

高速 FBG センサモニタの開発

Development of High-speed FBG sensor monitor

高橋良文 Yoshifumi Takahashi, 中村賢一 Kenichi Nakamura, 齊藤崇記 Takanori Saitoh, 飯田廣幸 Hiroyuki Iida

[要 旨] 災害や重要施設の監視に用いられる各種 FBG センサの信号を検出する、掃引光源型の FBG センサモニタを開発した。MEMS 技術を用いた掃引光源を採用することにより、1.4 ms の高速掃引と 10 pm 以下の波長再現性を実現した。また、最適な温度制御を行うことにより、30 pm 以下の波長精度と、0°C から 50°C の広範囲の動作温度範囲を実現した。地滑りなどのゆっくりした挙動の監視から大型構造物の地震時の監視まで、幅広い応用が可能である。

[Summary] A FBG (Fiber Bragg Grating) sensor monitor with a swept light source has been developed for many types of FBG sensors used in observations, such as natural disasters and important facilities. High-speed scanning of more than 1.4 ms and high re-peatability of less than 10 pm are achieved by using MEMS technology. A wide usage temperature range from 0° to 50° and wavelength accuracy of better than 30 pm are also achieved by temperature control. This monitor supports many applications ranging from observation of slow landslides to monitoring large structures in earthquakes.

1 まえがき

多発する自然災害の監視、橋梁やビルなどの大型構造物のヘルスマモニタリングに光ファイバセンサが注目されている。光ファイバセンサは、電気ノイズの影響を受けない、電源が不要、落雷に強い、長距離伝送が可能など、従来の電気をベースにしたセンサに比べ多くの利点を有しており、厳しい設置環境が求められる自然災害監視や構造物ヘルスマモニタリングには最適である。注目を集めている背景には、これらの特徴が多くの特許者の間に広く認識されてきたことがある。

光ファイバセンサには複数の方式が提案されているが、その中で FBG (Fiber Bragg Grating) センサは、精度や応用範囲の広さから、特に注目を集めており、歪みセンサ、温度センサ、加速度計、水位計など多岐にわたるセンサが開発されている。FBG センサの信号を検出するには FBG センサに光を照射しその反射を検出し所望の物理量、すなわち温度や歪みを検出するための装置である FBG センサモニタが必要であり、これまで多くの装置の開発が進められてきた。しかし、従来の装置は、掃引速度が遅く応用範囲が限られていたため、高速掃引の装置が望まれていた。

我々はこの要望に応えるべく高速の装置を開発し、地滑りなどのゆっくりした挙動の監視から大型構造物の地震時の監視まで、幅広い応用を可能にした。本稿では、装置の概要を紹介する。

2 FBG センサ

まず、最初に、FBG センサモニタの測定対象である FBG センサ

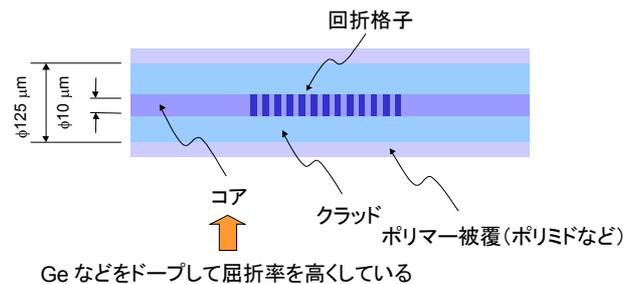


図1 FBGの構造
FBG Structure

の概要を説明する。FBGは光ファイバを応用したデバイスである。代表的な光ファイバは、コア部とクラッド部の2重構造になっており、コア部にGeをドープし、クラッド部に比べ屈折率を高くすることにより光の閉じ込めを行っている。1978年 K. O. Hill等 はGeをドープした光ファイバに488 nmのアルゴンレーザを用いて定在波を立たせると、定在波の強度に応じて屈折率が上昇する現象を発見した¹⁾。その後、1989年に G. Meltz等が光ファイバ紫外線レーザの干渉パターンを照射しFBGが製作できることを報告した²⁾。この報告をきっかけにFBGが盛んに研究されるようになった。

