化させる変換器を利用したものなど、さまざまな形態を取りうる。いずれの場合

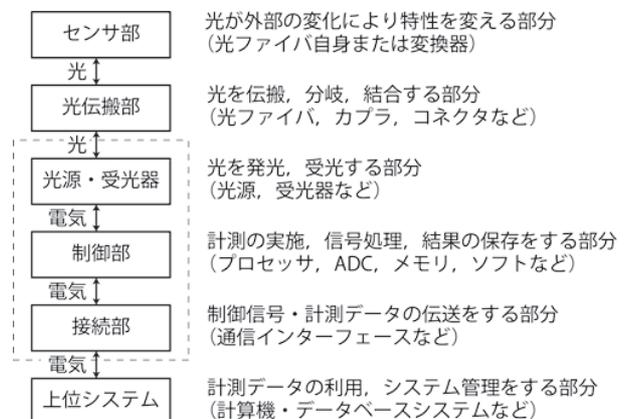


図1 光ファイバセンサの一般的なシステム構成

も、動作原理、品質など、製品として企業の知的財産やノウハウが詰め込まれた部分であり、製品規格として標準化できるものは限られるだろう。ただし、適用対象によって形状やサイズ、材料について標準化することは可能である。土木構造物のひずみの分布的な計測にロングゲージ化したセンサが利用されているが³⁶⁾、ゲージ長の長さを規格化することができる。また災害情報システム用に雨量計や水位計などが変換器を用いた形態で開発されているが、締結部分の部品を規格化することが可能である。締結部のようなインタフェース部は、一般的に時間をかけずにコンセンサスを得ることができ、さまざまなニーズに対応できる汎用的な解があれば普及の際の効果は高い。このような製品規格はシステムの設計者や施工者の利便性を高めることができるだろう。また、後に述べるように検定や認証のために、センサ部に対する試験方法規格、プロセス規格の面から標準化を進めることが重要である。

光伝送部は光源からの光をセンサ部に、そして受光器に伝搬するための経路を形成する部分である。その経路と接続部でそれぞれ光ファイバケーブルやコネクタなどが利用される。また、反射光を観測したり、センサをネットワーク化したりするためにはカプラなどの分岐・結合器が使用される。これらの部品は通信分野ですでに標準化が進められている部分で、特殊な環境下・用途で使用する以外でセンサ用途に新たに開発する必要はない。遠隔化・多点化したセンサネットワークの信頼性を高めるには、標準化された部品の仕様情報からの設計手法や現場における診断手法についてのガイドラインをまとめることが重要であろう。

図1で点線に囲まれた光源・受光器、制御部、接続部は、計測器として製品化されるのが一般的である。上述したように、普及の際に標準化の効果を活かしやすい場所として上位システムと制御部のインタフェースとなる接続部(通信部)が挙げられる。ここで上位システムとは、計測データを解析して有意な情報をユーザーに提示する部分であるといえる。光ファイバセンサの開発事例の多くは、上位システムとそれ以外の部分を特に切り分けず、あるいはそれぞれを解析システムと計測システムとして、1社あるいは強いパートナー関係にある会社と連携して2社程度で開発している。ユーザーから見れば、コスト・利便性の観点から、図1においてモジュール単位で分けられた部分のできるだけ多くを既存のものを再利用し、これまで以上の性能を実現することが望ましい。たとえば、いくつかのセンサから構成されるシステムなどでは、特定のセンサのみを互換性のある光ファイバセンサに置き換えて上位システムに組み込む形であれば、導入の障壁を大幅に下げることができるだろう。この場合、センサ部に電源が不要、遠隔化・多点化といった特長を活かすことで信頼性や性能向上が期待できるが、接続部における通信インタフェースや制御部における信号・計測データ形式などが互換性を確保できるように

