

千葉工業大学  
博士学位論文

電磁波を用いた空間連続計測に基づく  
構造物の挙動評価に関する研究

平成 30 年 3 月

岩城 英朗

# 論文要旨

「電磁波を用いた空間連続計測に基づく構造物の挙動評価に関する研究」

建築・土木構造物に対するセンサなどを用いた計測は従来から行われてきたが、近年大型化・複雑化する構造物の挙動評価を行うためには大量のセンサや配線を必要とすることなどが課題となっていた。その一方で、計測や検査手法、さらにセンサ素子に用いる材料などに関する技術開発は日々進んでおり、光ファイバなどの新たな材料をセンサ素子として活用する検討や、構造物の外部から振動や温度変化を捉えることが可能な検査装置が実用になりつつある。

このような状況の中、本研究は、建築・土木構造物の変形挙動評価のために、電磁波を用いた空間連続計測法を提案し、さらに同計測から得られる後方散乱波の位相変化と強度変化の双方を用いた計測データの分析法を示したものである。本論文は全5章の論文で構成されており、各章の概要は以下に示す通りである。

第1章「序論」では、本研究の背景を述べ、既往の研究を整理して本研究の目的と位置づけを示した。

第2章「光波を用いた線的計測」では、構造物の連続的かつ静的なひずみ変化や温度変化を捉えることができる光ファイバ分布計測に着目し、構造物へ光ファイバ分布計測を適用する際の課題を整理した上で、構造物に設置できる光ファイバセンサの開発とその適用に関する研究を行った。さらに、実際の長大斜張橋への適用を通じた線的計測法および計測データの分析法を述べた。

まず、通信用に広く適用されている細径石英ガラス製の光ファイバをそのままセンサ素子として活用し構造物に適用する際の破断や劣化などの課題に対し、コンクリートへの埋設あるいは構造物表面への貼付が可能な光ファイバひずみセンサおよび温度センサを製作し、基本特性試験を通じてその適用性を示した。

さらに、開発した光ファイバ分布センサを実際のコンクリート斜張橋の施工時から完成後の供用時を通じて適用し、計測システムの構築法、および光ファイバセンサの設置法を示した。

設置した光ファイバセンサで取得したひずみ分布，あるいは温度分布と従来のセンサの計測値との間の良好な相関を確認した上で，斜張橋の主桁に設置した光ファイバセンサのひずみ計測値を用いて主桁の線形（たわみ）計測が行えることを示した．

加えて，後方散乱光の位相（波長）変化からひずみ分布，あるいは温度分布を捉える従来の方法に対して，後方散乱光の強度変化を併せて捉えることで，ひずみ分布計測値，および温度分布計測値の評価を行うとともに，センサの長期耐久性の担保につながる余寿命推定，さらに計測システム全体の異常検知を行うことができることを示した．

第3章「電波を用いた面的計測」では，構造物の様々な部位の変形や振動を一括して捉えることが可能なレーダー技術に着目して，構造物の外部から計測する際の課題を整理した上で，計測装置の設置法およびレーダーから得られた計測値から構造物の変形および振動分布を取得する一連の処理法について述べた．

まず，人工衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）で取得した平成 28 年熊本地震前後の観測データに対して差分干渉解析を行い，構造物の変状を捉える検討を行った．その結果，散乱波の強度変化から広範な観測範囲から被災した構造物の抽出が行える可能性があることを示した．

次に，計測対象の動的な変位あるいは振動を面的に一括して捉えることが可能な高速イメージングレーダーの概要を述べ，構造物の計測に適用する際に必要なレーダーの観測視野，すなわちレーダーの計測データが示す位置（座標）と，構造物の規模や位置などを示す三次元直交座標の変換処理法を提示した．

また，レーダーで得た計測データと複数の計測点の座標を統計処理して座標変換を行う方法を示すと共に，異なる地点に設置した複数の計測装置（レーダー）を同時に用いた計測を行い，双方の計測データを処理することで構造物の挙動をより精緻に捉える計測法についても述べた．

第4章「高層建物における面的計測の検証」では，実際に高層建築物に対して建物の外部からレーダーを用いた計測を行ない，第3章で述べた電波を用いた面的計測法の検証を行った．

計測対象建物の外部にレーダーを設置して建物に対して電波を送信し，その電波に対して建物の各部から反射・散乱する電波を受信する計測を行った．この計測で得ら

れた受信波（散乱波）から対象建物のほぼ全域で散乱波の位相変化（微小な変位）が生じていることを確認し、これらの値から対象建物の面的な振動分布が得られることを示した。

さらに、計測対象建物の周囲 2 箇所にレーダーを設置して異なる方向から同時に計測を行った。それぞれのレーダーで得た散乱波の位相変化を合成することで観測対象建物の長辺および短辺方向の振動をそれぞれ抽出できることを示し、さらにこれらに対する周波数解析を行った結果、既往の加速度計などを用いた振動計測と同等の卓越振動特性を得ることができた。

以上の結果より、電波を用いた面的計測法の有効性を示すことができた。

第 5 章「結論」では、各章で得られた成果を要約し、本研究の結論および今後の本研究の展開について述べた。



# SUMMARY

Structural behavior estimation based on spacial continuous measurement  
using electrical and optical wave.

This dissertation describes a method of applying spatial continuous measurement using electric and optical wave for behavior estimation in building and civil infrastructures. In addition, a method of analyzing measurement data is developed using the phase change and intensity of a backscattered wave obtained through measurement. This dissertation consists of five chapters.

In chapter 1, the background and the objective of the study are described.

Chapter 2 focuses on distributed optical fiber measurement to measure the continuous strain and temperature change of a structure and to estimate behavior during the measurement. An optical fiber strain sensor and a temperature sensor embedded in concrete or attached on the surface of the structure are developed, and their fundamental characteristics are confirmed. In addition, distributed optical fiber measurement is carried out on an actual concrete bridge during construction and operation to estimate the behavior of the bridge. Furthermore, an analysis method that uses the wavelength shift and intensity of backscattered light is proposed.

Chapter 3 describes the measurement of surface movement and vibration using a radar system. The applicability of using the radar and the signal processing and analysis method are presented. When the radar is applied to the structure, the position of the observation field of the radar and the conventional coordinate system are considerably different. A method is proposed for extracting surface movement and vibration components in the coordinate system of the structure based on the positional relation between the radar and measurement point using a statistical method. Furthermore, a measurement and data analysis method is developed to detect the motion of the structure using multiple radars. Additionally, the possibility of extracting the damage

caused to the structure by a disaster using the intensity change of a scattered wave measured by a synthetic aperture radar mounted on a satellite is demonstrated.

In chapter 4, the applicability of the measurement and analytical method described in chapter 3 is verified by performing measurement using a radar outside an actual high-rise building. The surface movement and vibration of the building are clearly detected from the phase change of a scattered wave. These analyzed vibrations are almost equal to the dominant vibration obtained using a conventional vibrometer. Furthermore, simultaneous measurement is performed using two radars around the building, and the horizontal dominant vibration of the building is obtained.

In chapter 5, the conclusions of the study are summarized, and the direction of future work is described.

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景 . . . . .	2
1.2	既往の研究と課題 . . . . .	3
1.3	研究の目的と範囲 . . . . .	7
1.4	論文の構成 . . . . .	9
第 2 章	光波を用いた線的計測	11
2.1	はじめに . . . . .	12
2.2	光ファイバ計測の概要 . . . . .	12
2.3	光ファイバ分布計測の概要 . . . . .	16
2.4	光ファイバ分布計測の課題 . . . . .	23
2.5	構造物に対する光ファイバ分布計測 . . . . .	25
2.6	橋りょうにおける光ファイバ分布計測の適用 . . . . .	34
2.7	まとめ . . . . .	50
第 3 章	電波を用いた面的計測	51
3.1	はじめに . . . . .	52
3.2	レーダーを用いた面的計測の概要 . . . . .	52
3.3	構造物に対する面的計測 (衛星 SAR を用いた面的計測) . . . . .	63
3.4	レーダーを用いた面的振動計測 . . . . .	69
3.5	構造物に対する面的振動計測 . . . . .	78
3.6	まとめ . . . . .	82
第 4 章	電波を用いた面的振動計測の検証	83
4.1	はじめに . . . . .	84

4.2	高層建物に対する面的振動計測 . . . . .	86
4.3	複数レーダーの適用 . . . . .	103
4.4	まとめ . . . . .	128
第 5 章	結論 . . . . .	129
5.1	本論文の結論 . . . . .	130
5.2	本研究の展開と今後の展望 . . . . .	132
付録 A	衛星 SAR の観測データを用いた 差分干渉解析 . . . . .	144
A.1	衛星 SAR の概要と観測データ利用における課題 . . . . .	144
A.2	衛星 SAR データの取得 . . . . .	147
A.3	衛星 SAR 観測データを用いた差分干渉解析 . . . . .	150
A.4	差分干渉解析結果の検討 . . . . .	158
付録 B	レーダー設置位置の推定 . . . . .	163
B.1	3 つの球の交点 . . . . .	163
B.2	2 つの円の交点 . . . . .	166
参考文献		169

## 第 1 章

# 序論

---

## 1.1 研究の背景

近年ますます大型化する建築・土木構造物にセンサ等を配し、それらから得られる計測データの分析を通じて構造物の状態把握を目指した研究が多く、研究者の手により着実に進められている。その一方で、構造物に手を加えることなく、外部から遠隔で計測（検査）を実施することによって構造物の挙動評価を行おうとする動きが、近年の先進的なセンサや計測・点検手法の発展により実現できる可能性が高まりつつある。

例えばこれまでも長大橋や高層建物などの大型構造物における様々な外乱に対する複雑な挙動を捉え、それらの挙動を分析評価する重要性は認識されていた。しかし、従来の人手による点検や、いくつかの「点」にセンサを配する計測では甚だ困難な状況であった。

しかし、光ファイバなどの先進素材をセンサ素子とする線的計測や、電波や光波、すなわち電磁波を用いて構造物の外部から面的な情報を一括して取得できる計測手法を用いることにより、この課題に対する極めて有用な手段となりうる。

## 1.2 既往の研究と課題

### 1.2.1 構造物に対するひずみ・温度の計測

建築・土木構造物に対するセンサ等を用いた計測，あるいは検査機器等を用いた検査などが対象としていたのは，主に構造物の変形（ひずみ）や振動を捉えることと，これらの構造物の挙動変化の主な要因である荷重や風，温度の変化といった環境変化を捉えることであった．

構造物の各部の変形を捉えるための基本的な計測手法として，箔状のシートに電気抵抗素子を複数配置し，シートの変形に伴う抵抗値の変化を捉えることを計測原理としているひずみゲージを挙げることができる．ひずみゲージは 1930 年代にセンサ素子とし実用化されて以降，航空機，鉄道車両や機械プラントなどの分野における機器の耐久性や信頼性担保のための様々な計測を担い続けており，そのセンサ素子の改良や，傾斜，加速度等の計測のための変換機構の開発および実用化など，現代における計測の基幹素子として広く展開されている [1]．

また，構造物の各部の温度変化を捉えるためには，異なる 2 種類の金属線の先端を接触させた回路の接合点において，ゼーベック効果により発生する熱起電力を通じて温度差を測定する熱電対が従来より広く用いられており [2]，建築構造物においては，宮野ら [3] が建物表面の温度計測に熱電対を用いた例などを挙げることができる．

これらのセンサ素子は長年の開発に伴い性能および安定性の向上と低価格化が実現されているが，建築・土木構造物のように面的に広がりをもつ対象の多数の点の計測を行う際には，計測点の各々の信号ケーブル等を配線する必要がある．

### 1.2.2 構造物に対する振動計測

一方，構造物の振動特性の把握には，加速度計あるいは速度計といったセンサを構造物の各所に設置し，構造物に対する常時微動，強風時あるいは地震時における構造物の動きなどを計測して，それらの計測データから応答値，卓越周期，減衰特性および振動モード形状などを解析で求める手法が従来より用いられてきた．

構造物の各所に配する加速度計は、1980 年代に航空機の慣性航法装置用に用いられてきたセンサから発展したサーボ型加速度計 [4] がこれまで多く使われており、現在も性能と安定性の向上に向けた取り組みが引き続き行われている。しかしこれらを用いた計測を行う際には、専用の電源や計測装置などが必要になる場合が多いため構造物の計測が容易に行えるとは言い難い。また、一つの構造物に多くの加速度計を設置する際には、これらの専用の計測装置に加えて、ひずみゲージや熱電対等のセンサと同様に、電源や信号ケーブルの配線が各々の加速度計に対し必要となるため、大規模な計測を構造物に対して行う際には莫大な配線を敷設する労力やコスト等の課題は多い。

このような状況の中で、半導体素子の製造技術などを活用して集積化された超小型加速度計は、従来の加速度計に比較すると低周波領域の雑音が大きいといった課題はあるが、スマートフォンへの標準搭載などを通じて広く一般に普及しており、従来の加速度計とは比較にならないほど低価格かつ簡便に用いることが可能な状況になりつつある。