図1にFBGの基本構造を示す。図に示すようにFBGは光ファイバのコア部の長手方向に屈折率が周期的に変化する回折格子を備えたデバイスであり、格子の間隔で決まるある特定の波長の光信号を反射する特性を有している。通常FBGは光の波長を選択する光フィルタとして利用される。このFBGに外部から歪みや温度を加えると、コア部の格子間隔や屈折率が変化し、結果としてFBGの反射信号の中心波長が変化する。この中心波長の変化量と、

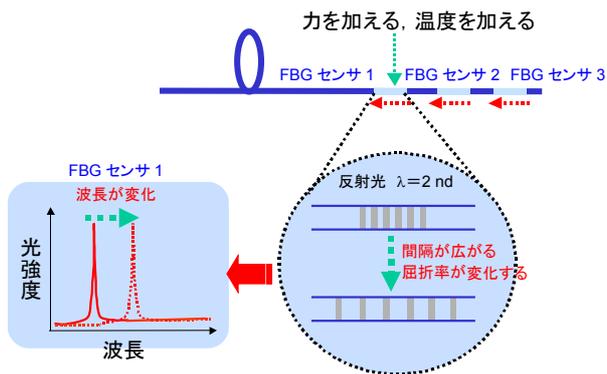


図2 FBG センサの原理
FBG Sensor principle

加えた歪みや温度などの物理量を対応付けることによりセンサとすることができる。図2にFBG センサの概要を示す。

FBG は受動素子であるため素子を駆動するための電源が不要である。また、中心波長を少しずつ変えてカスケード接続することにより、1本の光ファイバケーブルで複数のセンサを配置し、1台のFBG センサモニタで多点計測が可能になる。さらに、光ファイバ通信で培った技術を応用しているため、数十キロ先に配置したセンサをモニタすることも容易に行えるなど、従来のセンサの概念を覆す全く異なる使用の可能性を秘めている。

3 FBG センサモニタ

3.1 FBG センサモニタの2つの方式

FBGセンサモニタは大きく分類すると掃引光源方式とスペクトラムアナライザ方式の2つの方式がある。それぞれの方式を図3(a), (b)に示す。掃引光源方式は、掃引光源、光サーキュレータ、PD (Photo Diode)より構成される。掃引光源から出射した光は、光サーキュレータを介してFBGに照射され、FBGからの反射光が光サーキュレータに戻り、最終的にPDで検出される仕組みである。掃引光源の波長とPDで検出される光パワーを対応付けることにより、FBGのスペクトラムを検出できる。このFBGのスペクトラムのピーク値を装置の掃引ごとに検出することにより、時間的に変化するFBGセンサの出力値を求めることができる。

一方、光スペクトラムアナライザ方式は、ASE (Amplified Spontaneous Emission) 光源などの広帯域光源、光サーキュレータ、光スペクトラムアナライザより構成される。広帯域の光源でFBGを照射し、その反射光を光スペクトラムアナライザで検出することにより、FBGのスペクトラムを検出している。ASE光源の代わりにSLD (Super Luminescent Diode)を用いることも可能である。

掃引光源方式は、光エネルギーを集中できるため、FBGを接続するセンサのポート数を増やしたり、伝送距離の長い光ファイバに接続されたFBGセンサをモニタできるため、現在では主流になりつつある。今回、我々は掃引光源型のFBGセンサモニタを開発した。以下にその主だった特徴を説明する。

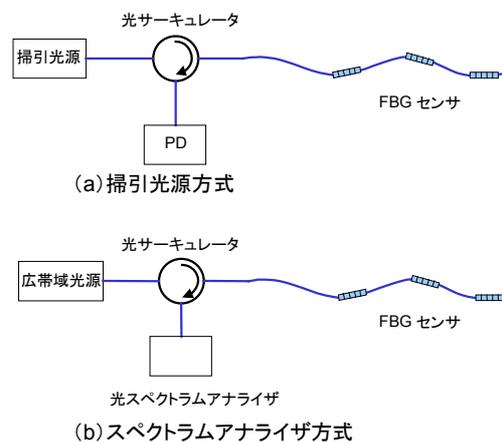


図3 FBG センサモニタの2つの方式
Two FBG sensor monitor methods

3.2 開発したFBG センサモニタ

図4に開発したFBGセンサモニタの写真を示す。写真は4つの接続ポートに個別にFBGセンサを接続し、それぞれのポートごとに独立した測定が可能な4ポートタイプの装置であるが、1つの接続ポートのみを備えた1ポートタイプの装置も同時に開発した。本装置は、制御用のパソコンを組合せ、FBGセンサを接続することによりFBGセンサモニタシステムを構築できる。装置の掃引波長範囲は、多くのFBGセンサが開発されている1.5 μm帯とした。