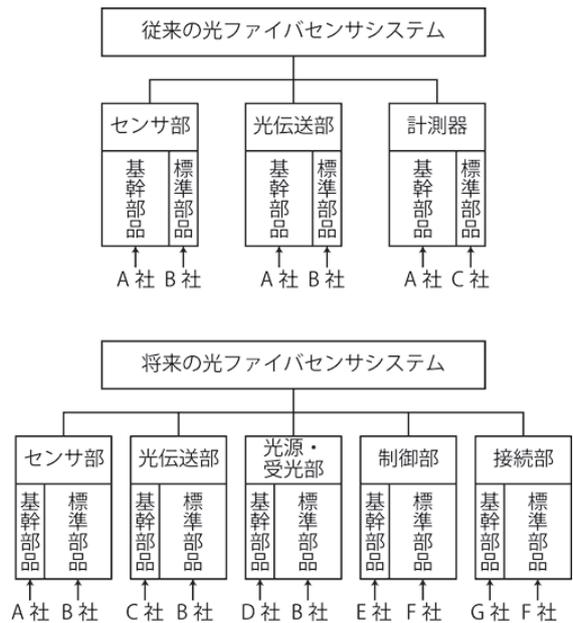


図2 光ファイバセンサの製品規格による標準化

標準化されていることが必要となるだろう。さらに、これまで光源・受光部、制御部、接続部が1つの製品としてまとめられていたものを、それぞれを互換性のあるモジュールとして開発することができれば、1社による総合的・垂直統合的な開発ではなく、得意分野の開発に選択と集中ができるようになる。賢明なユーザーは、光ファイバセンサの本質的な進化を望むわけなので、小規模な資本の会社でも参入しやすい環境を業界自身が作り上げ、競争的な市場を形成することは、結果的に良いことだといえる。

図1に示した構成要素は6つあるが、光ファイバセンサシステムは上位システムを除く5つから構成されるとし、計測器として3つをまとめれば、センサシステムの構成要素は3つとなってしまふ。標準化を進めて利便性を向上させ、低コスト化を実現するということは、より多くのモジュール化した構成要素でセンサシステムを構成し、それぞれの構成要素で性能に大きく影響する部分を基幹部品として差別化を目指して開発し、それ以外の部分はなるべく多くの標準部品を用いて互換性を高める、という戦略を描くことであると考えられる(図2)。

2.3 試験方法規格

実用化が進み始めると、製品やシステムに関する情報交換が重要になる。情報交換のためには、製品を正確に比較する信頼性の高い試験方法が準備されている必要がある。ユーザー自身あるいは委託された組織がその試験方法を用いてさまざまな製品を比較して選定の参考とすることのほかに、開発者が自らの技術の仕様に第三者的な証明、お墨付けを与えること、あるいはつぎの技術開発のための情報として利用することができる。

従来センサとほぼ同様の変換器を用いている場合や基本

的なセンサ性能については、すでに準備されている試験方法規格や検定を利用することが可能であるが、センサの形状や形態が特殊な場合、新たに規格を作る必要がある。

たとえば、上述した分布計測における空間分解能については、一義的に用語を定義し、それに対する標準的な試験・評価方法を検討する必要がある。近年、ひずみや温度を分布計測できる分布型光ファイバセンサの分解能は、ミリオーダーあるいはサブミリオーダーまで向上しているため^{9), 10)}、正確な評価のために試験方法自体を研究しなければならないと考える。著者らが開発した Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) を用いて FBG 内のひずみ分布をサブミリオーダーで計測できる技術の空間分解能は、現時点では光学系をモデル化したシミュレーションを用いて決定している¹¹⁾。実験において、決められた機械的なひずみ分布を局所的な範囲で正確に再現することは技術的に困難なためである。

また、FBG センサや Brillouin 散乱光を用いたひずみセンサでは、温度や固定部のクリープなどを補償することができれば、絶対ひずみから経年的な変化を捉えることが可能となる。温度補償については、さまざまな手法が提案されているが、センサの確度は一定温度（おもに室温）での評価が一般的で、温度が変動する場合の確度を保障している製品はほとんど見当たらない。

しかし、構造ヘルスマニタリングシステムを開発する場合、損傷に対するセンサの検出能力を評価することが必要であり、空間分解能や温度補償後の確度に関する試験方法規格が確立されていることが重要となるだろう。

2.4 プロセス規格

プロセス規格は、製品製造のための方法や品質管理などのプロセスを標準化することである。プロセスの標準化は、製品やシステムの信頼性を向上させ、センサ敷設や技術者教育のコストダウンにつながる。