白石ら [5] は、18 階建て鉄骨造建物を模擬した試験体において 152 台の小型加速度計を高密度に配置し、建物に加わる地震波に対する建物各部位の応答をくまなく計測することから、建物に発生する損傷の部位および損傷度合いの診断を極めて精緻に行っている。

しかし、構造物の内部に高密度かつ多数のセンサを設置する際には、多くの人手や時間を必要とするばかりか、特に大型構造物の場合には配線作業が困難であり、計測システム自体の構築ができない状況も生じる。

一方 Spencer らの研究 [6] では、これらの半導体素子を用いて集積化された加速度計や温湿度、傾斜などを検知するセンサをパッケージ化したセンサをスマートセンサと称し、構造物に対して高密度かつ多数に配する計測法を示しており、それらのセンサからのデータを統合して、構造物の性能把握を行う際の現状と展望を論じている。さらにスマートセンサを用いた計測では、従来の小数のセンサを用いた計測で行われていたような単一の計測機器などでセンサからのデータを一括して処理解析する手法にとらわれずに、新しい分散処理型の手法が必要になると指摘している。

Spencer らの研究を受けて、Lynch ら [7] は、加速度計を備えた無線センサのプロトタイプを実際の道路橋に設置して振動計測が可能であることを実証し、Nagayama ら [8] は同様の無線センサをトラス構造の試験体に設置しその性能を検証している。

しかしこれらの無線センサ（スマートセンサ）を用いる場合、信号経路の遮断や信



号ノイズの問題等に対して不可避ではなく、構造物の空間形状や計測環境によっては、実質的な計測精度の確保が困難になる場合もある。

大量のセンサを構造物に配して同時計測を行うこれらの流れに対して、岡田ら [9][10] の研究では、従来のセンサ配置に立ち戻り、少数のセンサを用いて取得した計測データから構造物の全体特性を推定する手法を提示しており、森井ら [11] により地震直後における建物健全性評価への適用が行われている。

さらに、来栖ら [12] や、杉本ら [13] の研究では、限られた数のセンサを建物内部に移動しながら計測を行い、各々の常時微動観測データを用いて伝達関数の再構築を行うことで、建物の振動特性評価を行うなどの新たな流れも生まれている。

### 1.2.3 構造物外部からの振動計測

構造物にセンサを配して計測を行う上記の手法に対し、構造物の外部から遠隔でその挙動を捉えようとする計測手法の開発も行われている。

貝戸ら [14] は、レーザー光を構造物の外部から照射し、その散乱波の周波数を解析することで、構造物の振動（速度）を取得することができるレーザードップラ速度計を用いて構造物の振動性状の把握と損傷検出を試みており、久保田ら [15][16] らは、貝戸らと同じくレーザードップラ速度計を用い、さらに測量機器として広く用いられているトータルステーションを計測対象位置の推定に用いることで、橋りょうのケーブルなどに対する振動計測などに適用している。

これらは概ね構造物の限られた位置（ポイント計測）の速度計測に限定されるが、宮下ら [17] は、上記のレーザードップラ速度計を他点計測に拡張したスキャニングレーザードップラ速度計を用いて構造物の限られた範囲の振動を得る検討を行い、さらに上半ら [18] は、同計測器を複数台用い同時計測を行うことで、計測対象の三次元的な動きを把握するための試みを進めている。

#### 1.2.4 研究課題

前項まで構造物の挙動評価を行うための計測に関する背景について論じ，関連する既往の研究について述べた．

構造物の挙動評価を行う上では，面的に広がりをもつ構造物の各部位の変形や温度，振動性状の把握が重要であると従来より考えられており，そのために構造物の各部位に，ひずみゲージ，熱電対や加速度計などのセンサを配する計測，検査やモニタリングが試みられている状況である．これらを概観した研究課題を以下に整理する．

- 多数のセンサを構造物に配する計測には，莫大な通信ケーブルおよび電源などの配線を要するため，センサの設置や計測の長期運用には多大な労力を要する．
- 計測収録機器を無線（ワイヤレス）で接続する計測機器の開発や試適用が進んでいるが，センサ間の時刻同期や通信経路の確保などの課題があり，計測の長期運用においては電源の確保も課題となる．
- 物体の外部からレーザー光などを照射して，物体表面からの反射光を捉えることで物体の変化を捉えることを目指したレーザードップラ速度計などの機器開発が行われており，これらの機器の構造物への適用も行われつつある．しかしこれらの機器は概ね限られた点や範囲への計測に限定しているため，面的あるいは線的に広がる空間計測，分布計測への適用には課題がある．

### 1.3 研究の目的と範囲

前節で示した課題に対し、近年は構造物の内部に比較的軽微な労力で設置できる線状センサを用いる手法や、構造物の外部から面的に振動分布を捉える手法といった新たな計測手法や先進計測機器が登場した。

通信用に広く普及する光ファイバの軸方向にレーザー光（光波）を入射し、その全長から後方散乱する光を信号処理することで、光ファイバ全長のひずみ分布あるいは温度分布を一括取得することができる光ファイバ分布計測は、線的に広がりをもつ構造物の静的な変化を一括して捉えることができる可能性がある。

さらに、構造物の外部からマイクロ波（電波）を送信（照射）し、その散乱波を信号処理することで観測対象の面的な変化の分布、特に振動分布を一括取得できるレーダー技術は、構造物の振動性状を一括して簡便に捉えることができる可能性がある。

また、光波を用いた線的計測（光ファイバ分布計測）および電波を用いた面的計測（レーダー技術）の双方の信号処理や計測データの分析・解析には類似する点が少なからずあり、互いの知見が活用できる可能性もある。

そこで本研究では、構造物の挙動評価を行うために空間的な広がり、すなわち線的・面的に広がりを持つ計測を一括して行うことが可能な、電波、光波を用いた線的あるいは面的な連続計測技術、すなわち電磁波を用いた空間連続計測に着目し、これらの適用法の創出と計測データの分析法を構築する。

既往の諸研究に対する本研究の特徴は以下の通りである。

- 光波を用いた線的計測手法である光ファイバ分布計測を用いて、建築・土木構造物の線的計測を行うために、構造物に対して比較的容易に設置が行えるセンサの開発を行い、実際の構造物に対する適用と計測データの分析を通じて計測法の有用性を示す。さらに、光ファイバ分布計測で得られる後方散乱光に含まれる位相（波長）と強度に着目し、その双方から計測値の評価と計測精度の検証、さらに計測装置の診断を行うデータ分析法を示す。
- 構造物の内部にアクセスすることなく、外部の離れた位置から電波を照射し、その反射波（散乱波）を受信して位相変化を求めることで、計測装置から対象までの距離変動を求めるレーダー技術に着目して、構造物の変位、振動分布を求めるための計測法および計測データの分析法を提案する。なおレーダーから得

られる散乱波の位相情報に加えて散乱波の強度にも着目し、構造物の挙動評価および計測精度の検証への適用可能性についても述べる。

- レーダー技術を用いた面的計測を実際の高層建物の振動分布を捉えるための計測に用い、本研究で論ずる計測法およびデータ分析法の有用性を検証する。

本研究を通じた特徴は、光ファイバ分布計測やレーダー技術などの新たな計測手法を建築・土木構造物の挙動評価に対し用いる際の適用法の提案と、これらの計測で得ることができる後方散乱光および散乱波がもつ位相情報と強度情報の双方を用いた分析法を示すことにある。また、線状の光ファイバセンサや、レーダー計測で用いられている独自の座標系から計測対象構造物の位置を表す直交座標系への変換法を併せて提示することを通じて、対象構造物の線的、面的な変位分布や振動性状を空間連続的に計測する一連の方法を示すことを併せて行う。

なお、上記のように光ファイバ分布計測は、構造物の静的なひずみ計測あるいは温度計測に限定されるが、センサを一旦構造物に設置することにより橋りょうや高層ビルなどの長大な構造物の長期計測が実現できる可能性がある。

一方、レーダー技術を用いた面的計測は、動的な構造物の変形、振動を計測できる可能性があるため、従来のセンサを用いた計測に比べ、構造物に対する定期点検や逐次計測が容易に行える可能性がある。さらに、平常時に限らず、夜間や地震などの災害被災の直後など、構造物内部へのアクセスが困難な場合、あるいは対象構造物の用途などの問題で内部へのアクセスが制限される場合においても、内部に立ち入らずに外部から対象構造物の面的な挙動評価を行うことができる可能性がある。

そのため、これらの空間連続計測を構造物に適用することにより、構造物の変位性状や振動特性を簡便かつ効率的、継続的に把握することが可能な新たな計測、ひいては新たなモニタリング手法となることが期待できる。

## 1.4 論文の構成

本論文は全 5 章から構成している。各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の背景を述べ、研究の位置づけを明らかにする。

第 2 章では、光波を用いた線的計測技術である光ファイバ分布計測に着目し、その光ファイバ全長をセンサ素子として用いる計測の概要と構造物に適用する際の課題を述べる。次にこれらの課題に対して構造物への設置が容易かつ安全に行える光ファイバセンサの開発と基本特性試験の実施を通じた性能検証を行う。

これらの開発した光ファイバセンサを実際の橋りょうに対して適用し、簡便なセンサの設置法を提案するとともに、施工期間中の線形（たわみ）計測および完成後（供用期間中）の計測および計測データの分析を通じて本計測法の検証を行う。

併せて光ファイバ分布計測で得られる後方散乱光の位相（波長）と強度の双方を用いた計測値の評価および計測データの精度と長期耐久性の推定を行う計測データの分析法について述べる。

第 3 章では、電波を用いた面的計測技術であるレーダー技術に着目し、レーダー技術を用いた計測の概要および課題を論ずる。さらにレーダー技術を用いた計測のうち、特に面的に拡がりをもつ対象の変化を捉えることが可能なイメージングレーダーの概要を示し、併せてイメージングレーダーの実用成果の一つである衛星 SAR（人工衛星搭載型合成開口レーダー）の計測データの分析・解析を通じて、レーダー技術を用いた面的計測を構造物の変化を捉えるために用いる際の課題を論ずる。

次に、近年開発された高速に面的な計測が行える可能性がある高速イメージングレーダーに着目し、この計測の概要を示すとともに、同レーダー技術を構造物の面的振動分布を捉えるための計測に適用する際の適用する際の課題を明らかにするとともに、レーダー計測で得られる散乱波の処理法およびデータ分析法について述べる。

第4章では、実際の20階建て鉄骨造建物に対してレーダーを用いた面的振動計測を行い、その結果の分析・解析を通じて本研究で述べた手法の検証を行う。まずレーダーを1台用いた計測から得られる散乱波から対象建物の振動分布を捉える計測データの処理法を示し、さらに、複数のレーダーを同時に用いた計測およびその計測データの処理および分析から、電波を用いた面的計測による構造物の振動性状の把握の可能性を示す。

第5章では、本論文の結論ならびに今後の課題・展望を述べる。



## 第 2 章

# 光波を用いた線の計測

---





## 2.1 はじめに

第2章では、構造物の様々な部位におけるひずみ変化や温度変化を一括して捉えるために、光波を用いた線的計測の一手法である光ファイバ分布計測に着目する。光ファイバ分布計測は、構造物の表面あるいは内部に線的にセンサを配してひずみ、あるいは温度分布を捉えることが可能な計測方式として開発が進められてきた方式であるが、建築・土木構造物に対する広い普及には未だ至っていない。

本章では、まず光ファイバ分布計測の概要とその構造物に適用する際の課題を整理し、次に構造物に適用して計測を行う際の適用法と計測データの処理・分析手法について述べ、実際の橋りょうの施工時および完成後の供用状態における適用を通じてその手法の検証を行う。

## 2.2 光ファイバ計測の概要

光ファイバは図2.1のように異なる種類のガラスを細径の線状（繊維状）に加工したもので、図2.1の内側のガラス（コア）に沿って入射した光が外側のガラス（クラッド）との屈折率の差によりコア内部で全反射しながら伝搬する特長を有する。

このガラス製の光ファイバは、従来の銅線にかわる通信用の媒体として、現在の高速度デジタル通信を支える基幹的デバイスとして広範に活用されている。

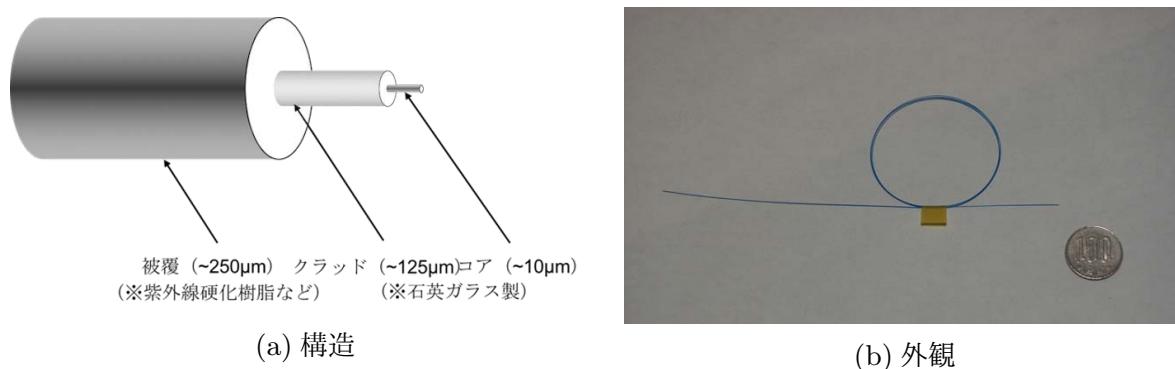


図 2.1 光ファイバ（通信用光ファイバ）の構造と外観

その一方で、光ファイバをセンサ素子として活用する研究開発も通信用途への展開と同時期から盛んに行われてきた。光ファイバをセンサ素子として用いると、電気信号を用いるセンサには不可避な電磁的なノイズに対し無縁で、さらに化学的に安定し

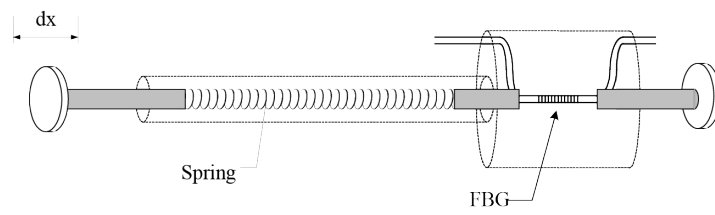
ているという特長を併せ持つことから、長期にわたる安定した計測が見込めるセンサとしての適用が長らく有望視されてきた [19].