図4 FBG センサモニタの外観
External view of FBG sensor monitor

次に装置の構成について図5を用いて説明する。図で示すように本装置は、掃引光源モジュール、駆動回路、光サーキュレータ、PD、信号処理ボードより構成される。図は4ポートタイプの説明であり、掃引光源の出力をカプラーで4分岐し、それぞれのポートに

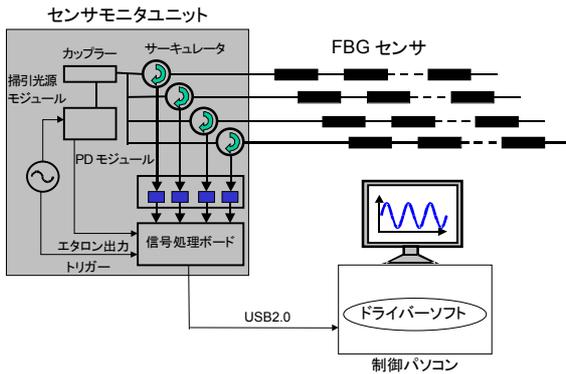


図5 FBG センサモニタの構成
FBG Sensor monitor schematic

接続された FBG センサの信号をサーキュレータを介し PD で検出している。

1 ポートタイプは、4 分岐のカプラーを省略し、サーキュレータと PD をそれぞれ 1 個ずつ用いた構成である。信号処理ボードは AD コンバータを備えており、FBG の反射光を測定した PD 信号と掃引光源の波長基準信号をデジタル信号に変換し、ピーク検出と波長補正をした後に、FBG のピーク信号とその時刻を制御用パソコンに出力する。

1) 掃引光源モジュール

本装置の心臓部である掃引光源モジュールについて図6を用いて説明する。掃引光源モジュールは外部共振器型の光源である。LD ヘッドとスキャニングフィルタを長さ約 2 m の偏波保持ファイバで接続したレーザ光源であり、マルチモードの発振を行う。LD ヘッドは、LD チップ、2 つのコリメータレンズ、アイソレータで構成されている。また、LD チップの共振器側の端面は AR コートが施されており、不要な共振モードを抑えている。これらの LD 部品は、最終的に両窓タイプのパッケージに窒素封止されている。出力側の窓には光を取出すための光ファイバが接続されている。

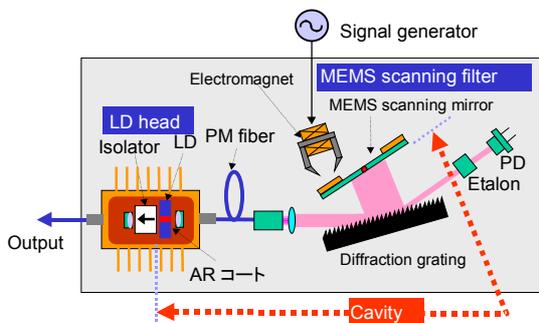


図6 掃引光源モジュールの構成
Swept light source module schematic

一方、スキャニングフィルタは、グレーティングと MEMS 光スキャナを用いたリットマウントタイプのフィルタである。MEMS 光スキャナを回転往復運動させ波長を掃引している。この掃引光源では、LD の HR 面と MEMS ミラー表面の間で共振器を構成している。エタロンは共振器の波長を校正するために用いている。共振器の零次光を基準エタロンに入力しその透過プロファイルを PD で検出し、FBG 信号の波長を校正している。