著者は、10年以上前に複合材料で製造された競技用ヨットに分布型光ファイバセンサを接着により固定し、ヨット構造のひずみ分布を計測した¹²⁾。接着した光ファイバは約 100 m にもおよんだが、当時は参考になる前例がなかったため、ヨット開発者らと事前にさまざまな方法についての議論・実験を経て、最終的には職人的な技量に頼ってセンサ敷設を成功させることができた。現状でも、分布型光ファイバセンサの敷設については、少数の企業が経験に基づいた優れた技術を保有している状態であるといえる。

つまり、敷設手法はセンサの精度や安定性に重大な影響を与えるため、差別化の要素となっているが、普及を進めるためには、特殊な計測対象や環境下での敷設を除いて、標準化をする意義が大きいプロセスだといえる。技術者の育成、そのためのガイドライン・教習も重要である。

2.5 海外動向と国内の対応

標準は適用範囲が広い順から、国際標準、地域標準、国家

標準、業界標準、企業標準という階層に分けられる¹³⁾。それぞれの階層で光ファイバセンサについての標準化について現状と将来について述べる。

国際標準化機関である ISO（国際標準化機構）、IEC（国際電気標準会議）、ITU（国際電気通信連合）などで制定されるものが国際標準と呼ばれるものである。企業の市場競争の結果として 1 つの標準に決まったものをデファクト標準というのに対して、公的な機関・組織で作らせたものをデジュール標準と呼び、上に挙げた機関で作られるものはデジュール国際標準である¹⁴⁾。光ファイバ通信の分野では IEC の TC86 において多くの標準が開発されている。共通の部品を多く利用する光ファイバセンサでもこれらの標準の利用価値は高いといえる。一方、光ファイバセンサの関係では、同じく IEC の TC86 から共通仕様書として IEC 61757-1（1998-11）が発行されているのみである。ここには、用語の定義や試験方法について記載されているが、不完全な部分が多く、さまざまな原理や手法を網羅していない状況である。2011 年にメルボルンで開催された総会において、光ファイバセンサに関する標準化作業を促進させることが決定され、今後、既存の IEC 61757-1 を更新し、新たにひずみと温度の単点計測、分布計測に関する標準を開発するということである¹⁵⁾。国際標準がグローバルなビジネスに影響を及ぼすことはもちろん、WTO（世界貿易機関）において TBT 協定（貿易の技術的障害に関する協定）や政府調達協定が発効されて以来、政府調達する工業製品は国際標準規格に該当する製品であることが求められているため、政府や JR 各社などの企業に大規模な製品の導入を図る場合は、国際的な攻撃を受けないよう、事前の対策が必要になっている。国際標準化機関における動向は業界でフォローしなければならない課題である。

地域標準で大きな勢力をもっているのは欧州であり、国際標準と合わせて戦略的に利用している。COST 299 の WG4 のなかで、EU の専門家らが集まって光ファイバセンサのガイドラインについて検討されている^{16), 17)}。

国家標準とは日本では JIS がそれにあたる。光ファイバセンサの国家標準に関しては、ドイツが光ひずみセンサ、すなわち FBG を用いたひずみセンサについて、VDI/VDE 2660 としてガイドラインを 2010 年に公開している¹⁸⁾。FBG の光ひずみセンサに関して、技術解説やキャリアレーション方法が詳細に記載されており、利用価値は高いと思われる。このガイドラインに沿ってキャリアレーションしている、という製品には一定の信頼がおかれるものと考えられる。適用範囲や期待が大きいため、まずは FBG のひずみセンサから作られたものと推察するが、他のセンサについても今後続々と公開される可能性がある。

以上のように、光ファイバセンサに関する標準化の開発は、標準化ビジネスが最も進んでいる欧州が中心となって進められている。これに対して、光ファイバセンサに関わ

るさまざまな企業が参画している協会では、標準化を重要な事業として位置付け、現在検討を行っている。先行している欧州にならい、各種原理のセンサについてのガイドライン（基本規格、試験方法規格、プロセス規格）を作り、講習会などによる技術者の育成支援が最も早い段階で可能な事業であろう。しかし、低コスト化による技術の普及に対してより大きな効果をもたらすことが期待される製品規格を構築して、国際的な標準化をリードしていくことがより重要であると考えられる。協会の役割は、優れた企業標準を組み合わせるなどして、業界標準の作成につなげていくことであろう。