Butter ら [20] は、電気抵抗式のひずみゲージと同様にひずみ計測を行うための光ファイバセンサ素子の開発を行い、Huston ら [21] は光ファイバで製作したひずみセンサを橋りように適用してひずみ計測を行っている.

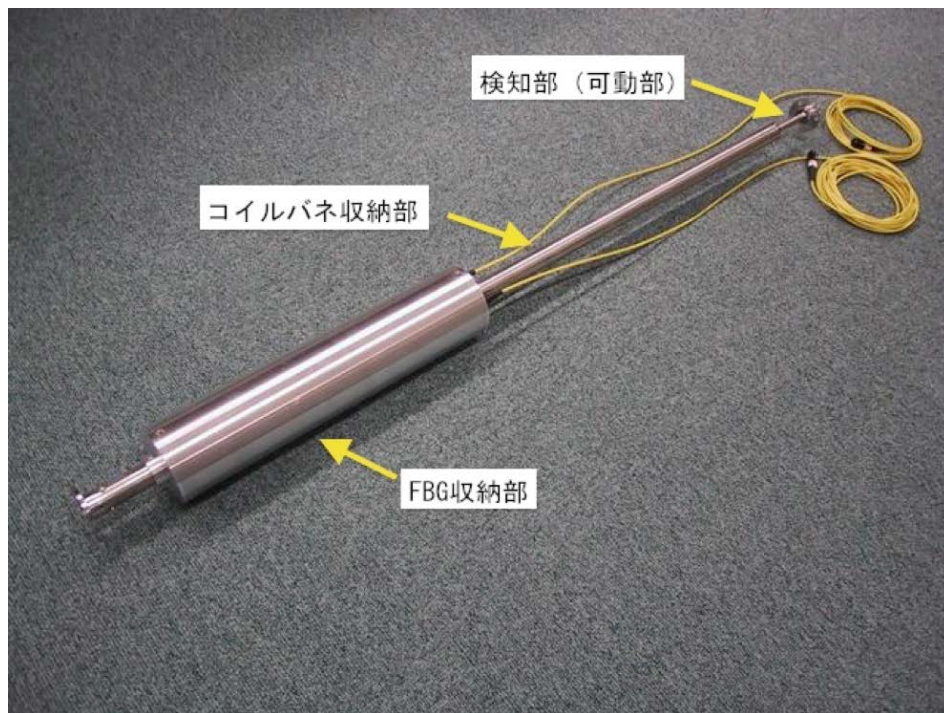
また、三田ら [22] は、光ファイバセンサの軸方向に作成した周期的に屈折率が異なる箇所（格子）を検知部とする FBG (Fiber Bragg Grating) 方式の光ファイバセンサを、一質点系の重りに接続することで加速度を検知する FBG 加速度計や、従来のひずみゲージ式圧力計の感圧部（感圧板）に FBG を用いる FBG 圧力計を提案している. さらに長井ら [23] は、三田らが開発した FBG 加速度計に対し、質点系の最適化を行い同センサの高感度化を行っている.

著者ら [24] は、図 2.2 のように FBG をコイルバネに接続して大きな変形を微小ひずみに変換する FBG 変位計を製作しており、図 2.3 に示す制震建物の間柱部に配した制震ダンパの対角変位を一式の計測装置（アナライザ）で常時計測するセンサとして適用している.

これらの光ファイバをセンサ素子として用いる計測は、電気信号を用いる従来のセンサと比較すると電源ケーブルが不要となり信号ケーブルが集約できる省配線が実現できる可能性がある. しかし、光ファイバセンサから受信する信号を処理するためには専用の計測装置（アナライザ）を必要とする場合が多く、さらにセンサ素子の製作に高額な費用を要するために、従来のひずみゲージや熱電対などの代替には至っていない.



(a) 構造



(b) 外観

図 2.2 FBG 変位計の構造および外観

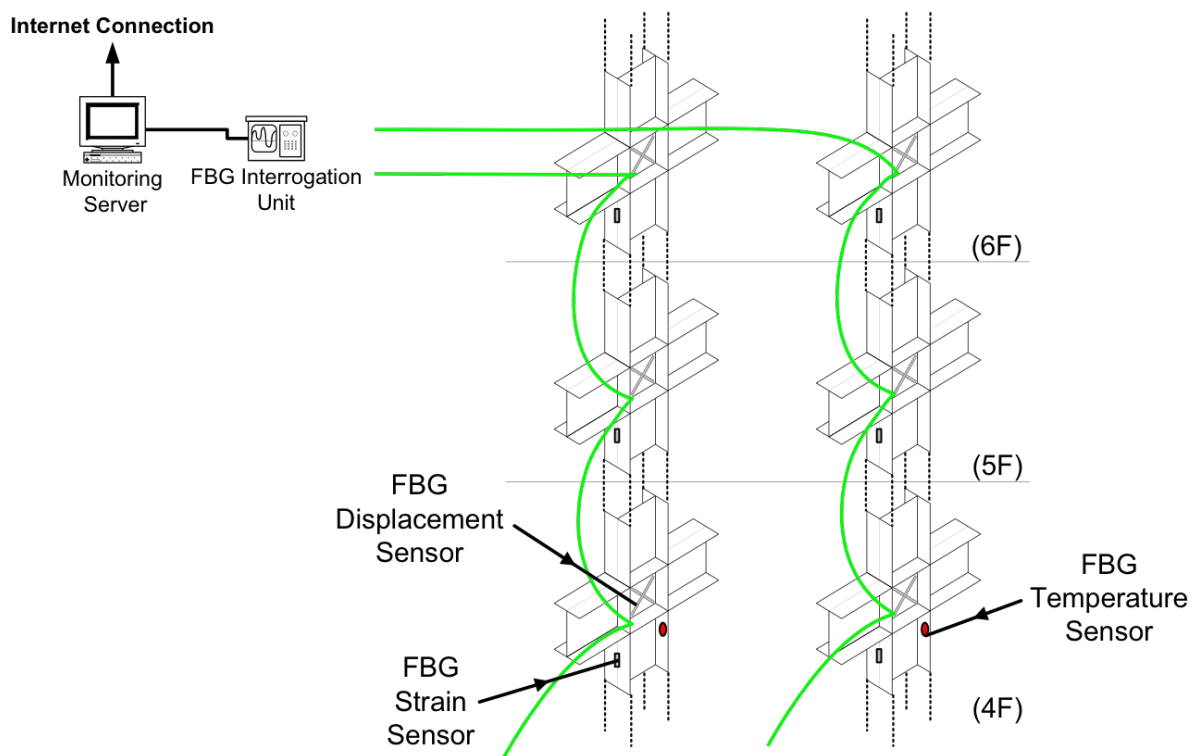


図 2.3 制震建物（間柱制震ダンパ）に対する FBG 変位計の適用

## 2.3 光ファイバ分布計測の概要

### 2.3.1 光ファイバ後方散乱光のセンサ利用

前項の光ファイバセンサは，光ファイバに屈折率が異なる格子を施す加工などを行いセンサ素子（検知部）として用いていた．一方，通常の光ファイバに対して高出力・狭パルス幅のレーザ光を入射すると図 2.4 に示す後方散乱光と呼ばれる反射光が得られる特徴があることが知られている [19]．これらは光ファイバの製造過程や物理特性に起因するもので，入射光に対する波長差の順にレイリー散乱光，ブリルアン散乱光，ラマン散乱光に分けられる．

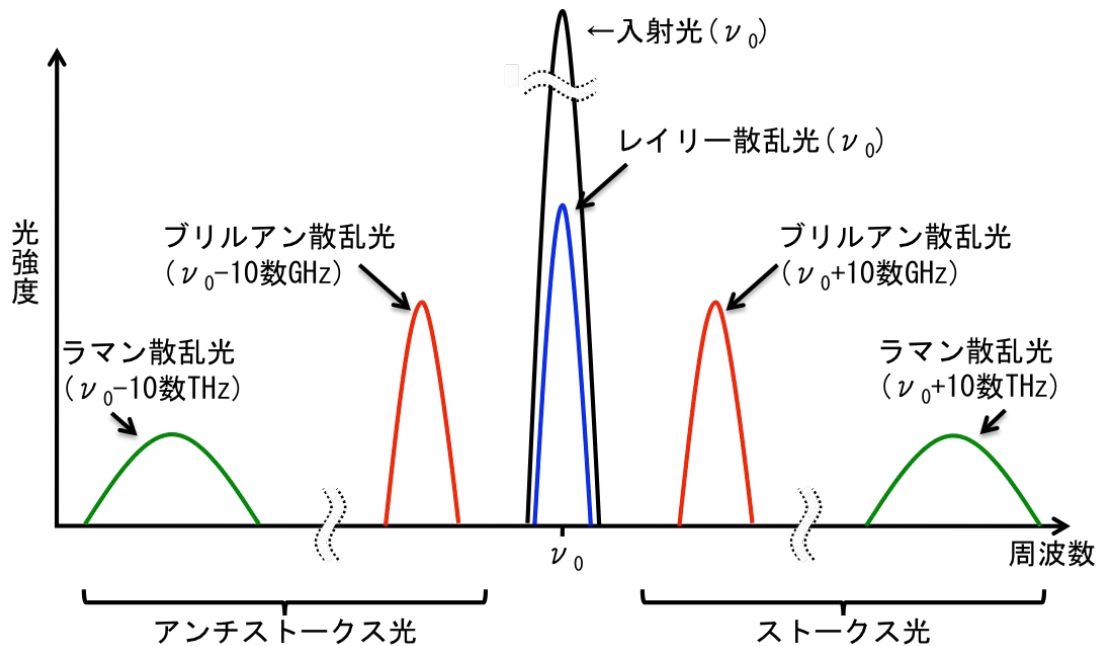


図 2.4 光ファイバに生じる後方散乱光

入射光の波長とほぼ同じ波長で後方散乱するレイリー散乱光は，その散乱光強度が比較的強いことから早期から研究開発が進み，光ファイバにパルス光を入射して入射端に戻ってくる散乱光の強度を時間的にサンプリングする時間領域解析技術（Optical Time Domain Reflectometry(OTDR)）方式を用いた計測機器が実用化されている．現在では，この OTDR 計測器は通信用光ファイバの断線や障害点の場所を特定する光ケーブル敷設工事や保守工事などで広く用いられている．

入射光から大きい波長差（周波数換算で約  $10[\text{THz}]$ ）があり，散乱光の強度が比較的低いラマン散乱光は，光ファイバの周囲の温度変化によって散乱光の強度が変化する特徴がある．この特徴と OTDR 技術を組み合わせることにより，光ファイバを敷設した全域，すなわち線状の温度分布計測を行える計測装置（Distributed Temperature Sensing:DTS）が実用化されている．

著者ら [25] は，図 2.5，図 2.6 に示すように液化天然ガス（LNG）地下タンクの施工における底版コンクリートの打設時に通常適用される熱電対を用いた温度計測に加えて，底版コンクリートの全域に光ファイバを設置し，図 2.7 に示すようにコンクリート打設時および打設後の養生期間を通じた温度分布計測を行った．