図7(a)は、掃引光源モジュールの掃引動作を光スペアナを用いて測定した結果である。波長 1520~1580 nm でのパワーの波長依存性は約 5 dBであった。5 nm 周期で 3 dB 程度のリップルが見られるが、これは偏波保持ファイバーのビート長の波長依存性が原因である。図7(b)は MEMS 光スキャナを止めた状態で掃引光源を発振させ、分解能 0.07 nm の光スペクトラムアナライザで測定した波形である。図を見る限りシングルモードに見えるが、実際にはこの単峰スペクトルは、図8(a)に示すように多数の側帯波で構成されている。図8(b)は、側帯波の形を遅延長 2 km のホモダイン線幅測定器で測定した結果を示している。図8(b)から掃引光源のスペクトラムは約 47 MHz 間隔の側帯波で構成されていることが分かる。この光源を FBG センサのスペクトラム測定に用いた場合は、側帯波の波長間隔は無視できるほど小さいため、問題なく測定が可能となる。

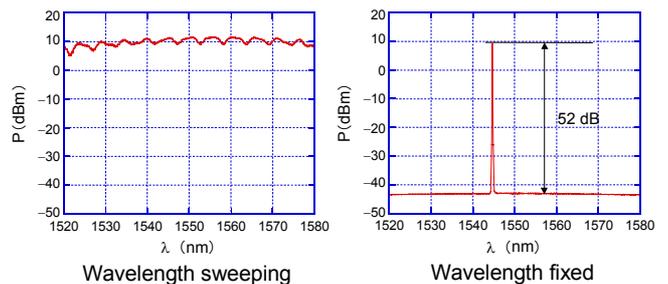


図7 掃引光源モジュール出力特性
Output characteristics of swept light source

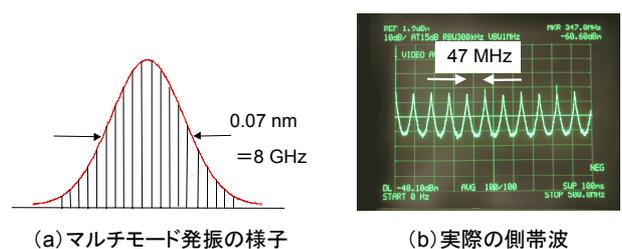


図8 掃引光源モジュールのスペクトラム
Spectrum of swept light source module

2) MEMS 光スキャナの例

掃引光源の掃引速度は、装置の性能を左右する重要なスペックである。我々は、MEMS 光スキャナを掃引光源に用いることにより 1.4 msec の高速掃引を実現した。図 9 に MEMS 光スキャナの 1 例を示す。

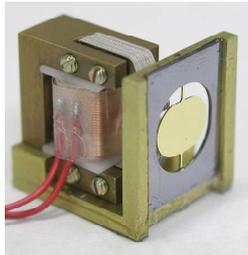


図 9 MEMS 光スキャナの一例
Example of developed MEMS scanning mirror

スキャナのミラーは 2 つの梁で支えた構造であり、シリコン基板を Deep RIE(Reactive Ion Etching) 技術を用いてエッチングし形成した。ミラーの裏にはパーマロイを接着しており、C 型の電磁石でミラー構造の機械的な共振周波数に合わせた吸引力を加え、回転往復運動を実現している。最終的な MEMS 光スキャナの形状は、図 9 のスキャナも含め、試作を繰り返し、最適な物を選定した。

図 10 は、MEMS 光スキャナを用いた掃引光源の時間と出力光の波長の関係を示す図である。先にも述べたように、MEMS 光スキャナは、機械的な共振を利用し駆動しているため掃引光源の出力波長は正弦波的に変化する。開発した装置ではほぼ直線とみなせるゼロクロス近辺のみの出力を用いることにした。

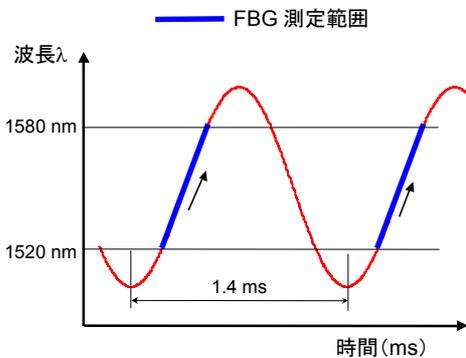


図 10 掃引光源モジュールの波長と時間の関係
Relationship between wavelength and time of swept light source module