3. 啓発

光ファイバセンサは、優れた性能や特徴をもつものの、システムの構成要素として位置付けられなければ、その用途や普及は進まない。したがって、さまざまなシステムの設計・運用に関わる技術者や経営者に光ファイバセンサについての理解を広げていく必要がある。逆にそれらのシステムに存在する課題やニーズを光ファイバセンサの開発者は発見し、光ファイバセンサを用いた解決方法を提案・開発していかなければならない。

前者の目的のため、上述したように協会では光ファイバセンサに関する入門書を準備している。またおもに後者の目的のために毎年シンポジウムや講演会を開催している。シンポジウムにおけるこれまでのおもな講演を表1に示す。これまで応用のフィールドとして、社会基盤インフラ、農業、鉄道、水ビジネスなどが取り上げられ、また光ファイバセンサの要素技術とシステム化についての講演があった。

また、今後は先に述べたガイドラインなどを利用した講習会による技術者育成の支援も事業化することを予定している。

表1 シンポジウムにおける講演リスト

第1回 (2009)	国土交通技術政策と光 防災センシング	芦田義則氏 国土技術研究センター
	光ファイバセンサによる 構造ヘルスマニタリング 最新動向	呉智深氏 茨城大学
	農業分野のセンサネット ワーク、ICTによる農 の産業化	亀岡孝治氏 三重大学
第2回 (2010)	要素技術とシステムは 日本を救う	吉川弘之氏 科学技術振興機構
	痛みの分かる材料・構 造の為の光ファイバ網	保立和夫氏 東京大学
	鉄道における災害情報 システムのこれまでとこ れから	島村誠氏 東日本旅客鉄道
第3回 (2011)	国際的視点から見た水 の管理と危機管理	山田正氏 中央大学
		湧川勝巳氏 国土技術研究センター
		土屋信行氏 えどがわ環境財団

4. 開発

第2章の標準化において、垂直統合型ではなく水平分業型の開発によって、光ファイバセンサの利便性の向上や低コスト化に対する効果が生まれる可能性について述べ、その方策について示した。互換性の高い部品群であれば、組み合わせによってユーザーのニーズに合わせた光ファイバセンサシステムを構築できる自由度も得られる。構築するセンサシステムの規模が大きければ、これらの効果はさらに増大する。つまり、光ファイバセンサの利便性向上と低コスト化は、それらを組み合わせた大規模なセンサシステムの開発・普及と同時に進められることが望ましい。

複数の光ファイバセンサを統合した大規模なセンサシステムは、光ファイバという高度に標準化された共通の光伝送部をもとにして、計測器やセンサ部のさまざまな組合せによって実現できる。たとえば、光伝送部として都市域や鉄道、下水道、河川などに整備されている光ファイバ通信網を利用すれば、広域の災害情報システムの構築における初期投資を大幅に抑えることができる。また、センサシステムが複数の機能を持つことによって、災害時だけではなく、社会インフラの運用や維持管理に利用することができれば、ランニングコストも低減させることができるだろう。

協会では、鉄道や都市の災害情報システム、橋梁の構造ヘルスマニタリングなどを目的として、このような大規模で多機能なセンサシステムの研究開発を協会会員企業が中心となって実施している。たとえば都市における水害防止のためには、広範囲の雨量、河川・下水道の水位・流量などを把握する必要があり、そのため広域にネットワーク化され、多機能化された光ファイバセンサシステムの情報を活かすことができる。しかし、各企業がもつ技術が優れていたとしても、それらを組み合わせて多機能化しただけのモニタリングシステムを構築しただけでは、大きなメリットが生まれにくい。物理的なモデルや高度な信号処理・解析技術をもとに、センサから得られる情報を加工して有意な情報にしなければならない。さらに、光ファイバセンサだけではなく、既存の災害情報網も合わせた総合的な分析に基づいた判断が必要となる。

このようなセンサシステムの実現にはさらなる研究が必要であるが、センサ・計測器・通信機器メーカー、エンジニアリング、ゼネコンなど異業種の企業が集まった協会の特色を活かし、各研究開発事業に最適な企業連合を作ってプロジェクトを実施し、適宜成果を公表している¹⁹⁾。今後は、より実証的な検証を進め、光ファイバが単なる情報伝達デバイスではなく、情報創出デバイスであることを示していきたい。