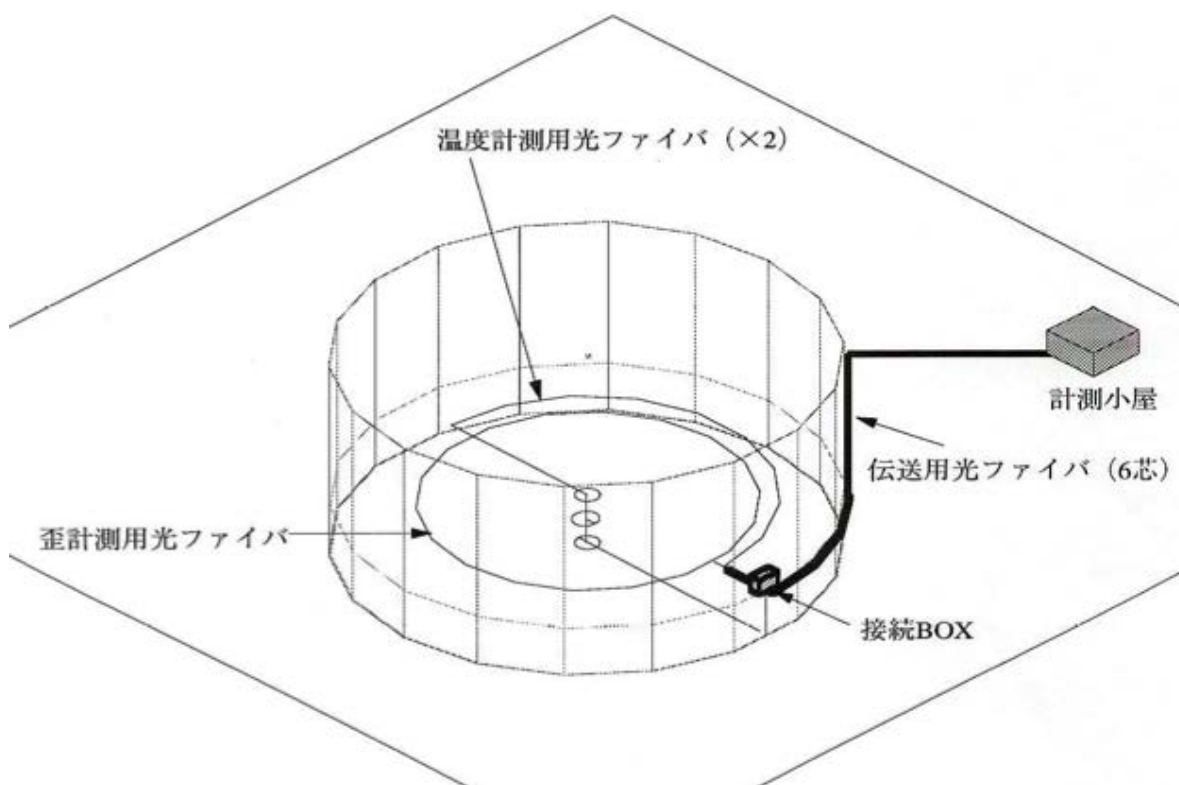


図 2.5 光ファイバ分布温度計測の LNG タンク底版への適用（概要図）





図 2.6 光ファイバ分布温度計測の LNG タンク底版への適用（センサ設置状況）

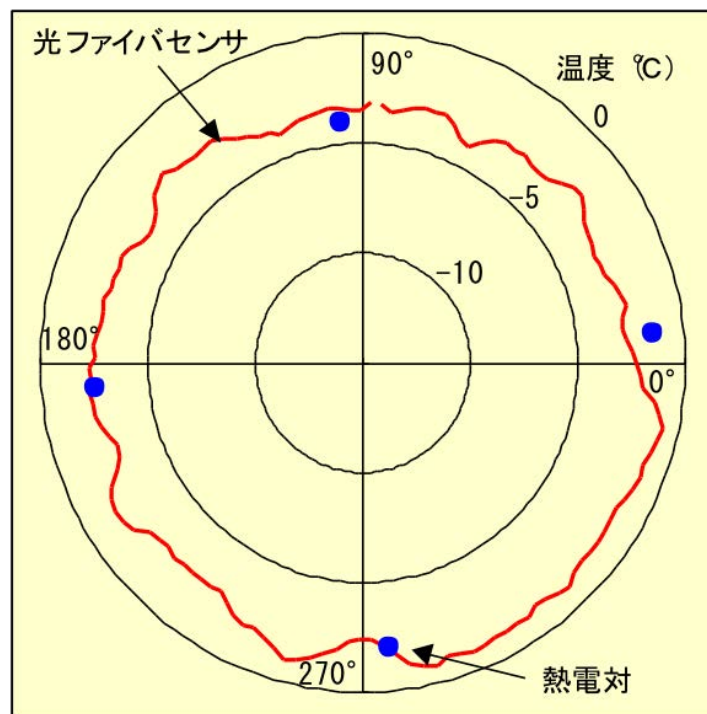


図 2.7 光ファイバ分布温度計測結果例（LNG タンク底版への適用）



### 2.3.2 後方散乱光（ブリルアン散乱光）を用いたひずみ分布計測

光ファイバに対してレーザー光などの強い光を入射した際には，光エネルギーの一部が熱エネルギーに変換されて光ファイバ中に熱振動が生じることが知られているが，その熱振動により光ファイバ中には超音波が併せて発生する．光ファイバ中に発生した超音波と入射光が干渉して，入射光のごく一部が波長変化を起こして後方散乱する現象がブリルアン散乱である．この後方散乱光は入射光との波長差が比較的小さい（周波数換算で約 11[GHz]）ために，レイリー散乱光との区別（分光）が難しく，その特性の把握が困難であった．

しかし，堀口ら [26] により光ファイバに加わるひずみや温度の変化によってブリルアン散乱光の波長が変化するという特性があることが見いだされたことにより，ブリルアン散乱光の活用を目指して多くの研究，開発が行われるようになった．

光ファイバに入射した光に対してブリルアン散乱光の周波数が変化するシフト量  $\nu_B$  は，光ファイバの屈折率を  $n$ ，光ファイバ内に発生した超音波の音速を  $V_A$ ，入射光の波長を  $\lambda$  とすると，式 2.1 で表される．

$$\nu_B = \frac{2nV_A}{\lambda} \quad (2.1)$$

ここで， $V_A$  は，光ファイバのヤング率を  $E$ ，ポアソン比を  $\kappa$ ，密度を  $\rho$  とすると，式 2.2 で示すことができる．

$$V_A = \sqrt{\frac{E(1 - \kappa)}{(1 + \kappa)(1 - 2\kappa)\rho}} \quad (2.2)$$

光ファイバの軸方向に伸び縮み応力（ひずみ変化）を与えると式 2.2 における  $\rho$  が変化し，温度変化を与えると  $E$  が変化する．さらに温度変化に応じて光ファイバの屈折率  $n$  も変化する．そのため， $\nu_B$  は光ファイバに働く応力（ひずみ）および温度の関数として以下の式 2.3 で示すことができる．

$$\nu_B(\varepsilon, T) = \nu_B(0) + \left( \frac{d\nu_B}{d\varepsilon} \right) \cdot \varepsilon + \left( \frac{d\nu_B}{dT} \right) \cdot T \quad (2.3)$$

ブリルアン散乱光の発生要因である光ファイバ中の超音波は，光の入射に沿って発生した後時間の経過とともに減衰し消失する．そのため，ブリルアン散乱光は図 2.8

に示すように  $\nu_B$  をピークとする波長（周波数）に広がりを持ったスペクトルとなる．すなわちブリルアン散乱光の強度  $g(\nu)$  は，式 2.4 に示すようなローレンツ型のスペクトルを示す [27]．

$$g(\nu) = \frac{\left(\frac{w}{2}\right)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + \left(\frac{w}{2}\right)^2} \cdot g_0 \quad (2.4)$$

ここで  $w$  はスペクトルの実効幅， $g_0$  はブリルアン散乱光のピーク光強度である．

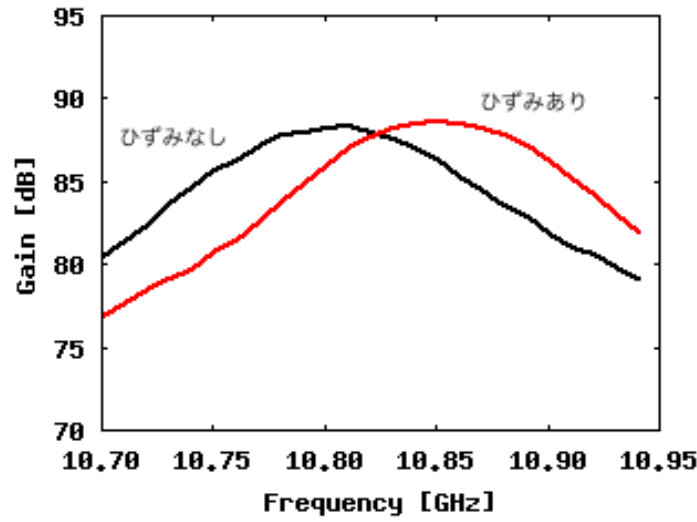


図 2.8 ブリルアン散乱光スペクトル（例）

倉嶋ら [28] は，波長  $\lambda = 1.55[\mu\text{m}]$  の光を通信用光ファイバ（シングルモード光ファイバ素線）に入射した場合の  $\nu_B(0)$  および  $\nu_B$  を以下の通り実験的に求めている．

$$\begin{aligned} \nu_B(0) &\doteq 10.85[\text{GHz}] \\ \frac{d\nu_B}{d\varepsilon} &\doteq 493[\text{MHz}/\%] \\ \frac{d\nu_B}{dT} &\doteq 1[\text{MHz}/^\circ\text{C}] \end{aligned}$$

上記の温度変化に関する感度をひずみ値に換算すると，

$$\frac{d\varepsilon}{dT} \doteq 0.002[\%/^\circ\text{C}]$$

となる．すなわち，既往の光ファイバセンサ（例えば FBG 方式）と同様に，ブリルアン散乱光を用いた光ファイバ分布計測においても，光ファイバ（センサ）がひずみ変化と温度変化の双方に対し波長変化（検知）することから，正確な計測を行うためには温度の較正を考慮する必要がある．

なお，光ファイバの長手方向に沿ってひずみ分布（あるいは温度分布）を一括して計測するためには，レイリー散乱光を用いて断線箇所の検知を行う OTDR 計測器や，ラマン散乱光を用いて温度分布計測を行う DTS と同様に，光ファイバに対してパルス光を入射して入射端に戻ってくるブリルアン後方散乱光の強度を時間的にサンプリングするブリルアン光時間領域解析技術（Brillouin Optical Time Domain Refractometry(BOTDR)）技術 [29] を用いる．

BOTDR 方式では，光ファイバにパルス光を入射してから時間  $t$  を経過した後に観測される後方散乱光が入射端からの距離  $z$  において発生したとすると，式 2.5 の関係が成り立つ．

$$z = \frac{ct}{2n} \quad (2.5)$$

ここで  $c$  は光速（ $\approx 2.99 \times 10^8$  [m/sec.]）である．入射するパルス光の幅（時間）を  $W$  とすると，式 2.6 で示す長さ  $\Delta z$  の範囲の後方散乱光は計測装置では同時に計測されるために，その間の距離の区別はできない．これが光ファイバ分布計測における空間分解能（距離分解能）であり，たとえば  $W = 10 \times 10^{-9}$  [sec.]（10 ナノ秒）の場合の空間分解能  $\Delta z$  は約 1[m] と求めることができる．

$$\Delta z = \frac{cW}{2n} \quad (2.6)$$

さらに，光ファイバに入射するパルス光の波長  $\nu$  を変化させて入射パルス光に応じた後方散乱光を重ね合わせると，式 2.4 および図 2.8 に示したようなブリルアン散乱光スペクトルがサンプリング時間，すなわち光ファイバの位置に応じて連続的に得られる．

これらの時間変化（距離変化）を含んだ後方散乱光スペクトルの強度が最大となる波長（ピーク波長）を求めることで，光ファイバの位置とひずみ（あるいは温度）の両方の結果が得られる．以上がブリルアン散乱光を用いた光ファイバ分布計測の概要である．

図 2.9 に上記の手法を実現し製品化された光ファイバ分布ひずみ計測（Distributed Strain Sensing:DSS）を行う計測装置 [30] の外観および諸元を示す。



発光波長	1.55 $\mu$ m帯					
測定周波数可変範囲	9.9~11.9GHz					
測定周波数掃引間隔	1、2、5、10、20、50MHz					
加算回数の設定	$2^{10}$ ~ $2^{24}$ 回					
歪み測定範囲 *1)	約-1.5~+1.5%					
パルス幅	10ns	20ns	50ns	100ns	200ns	
距離分解能 (m)	1	2	5	11	22	
ダイナミックレンジ (dB) *2)	2	6	10	13	15	歪み測定精度 $\pm 0.004\%$ ( $2\sigma$ ) 時
	—	—	8	11	13	歪み測定精度 $\pm 0.003\%$ ( $2\sigma$ ) 時
歪み測定精度 *3)	$\pm 0.004\%$ ( $2\sigma$ ) ( $\pm 0.01\%$ )		$\pm 0.003\%$ ( $2\sigma$ ) ( $\pm 0.005\%$ )			
再現性 *4)	<0.04%		<0.02%			