3) 掃引光源の波長校正

FBG センサモータでは、波長の測定精度が装置の性能を決定する。このため本装置に内蔵する掃引光源は波長基準を用いて波長を校正する方式を採用した。具体的には、掃引光源に掃引波長帯域に複数のピーク波長を出力する波長基準用のエタロンを内蔵し、そのピーク波長を用いて波長と時間の関係を多項式に表現し、この結果を基に測定波長の校正を行うことにした。図 11 は、掃引光源の波長と時間の関係を示すグラフに波長校正に用いるエタロンのピーク波長を重ね合わせた図である。丸印は基準エタロンのピーク波長を示している。実際の装置では丸印のエタロンの波長を基に波長と時間の関係を表す多項式を掃引ごとに導出し、校正を行った。

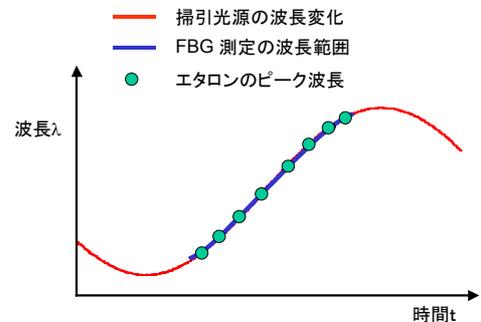


図 11 掃引光源モジュールの波長、時間、エタロンのピーク波長の関係
Relationship between wavelength, time and peak wavelength for etalon of swept light source module

図 12 は、掃引中の掃引光源モジュールのエタロン出力を PD で検出した例である。エタロンの透過プロファイルは $1552 + 4.9 \times N \text{ nm}$ ($N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) の波長にピークがあることが見て取れる。この波長を基に校正を行うことが可能になる。実際のエタロンは波長精度を向上させるため、ペルチェ素子を用いて温度コントロールした。

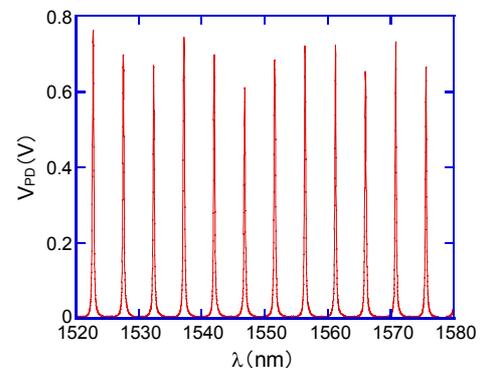


図 12 波長基準用エタロンの透過プロファイル
Output profile of etalon for wavelength standard

4 性能評価

開発した FBG センサモニタを評価した例を示す。図 13 は、カスケード接合した 10 個の FBG センサを測定した結果である。それぞれの FBG は 5 nm 離れた中心波長を持っている。測定結果から 10 本の FBG が観測できていることが分かる。

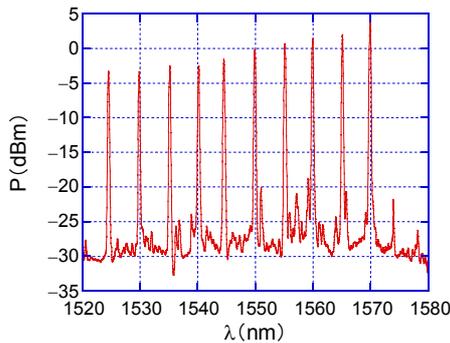


図 13 カスケード接合した 10 個の FBG センサを測定した例
Measurement example of cascaded 10 FBGs

センサの高速性を確認するため、片持ち梁のアルミ板に FBG センサを貼り付け、加えた振動が減衰する様子を観測した。実験には中心波長 1550 nm の FBG を用いた。この実験の測定結果を図 14(a), (b) に示す。(a) は力を加え開放したときの 900 ms 間の片持ち梁の減衰の様子である。(b) は(a) の一部を拡大した図である。この結果から、30 Hz の振動を精度良く捕らえており、更なる高速の振動を高精度で測定できることが推測できる。