5. まとめ

光ファイバセンサに関する研究開発は現在も国内外で盛

んに行われており、今後も新しい原理を用いた光ファイバセンサ、既存の光ファイバセンサの大幅な性能向上といった成果が、ユーザーのさらなる期待を呼び起こすことであろう。技術そのものを磨き上げることが、技術革新を起こし、市場を獲得し、技術を普及させるために最も重要なことであることは間違いない。

しかし、ユーザーからよく聞かれるのは、コストに対する失望に近い不満の声である。技術革新によってコストを下げることで、それも1つの解決策ではあるが、現状の優れた技術を活かしつつ、業界が連携・協力してコストダウンに取り組むことが必要である。その活動のプラットフォームとして、光防災センシング振興協会の役割と責任は重大であると信じ、大学の研究者の立場から支援していきたい。またこの場を借りて、協会の活動に対する読者各位の支持と協力をお願いしたい。

(2012年1月10日受付)

参 考 文 献

- 1) ミュンヘン再保険会社：ナチュラル・ハザード・リスク・インデックス (2004)
- 2) 独立行政法人土木研究所：構造メンテナンス研究センター、<http://www.pwri.go.jp/caesar/index-j.html>
- 3) S. ウォルター：荒廃するアメリカ、開発問題研究所 (1982)
- 4) 特定非営利活動法人光防災センシング振興協会：<http://www.hikaribosai.com/index.php>
- 5) 藤野仁三、江藤学：標準化ビジネス、白桃書房 (2009)
- 6) 原田節男：国際ビジネス勝利の方程式、朝日新書 (2010)
- 7) 若井博雄 (編)：広がるインフラビジネス～国際標準化で巨大市場に挑む！、日本規格協会 (2011)
- 8) 呉智深、岩下健太郎：光ファイバセンサを用いた構造ヘルスマニタリング、建設の施工企画、No.711, 15/20 (2009)
- 9) K.Y. Song, Z. He and K. Hotate: Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis, *Optics Letters*, **31**–17, 2526/2528 (2006)
- 10) H. Murayama, K. Kageyama, K. Uzawa, K. Ohara and H.

Igawa: Strain monitoring of a single-lap joint with embedded fiber-optic distributed sensors, *Structural Health Monitoring* (in press)

- 11) 井川寛隆, 太田圭一, 葛西時雄, 山口功, 村山英晶, 影山和郎: OFDR を用いた長ゲージ FBG による分布計測の研究 (第1報, 光学シミュレーションモデルを用いた検討), *日本機械学会論文集 A 編*, **72**–724, 1912/1920 (2006)
- 12) H. Murayama, K. Kageyama, H. Naruse, A. Shimada and K. Uzawa: Application of fiber-optic distributed sensors to health monitoring for full-scale composite structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, **14**–1, 3/14 (2003)
- 13) 原田節男: 国際標準化戦略, 東京電気大学出版局 (2008)
- 14) 和泉章: 標準 (スタンダード) のすべて, 経済産業調査会 (2009)
- 15) <http://www.opticalfibersensors.org/news/be-en/142/detail/item/2603/>
- 16) W.R. Habel: Standards and guidelines - could they enhance user confidence in fibre sensor technology?, *Proc. of the 3rd European Workshop on Optical Fibre Sensors* (2007)
- 17) COST 299: <http://www.cost299.org/>
- 18) VDI/VDE 2660 Part 1 "Experimental stress analysis - Optical strain sensor based on fibre Bragg grating- Fundamentals, characteristics and sensor testing" (2010)
- 19) 小川雅英, 島村誠, 奥水聡, 増井洋介, 村山英晶, 田畑和文: 鉄道光防災センサの実証試験システムの構築と評価, センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム (2010)

[著 者 紹 介]

むら やま ひで あき 君
村 山 英 晶 君



2001年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了, 博士 (工学)。01年宇宙開発事業団宇宙開発特別研究員, 03年東京大学大学院工学系研究科講師, 06年同助教授, 現在システム創成学専攻准教授。専門分野は光ファイバセンシングおよび複合材料工学。