図 2.9 光ファイバ分布ひずみ計測器（外観，主要諸元）

## 2.4 光ファイバ分布計測の課題

光ファイバ分布計測は、敷設した光ファイバ全域のひずみ（あるいは温度）分布の計測を容易にかつ一括して取得可能な方式であるが、その一方で、センサ素子として用いる細径のガラス製の光ファイバは、光ファイバに加わる急激な曲げや引っ張りなどに弱く、特に通信用途に製造された光ファイバをセンサ素子として構造物などに設置する際には、破損や破断が生じる恐れが極めて大きい。

さらに図 2.10 に示すように、強アルカリ性環境であるコンクリート中へ光ファイバを埋設すると、通信用光ファイバの保護被覆に用いられている紫外線硬化樹脂は数時間で溶解してしまい、光ファイバのガラス表面が保護被覆が無い状態でコンクリート中に露出する状態となる。

保護被覆なしで露出したガラス表面には細かい傷が発生しやすく、ひとたびガラス表面に発生した傷は光ファイバに加わる曲げや伸び縮みなどで急速に進展して、破断に至る危険性が高い。

そのため、建築・土木構造物にセンサを設置し長期にわたる計測を行うためには、光ファイバに対してコンクリート中などでも化学的に安定した材料を用いた保護被覆を施すことが必要となる。

（なお、一般に広く用いられている通信用光ファイバケーブルは、光ファイバを樹脂や金属などで保護したケーブル構造となっており、外力の影響をケーブル内部の光ファイバに極力及ぼさないように設計されている。そのため通信用光ファイバケーブルを、ひずみセンサ素子として転用することは困難である。）

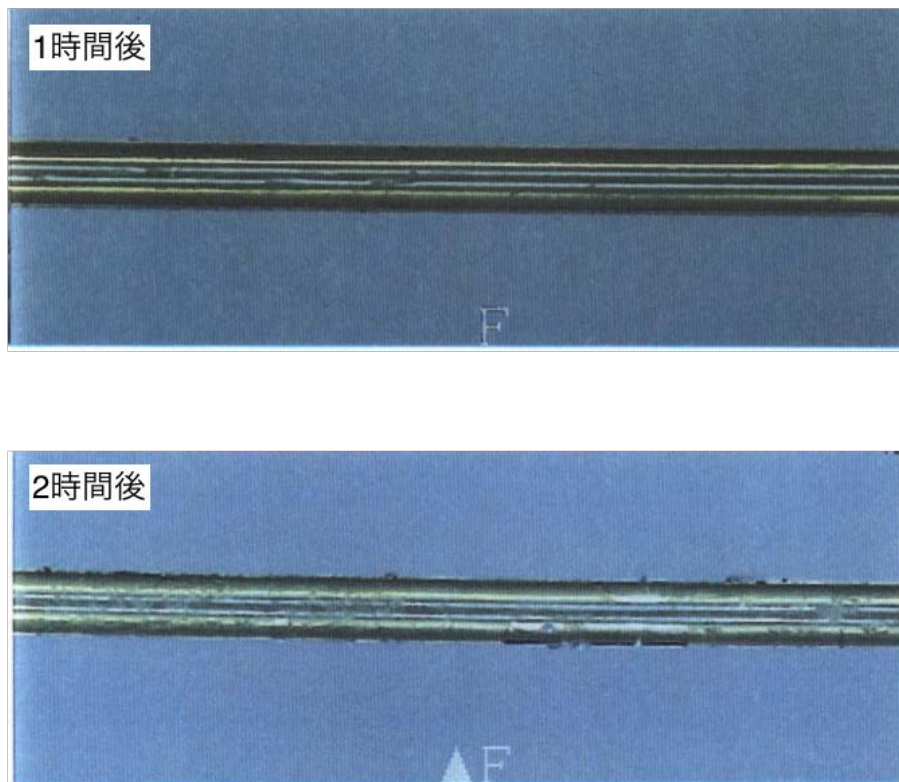


図 2.10 強アルカリ性溶液中の通信用光ファイバの状態

また構造物に設置し計測を行えるよう保護を施した光ファイバセンサは，その機械的な特性が通信用の光ファイバとは異なるため，倉嶋らが求めた基本特性すなわち初期値および感度（ $\nu_B(0)$  および  $\nu_B$ ）[28] をそのまま用いることは出来ない．そのため，新たに光ファイバセンサを開発する際には，これらの基本特性（初期値と感度）を改めて検定する必要がある．

また，製作した光ファイバセンサを建築・土木構造物に設置した後，長期にわたり破損や破断がなく安定した計測が行うことができるよう，これらのセンサの健全性診断を逐次行い，さらにセンサの余寿命（計測に用いることが可能な期間）を推定することも併せて検討する必要がある．

## 2.5 構造物に対する光ファイバ分布計測

これらの課題を踏まえて、光ファイバ分布計測を構造物に対して適用するための光ファイバセンサの製作および計測法を検討し、併せて光ファイバ分布計測で得た計測データの処理・分析法を示す。

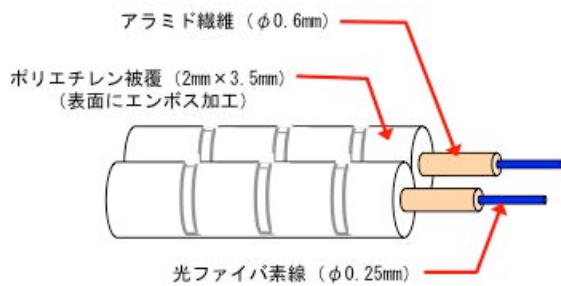
### 2.5.1 構造物用光ファイバセンサの製作と基本特性の取得

構造物に対して安全かつ容易に設置することができ、特にコンクリート中に埋設した環境下においてもひずみ変化および温度変化を正確に捉えることを目的として、図 2.11 および図 2.12 に示す光ファイバひずみセンサと光ファイバ温度センサを製作した。

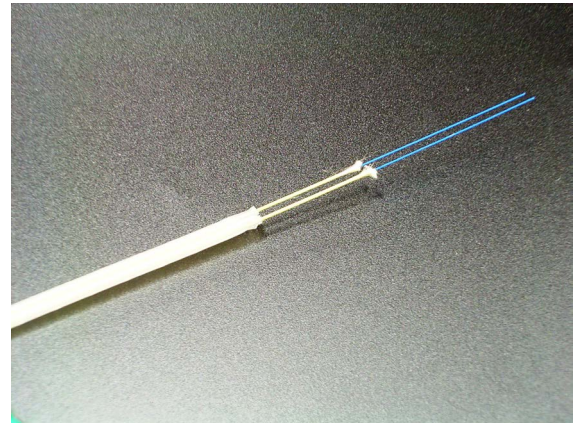
図 2.11 に示す光ファイバひずみセンサは、紫外線硬化樹脂で被覆したシングルモード光ファイバ素線（UV 素線：直径約  $250[\mu\text{m}]$ ）に対してアラミド繊維とポリエチレンで保護した構造 [31] になっており、さらに 2 本の光ファイバセンサを並行に配した形状となっている。さらに、コンクリート中に埋設した際に付着面積を増やすためエンボス加工を施しており、コンクリート打設中などに 1 本の光ファイバが破損した際においても、残りの 1 本を用いて計測を継続して行うことができるように冗長性を高めている。

図 2.12 に示す光ファイバ温度センサは、ポリエチレン被覆を施したステンレス細管に、光ファイバひずみセンサと同様に紫外線硬化樹脂で被覆したシングルモード光ファイバ素線を内挿した構造である [32]。このセンサは主に海底に敷設されている長距離デジタル通信用光ファイバケーブルの構造を参考としており、光ファイバケーブルの伸び縮みは光ファイバには影響を及ぼさずに、温度変化のみが伝搬することを想定している。

いずれのセンサも、従来のひずみ計測および振動計測などで用いる電線（銅線）と比較し、ひずみセンサの重量は  $6[\text{kg}/\text{km}]$ 、温度センサは  $18[\text{kg}/\text{km}]$  と非常に軽量なため、構造物への設置作業が大幅に軽減できることが見込める。

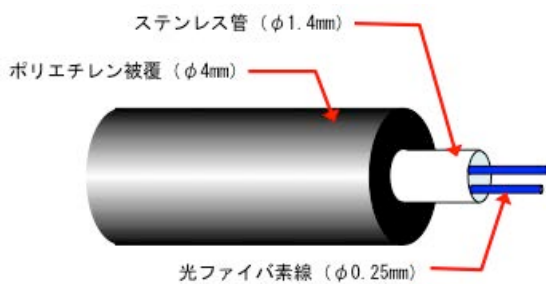


(a) 構造



(b) 外観

図 2.11 光ファイバひずみセンサの構造と外観



(a) 構造



(b) 外観

図 2.12 光ファイバ温度センサの構造と外観

前節で示した通り，通信用光ファイバケーブルにおけるひずみや温度変化に対する初期値および感度（式 (2.3) における  $\frac{d\nu_B}{d\epsilon}$  および  $\frac{d\nu_B}{dT}$ ）に対し，センサ用に新たに開発された光ファイバ（センサ）の感度を求めた事例は少なく，特にプレストレストコンクリート中のひずみ計測のように，センサに圧縮ひずみが加わる環境での感度を求めた事例はない。

そこでまず，図 2.11 および図 2.12 の各センサを張力が加わらない状態で恒温槽の中に設置して温度変化を与えてブリルアン散乱光波長を取得した．結果を図 2.13 に示し，各センサの 20℃におけるブリルアン散乱光波長を初期値  $\nu_B(0)$ ，温度に対する感



度をそれぞれ表 2.1 のように求めた。温度センサは光ファイバ素線（UV 素線）の感度とほぼ等しく，ひずみセンサはポリエチレン被覆部の線膨張率が UV 素線に比べ大きい  
ため高い感度を示している。

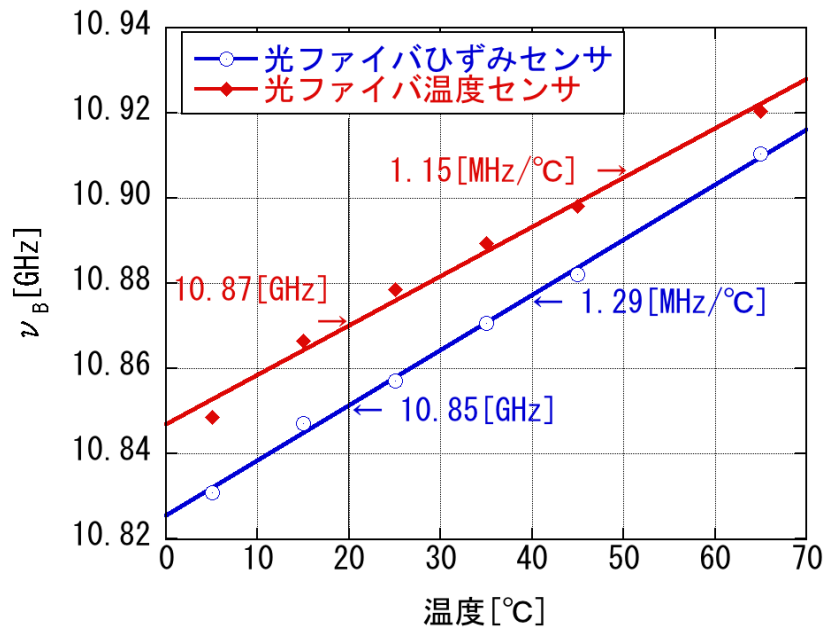


図 2.13 光ファイバセンサ単体の温度特性（感度）

表 2.1 光ファイバセンサの感度（単体）

	$\nu_B(0)$	温度感度 ( $\frac{d\nu_B}{dT}$ )
ひずみセンサ	10.85 [GHz]	1.29 [MHz/°C]
温度センサ	10.87 [GHz]	1.15 [MHz/°C]

次に，図 2.14 に示す小型コンクリート試験体（PC 試験体）に対し図 2.11，図 2.12 の光ファイバセンサと従来の温度計（熱電体）とひずみゲージを埋設し，実際の PC 構造物の施工時の工程を模擬したスケジュールでコンクリート打設からプレストレス（圧縮力）導入を行い，さらに昼夜の温度差を模した環境温度変化を与えることによって光ファイバセンサの感度を求めた。