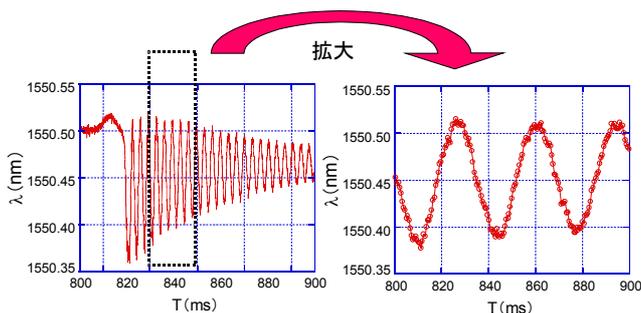


図 14 片持ち梁の減衰振動の測定結果

Measurement result of cantilever vibration with FBG sensor

図 15 は、時間的に変化する歪みを FBG センサに加え、本装置で測定した例である。(a) は、FBG センサのピーク値の時間変化を示している。(b) は、(a) の 1 部を切りだし、FBG のスペクトラムの時間変化をそのまま表示した例である。近年、FBG センサのピーク値の時間変化ではなく、スペクトラムの形からより多くの情報を

得るセンシングの研究もスマートマテリアル開発の分野を中心に広がるようになった。このような用途には大変適した FBG センサモニタである。

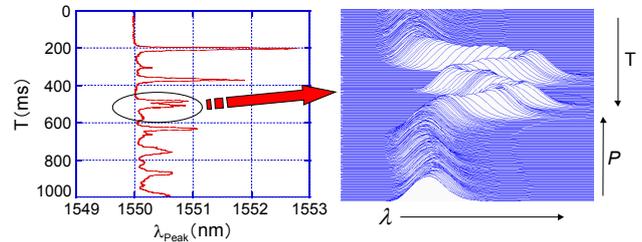


図 15 FBG センサのスペクトラムを測定した例
FBG Sensor spectra measurement example

最後に、今回開発した FBG センサモニタの主な特性を表 1 にまとめた。本装置の特徴は 1.4 ms の高速性である。また、掃引ごとに波長校正を行うため、1.4 ms の高速掃引で 10 pm 以下の波長再現性を実現しており、さらに 1000 回の平均では 1 pm 以下の波長再現性を達成できる。また、独自開発の掃引光源モジュールの採用により光出力パワー +7 dBm (1 ポートタイプ) を可能にした。これらの基本性能の強化により、従来の FBG センサモニタでは困難であった高速応答が必要な用途や長距離伝送が必要な用途にも適用が可能になると考えている。

表 1 FBG センサモニタの主な特性

Main characteristics of FBG sensor monitor

掃引周期	1.4 ms
測定波長範囲	1520~1570 nm
波長再現性	< 10 pm < 1 pm (1000 回処理後 3σ 値)
波長精度	< 30 pm
測定ダイナミックレンジ	30 dB (1 ポートタイプ) 25 dB (4 ポートタイプ)
光出力パワー (標準)	+7 dBm (1 ポートタイプ) +2 dBm (4 ポートタイプ)

5 むすび

掃引光源型の FBG センサモニタを開発した。掃引光源には MEMS 光スキャナを採用し、1.4 ms の高速掃引を実現した。また、掃引ごとに測定波長を校正することにより 10 pm 以下の波長再現性を実現した。本装置を用いることにより地滑りなどのゆっくりした挙動の監視から大型構造物の地震時の監視まで、幅広い応用が可能になる。

参考文献

- 1) K. O. Hill, Y. Fujii, D.C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photo-sensitivity in optical fiber waveguide: Application to reflection filter fabrication," Appl. Phys. Lett., vol. 32(10), pp. 647—649, 1978.
- 2) G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," Opt. Lett., vol. 14, no. 15, pp. 823—825, 1989.
- 3) K. Nakamura, T. Saito, Y. Takahashi, "High-Speed Optical Performance Monitor for WDM Network using MEMS Scanning Mirror", International Conference on Optical MEMS, pp. 97-98, 2003.
- 4) 齊藤崇記, 中村賢一, 高橋良文, "MEMS スキャナーを用いた高速光スペクトラムアナライザ", 電気学会 計測研究会, IM-04-615
- 5) T. Saito, K. Nakamura, Y. Takahashi, K. Miyagi, "High-speed MEMS swept-wavelength light source for FBG sensor system", OFS17, We3-3.

執筆者



高橋良文
R&D 本部
コアテクノロジーR&D センター
事業化推進部



中村賢一
R&D 本部
コアテクノロジーR&D センター
事業化推進部



齊藤崇記
R&D 本部
コアテクノロジーR&D センター
事業化推進部



飯田廣幸
R&D 本部
コアテクノロジーR&D センター
事業化推進部