図 2.16 に，本試験を通じた従来センサによる温度（熱電対）とひずみ（ひずみゲージ）の計測値と各々の光ファイバセンサの計測値を示す。

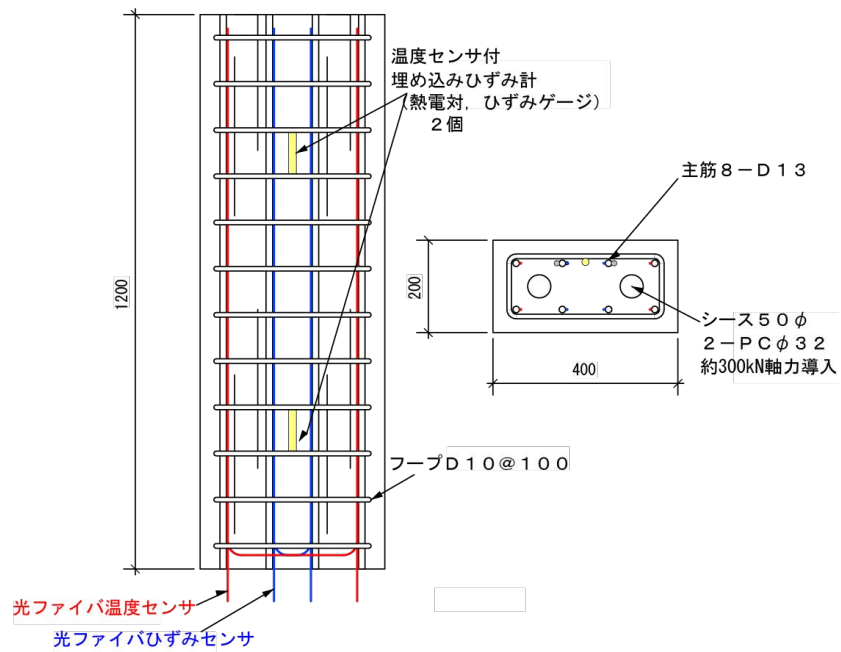
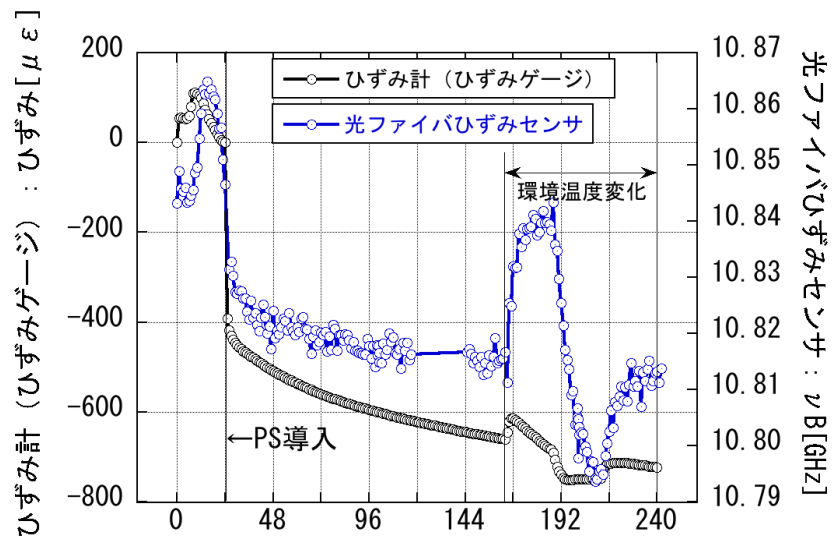


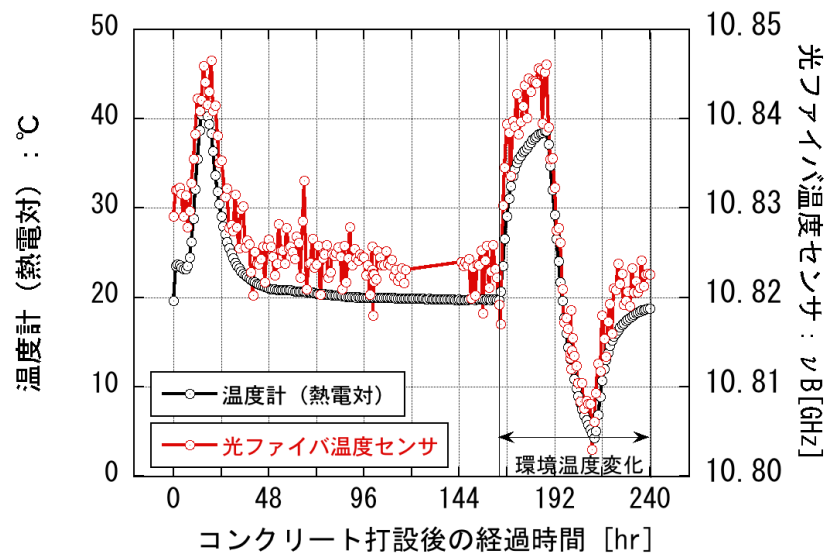
図 2.14 光ファイバセンサ適用 PC 試験体



図 2.15 光ファイバセンサ適用 PC 試験の状況

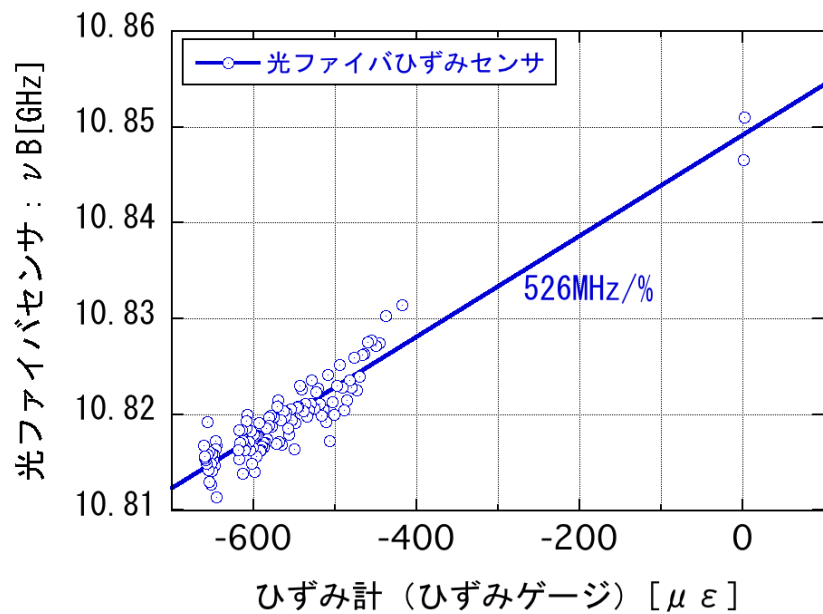


(a) ひずみセンサ

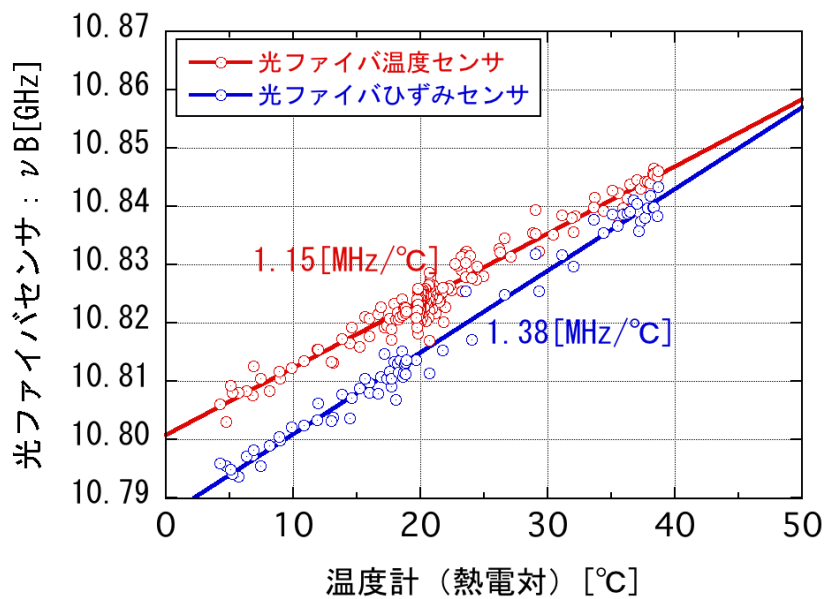


(b) 温度センサ

図 2.16 PC 試験体のひずみ変化と温度変化に対する光ファイバセンサの後方散乱光波長の変動



(a) ひずみセンサ



(b) 温度センサ

図 2.17 PC 試験体中の光ファイバセンサのひずみ・温度特性 (感度)

プレストレス導入期間におけるひずみ (ひずみゲージ) 値と光ファイバひずみセンサの計測値, さらに環境温度変化を与えた期間における温度 (熱電対) と光ファイバ温度センサの計測値を図 2.17 に示す。

各々の光ファイバセンサのひずみ感度および温度感度は、表 2.2 に示す通り求められる。なお、光ファイバひずみセンサの温度感度は周囲のコンクリートから拘束を受けたことによりセンサ単体での感度（表 2.1）と異なる値となる。

一方、光ファイバ温度センサは周囲のコンクリートの有無、さらにひずみ変化に対する感度の影響はなく、PC 構造物などセンサに圧縮が加わる環境への適用だが、光ファイバ温度センサで得た温度計測値を用いて光ファイバひずみセンサの温度較正を行うことが可能となる。

なお、開発した光ファイバセンサの測定精度は、計測機器の測定精度と同等の  $1[\mu\epsilon]$ （ひずみ値）および約  $0.03[^\circ\text{C}]$ （温度換算）であるが、実際の計測ではブリルアン散乱光の強度が微弱なため計測機器内で加算処理（平均処理）を行うため、実効上の計測精度は数十～ $100[\mu\epsilon]$ （ひずみ値）、 $3[^\circ\text{C}]$ （温度換算）程度となる。

表 2.2 光ファイバセンサの感度（PC 試験体）

	ひずみ感度 ( $\frac{d\nu_B}{d\epsilon}$ )	温度感度 ( $\frac{d\nu_B}{dT}$ )
ひずみセンサ	526 [MHz/%]	1.38 [MHz/ $^\circ\text{C}$ ]
温度センサ	-	1.15 [MHz/ $^\circ\text{C}$ ]

## 2.5.2 光ファイバセンサの長期耐久性に関する検討

光ファイバセンサを計測対象に設置した後に長期にわたる耐久性を検証するためには、センサに破断や曲げ等が生じて後方散乱光が受信できなくなり計測不能となるような障害が生じないように、継続して信号監視を行う必要がある。さらに、将来にわたりセンサに破断が生じないか寿命推定（余寿命推定）を逐次行うことが必要である。

光ファイバセンサの寿命推定を行うためには、Komachiya ら [33]、満永ら [34] が示した通信用光ファイバの長期性能保証手法であるスクリーニング試験法の導入が有用である。スクリーニング試験法とは、製造直後の光ファイバに一定の応力を加えて光ファイバ製造時に発生した傷や初期欠陥などによる強度低下部分（いわゆる不良部分）を破断させて除去する方法である。

光ファイバの製造直後に加える初期ひずみ（スクリーニングひずみ）を  $\epsilon_p$ 、初期ひずみを付加する時間（スクリーニング時間）を  $t_p$  と設定し、通信用光ファイバの寿命

推定に用いるパラメータを表 2.3 のように導入すると，光ファイバ設置後の使用中に加わるひずみ  $\varepsilon_s$  の環境における光ファイバの寿命  $T$  は，式 2.7 を用いて推定することができるが三田ら [35] により示されている．

光ファイバに対して常に伸びひずみ加わるような環境で計測を長期間行うためには，スクリーニング条件（スクリーニングひずみ  $\varepsilon_p$  および  $t_p$ ）を，通信用途の光ファイバに比べ過度に設定する必要がある．しかし，光ファイバひずみセンサを適用する環境を主に圧縮ひずみ（ $\varepsilon_s < 0$ ）が加わるコンクリート内部と想定する場合，同センサに用いる光ファイバ素線（UV 素線）のスクリーニング条件を過度に設定する必要はない．

そのため光ファイバセンサのスクリーニング条件は，通信用光ファイバと同等の  $\varepsilon_p=1.0[\%]$  および  $t_p=1.0[\text{sec.}]$  とした．

この条件における光ファイバセンサの推定寿命は図 2.18 に示す通り求めることができる．図 2.18 は，光ファイバセンサに常時加わるひずみ  $\varepsilon_s$  が  $0.2[\%]$  以内に抑えられていれば，光ファイバの全長  $1[\text{km}]$  を通じてセンサの破断が 20 年間にわたりないこと推定できることを示している．

なお，光ファイバセンサに  $0.45[\%]$  の引っ張りひずみが常時加わる環境で 20 年の使用を想定するためには，図 2.18 中の参考値として示したように，光ファイバ製造時のスクリーニングひずみを通信用光ファイバの製造時よりも厳しい  $\varepsilon_p=2.0[\%]$  と設定する必要がある．

$$T = \left\{ \left[ 1 - \frac{\ln(1 - F_s)}{LN_p} \right]^{(n+1)/m} - 1 \right\} (\varepsilon_p / \varepsilon_s)^n t_p \quad (2.7)$$

表 2.3 光ファイバセンサの寿命推定のパラメータ

		単位	値
破断確率	$F_s$		$1.0 \times 10^{-7}$
センサの全長	$L$	km	1.0
破断箇所数	$N_p$		1
ワイブル分布の傾き	$m$		4
クラック成長パラメータ	$n$		23.9

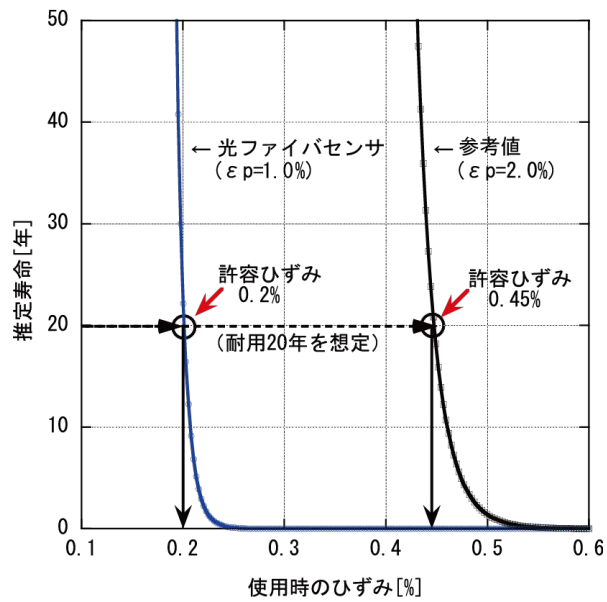


図 2.18 光ファイバセンサの推定寿命（使用可能期間）

## 2.6 橋りょうにおける光ファイバ分布計測の適用

### 2.6.1 適用対象とセンサ設置の概要

光ファイバ分布計測の適用対象としたプレストレストコンクリート斜張橋（B 橋：支間長 435m）を図 2.19 に示す．B 橋の主桁の施工は移動型枠を用いた張出し架設工法を用いており，図 2.19 の主径間の両側の主塔（P3 および P4）から，中央径間側に 6.5m ずつ 32 ブロック，側径間側に 31 ブロックの主桁延伸を行い，その後側径間側，主径間（中央）の順に閉合する．

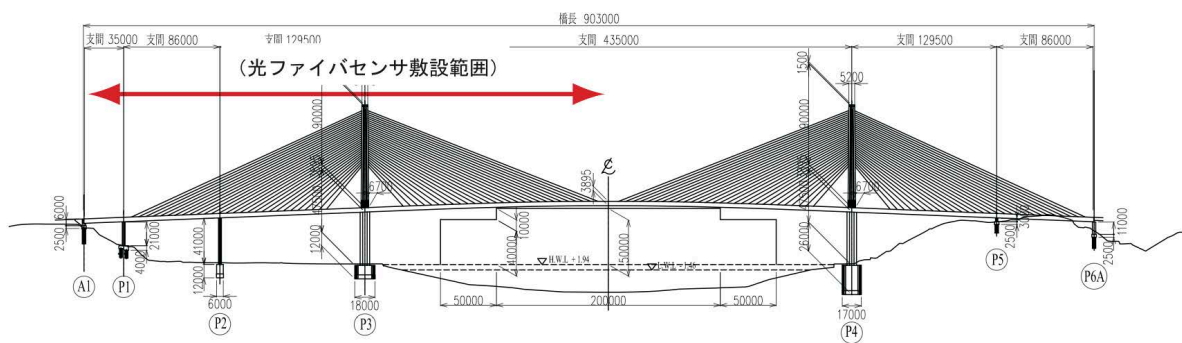
B 橋では主桁延伸工程期間全般にわたって測量による主桁のたわみ計測とひずみゲージ（鉄筋ひずみ計），熱電対（温度計），傾斜計，風向風速計，加速度計など，200 点以上のセンサを使用した施工時計測システムを使用している [36]．

B 橋の施工時計測で最も重要な計測は，主桁延伸工程を通じた主桁の線形管理である．延伸部位へのコンクリート打設から養生期間中の型枠移動，斜材（ケーブル）の緊張といった一連の工程で主桁が適正なたわみ（線形）を保っているかどうか逐次監視を行う必要がある．





(a) 外観



(b) 側面図

図 2.19 適用対象とした PC 斜張橋（外観・側面図）

そのため施工時の主桁の線形管理を光ファイバ分布計測で行うために、前節で示した光ファイバひずみセンサおよび光ファイバ温度センサを図 2.19 の主塔 P3 側の主桁（主径間側および側径間側）全域にわたって設置した。

光ファイバひずみセンサと光ファイバ温度センサは同じ箇所に行って設置しており、光ファイバひずみセンサで得たひずみ計測値を、同じ位置に設置した光ファイバ温度センサで得る温度計測値を用いて温度較正を行う。

設置した光ファイバセンサの本数は図 2.20 に示す通り、後述する主桁の線形（たわみ）を求めることを目的として上床版および下床版に 2 系統ずつ、計 8 系統（16 本）とした。

光ファイバセンサの設置は、図 2.21 および図 2.22 に示す通り主桁上下床版の橋軸方向に沿った鉄筋に、耐候性ナイロン製のケーブルタイを用いて約 0.3[m] 毎に結束す

る方式とした。本方式は1回の作業時間はほぼ1時間にも満たず、通常のひずみゲージや熱電対を用いる計測のセンサ設置と比較して非常に効率的に行うことができるといえる。

また、いずれのセンサもケーブル終端で2本の光ファイバ素線を折り返して融着してループ状にすることにより、1箇所の計測位置に対応する計測値を2度得ることが出来るよう設定した。そのため、もし2つの計測値が大きく異なっていた場合は、センサあるいは計測機器に何らかの異常が発生した可能性があるなどの異常検知（計測システムの自己診断）が行える可能性がある。また、光ファイバ素線のいずれか1本が破断した場合でも、残りのセンサ始端を計測機器に接続すれば、センサ全長にわたって途切れることなく計測が継続できる冗長性が併せて期待できる [37]。

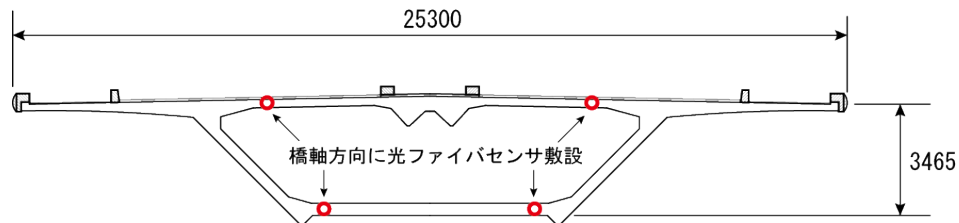


図 2.20 主桁光ファイバセンサ設置位置（断面図）



図 2.21 主桁上床版への光ファイバセンサの設置状況

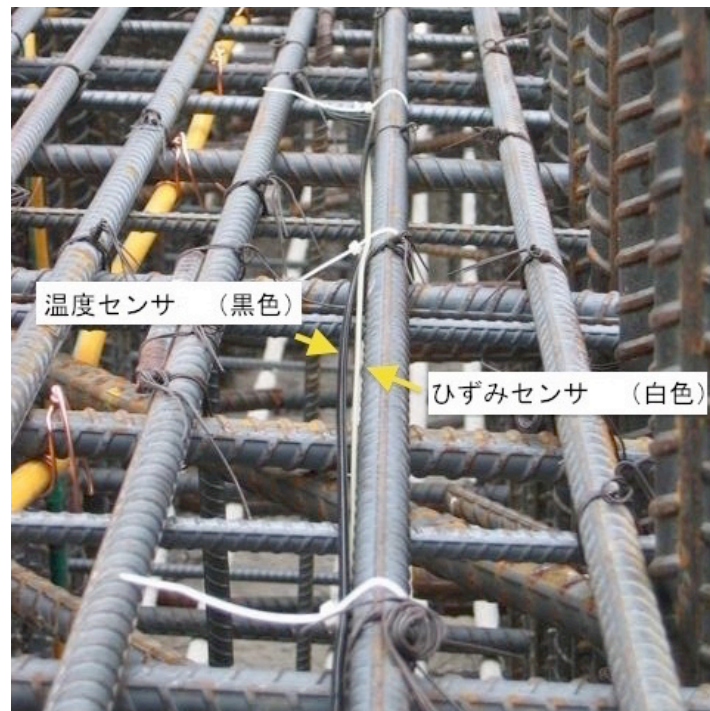


図 2.22 光ファイバセンサの設置（主桁配筋への固定）

全ての光ファイバセンサは，光切り替えスイッチを介して計測装置に接続し，ひずみと温度の計測を一つの計測装置で行えるよう設定した．なお全ての光ファイバセンサの計測に必要な時間は，センサ（系統）の切り替えや計測値を PC に保存するために要する時間などを含めて 1 時間弱で完了する．

これら B 橋に設置した光ファイバ計測システムの概要図を図 2.23 に示す．（なお，図 2.23 は計測システム設置当初に検証用に用いた光ファイバ分布温度計測システム（DTS: Distributed Temperature Sensing）の計測装置を含んでいる．）



## 2.6.2 光ファイバ分布計測における位置合わせ（マッピング）

光ファイバセンサを構造物に敷設する際には，計測装置に示される計測位置（座標）と，構造物の位置を表す座標（直交座標）との位置合わせが必要となる．そのため以下の手順で位置合わせを行った．

- 光ファイバ計測装置の始端（座標原点）から，構造物にセンサを埋設した箇所を含む全ての機器，接続点などを図 2.24 に示す通り列挙する．
- 構造物埋設部から光ファイバセンサが取り出されている箇所（未だ埋設されていない箇所）の座標を図面等から読み取り，それらを  $(x_o, y_o, z_o), (x_i, y_i, z_i)$  とする．
- これら  $(x_o, y_o, z_o), (x_i, y_i, z_i)$  からセンサの長さが  $L_0$  だけ離れた位置（点線箇所）に適切なひずみ変化あるいは温度変化を与え，同時に光ファイバセンサ計測器でひずみ分布計測を行う．
- ひずみ変化あるいは温度変化を与えた箇所を図 2.26 の計測画面から読み取り，それらを  $L_1, L_2$  とする．
- これら  $L_1, L_2$  から  $L_0$  を差し引いた長さが  $(x_o, y_o, z_o), (x_i, y_i, z_i)$  に対応する光ファイバセンサの長さ（1次元座標）である．

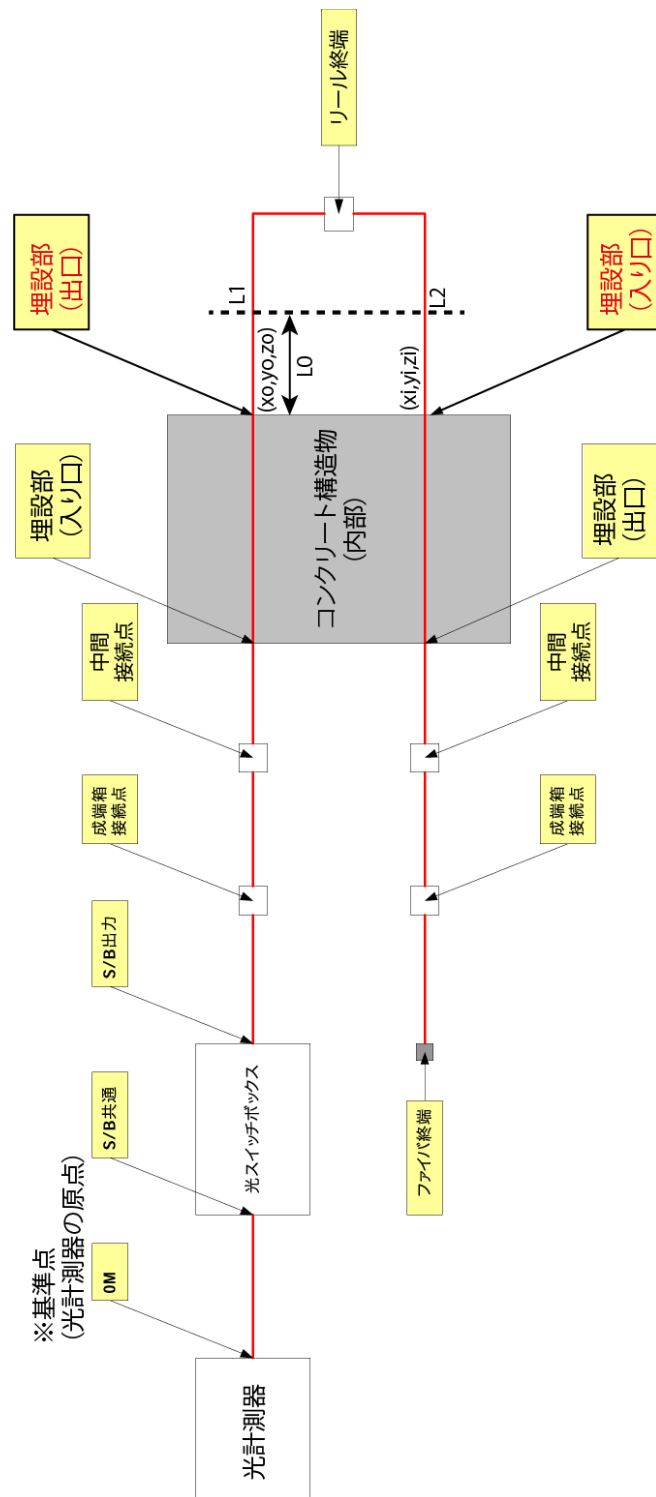


図 2.24 光ファイバ分布計測における位置合わせ





図 2.25 光ファイバ分布計測における位置合わせ（実施状況）



図 2.26 光ファイバ分布計測における位置合わせ（計測結果）

### 2.6.3 計測結果（主桁のひずみと温度の計測例）

主桁側径間打設ブロック 04（P3 橋脚から側径間側に 26[m]）における光ファイバひずみセンサおよび光ファイバ温度センサによる計測値を，同ブロックに設置したひずみ計（ひずみゲージ）および温度計（熱電対）の計測値と併記して図 2.27 に示す．なお，光ファイバひずみセンサによる計測値は，同一箇所に設置した光ファイバ温度センサの計測値と表 2.2 の値を用いて温度較正している．

図 2.27 の結果から，光ファイバセンサの計測値は計測機器の内部処理（加算処理）などに起因すると思われるばらつき（約  $100[\mu\epsilon]$ ）がみられ，短期間の計測では従来のひずみ計（ひずみゲージ）および温度計（熱電対）の計測値と差が見られるが，図 2.27 を通じた計測期間（28 日間）の経時変化の傾向は概ね等しいと考えられる．

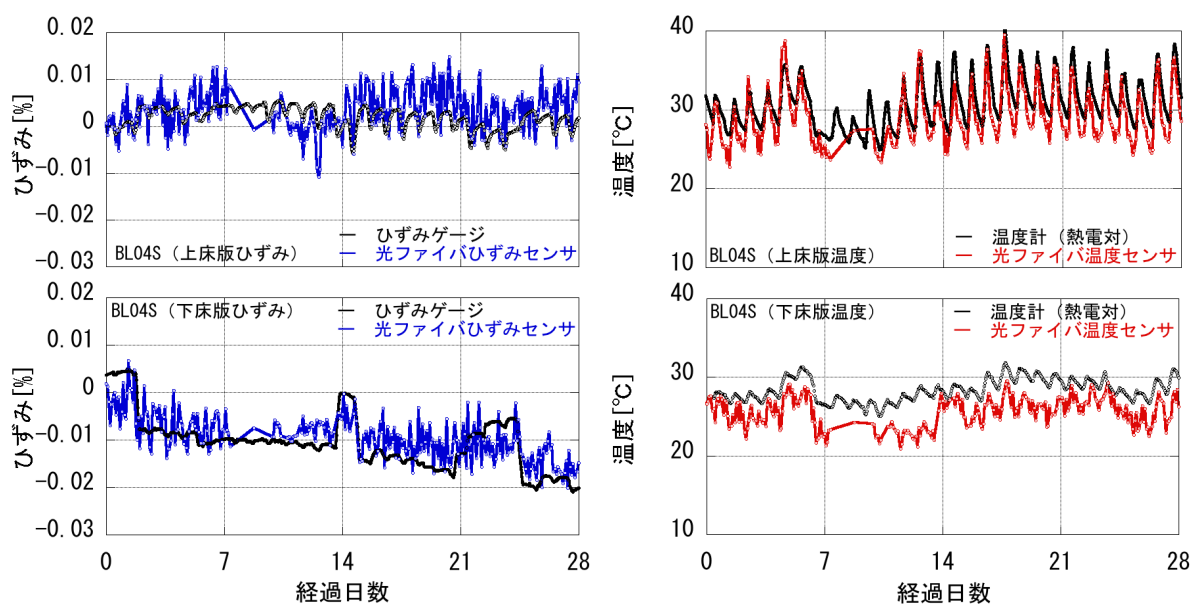


図 2.27 光ファイバセンサとひずみゲージ，熱電対との計測値比較



#### 2.6.4 主桁の線形（たわみ）計測

上下床版に沿って敷設した光ファイバひずみセンサの計測値から，主桁たわみ曲線を求めた．

図 2.30 に主桁打設ブロック 25（主塔 P3 の橋脚から両径間側に 172.5[m](図 2.28)) の主桁延伸各工程，すなわちコンクリート打設，型枠の移動および斜材（ケーブル）の緊張時の各々の主桁の線形（たわみ）を示す．なお，各々のたわみ曲線を求めるために基準となる初期ひずみ値は，主桁打設ブロック 24（図 2.28 の一つ前（主塔 P3 の橋脚から 166.0[m]）の主桁打設ブロック）完了後のひずみ計測値とした．



図 2.28 主桁施工状況（ブロック 25）

主桁のたわみ曲線を求めるためには，主桁を連続梁としてモデル化し，主桁と各橋脚との締結，併合を境界条件として反映させる計算を行う．

本節で示す主桁延伸工程ブロック 25 においては，主桁と図 2.28 に示す P2 橋脚が締結されている状態である．図 2.29 に示す主塔 P3 の基部を原点とした鉛直上方を  $y$  軸，主径間方向を  $x$  軸の座標系を設定し，主桁上面のひずみ値を  $\varepsilon_u$ ，下面のひずみ計測値を  $\varepsilon_d$ ，主桁断面の高さを  $h$  とおくと，主桁の線形（たわみ）は，式 (2.8)，式 (2.9)

のように表すことが出来る．（P3 橋脚から P2 橋脚までの距離を  $L_2$  とし， $h$  および  $L_2$  の値を表 2.4 に示した．）

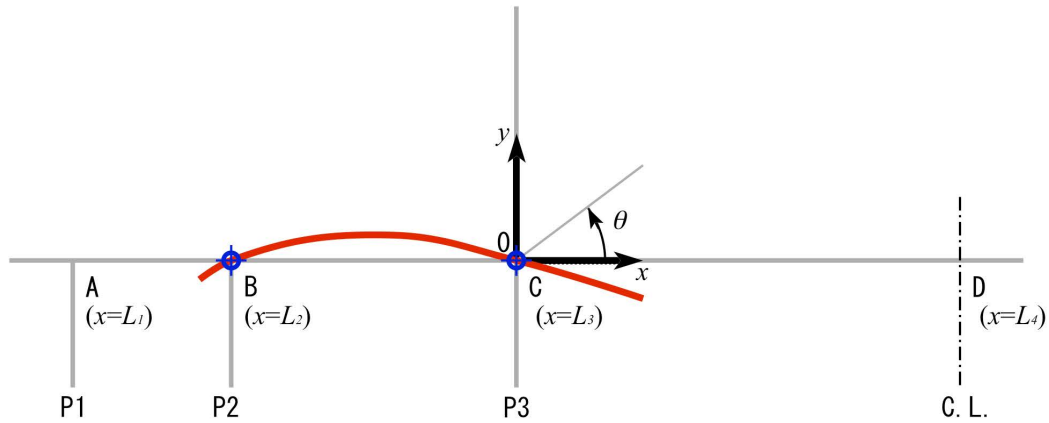


図 2.29 主桁線形を求めるための座標系

$$y = -G(0, x) + \left\{ \frac{1}{L_2} G(0, L_2) \right\} x \quad (2.8)$$

$$G(a, b) = - \iint_a^b \frac{\varepsilon_u(x) - \varepsilon_d(x)}{h} dx dx \quad (2.9)$$

表 2.4 主桁線形（たわみ）を求めるためのパラメータ

種別	値	
主桁断面高さ	$h$	3.4[m]
P3 橋脚～P2 橋脚間の距離	$L_2$	130[m]

図 2.30 より，光ファイバひずみセンサの計測値から求めた主桁たわみ曲線が，主桁延伸各工程に伴う荷重変化に沿って変化していることが確認できる．

延伸ブロックに対するコンクリート打設から次ブロックへの型枠移動を行い，斜材を緊張する各工程で，主径間の主桁で最大 44[cm]，側径間では最大 13[cm] のたわみが

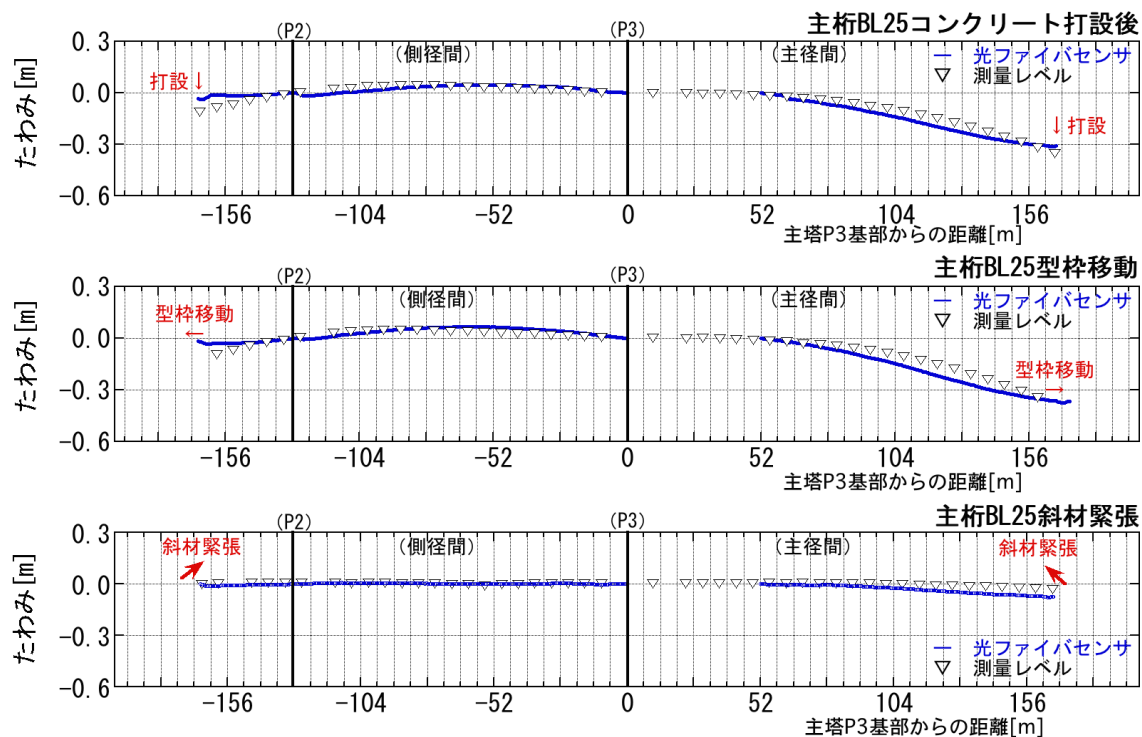


図 2.30 光ファイバセンサによる主桁たわみ計測結果

求められた。この光ファイバひずみセンサで求めた主桁線形（たわみ）曲線と測量レベルとの差は、最大で約 8[cm] であった。

光ファイバセンサで求めた主桁線形（たわみ）量と測量レベルの差は、主径間上床版の光ファイバセンサが主桁打設ブロック 06 の打設後に破断したために新たな光ファイバセンサを打設ブロック 08 から新たに敷設したことによるもので、打設ブロック 01 から打設ブロック 08 の区間（約 50[m]）の区間をたわみ量の計算から除外せざるを得なかったことが主因である。一方、側径間側では光ファイバセンサの計測値から求めた主桁たわみ曲線と測量レベルはほぼ同じ値を示しており、良好な相関が得られている。

## 2.6.5 完成後（供用時）の計測

主桁側径間打設ブロック 04 上下床版の光ファイバひずみセンサおよび光ファイバ温度センサのセンサ設置直後（施工時）から完成後供用時を通した計測値の推移を図 2.31、図 2.32 および図 2.33、図 2.34 に示す。

図 2.31 および図 2.33 中の計測データの欠落は、主に計測装置の取り外し点検校正を行ったことが原因であるが、図 2.31 および図 2.33 中の一部では、双方のひずみ計測値に大きな差がみられないが後方散乱光の強度低下がみられる期間がある。もし図 2.31 あるいは図 2.33 のいずれか一方のみの後方散乱光に強度低下が見られる場合は光ファイバセンサの損傷などの可能性があるが、この場合は双方の光ファイバセンサからの後方散乱光の低下がみらるため、図 2.35 に示すように、散乱光の強度低下が発生しているのかかわらず、後方散乱光（ブリルアン散乱光スペクトル）のから算出するひずみ計測値（式 (2.4) を用いたカーブフィッティングの結果）には大きな変化がみられない状態である。

上記の通り、光ファイバセンサに破断や急激な曲げなどが加わり損傷が生じた場合は、明らかにその光ファイバセンサの計測値のみに異常が現れる。そのため、この期間においては計測装置、あるいは図 2.23 に示す光切り替えスイッチなどの、計測装置と光ファイバセンサの間に接続している機器や部品に何らかの異常が発生した可能性がある。

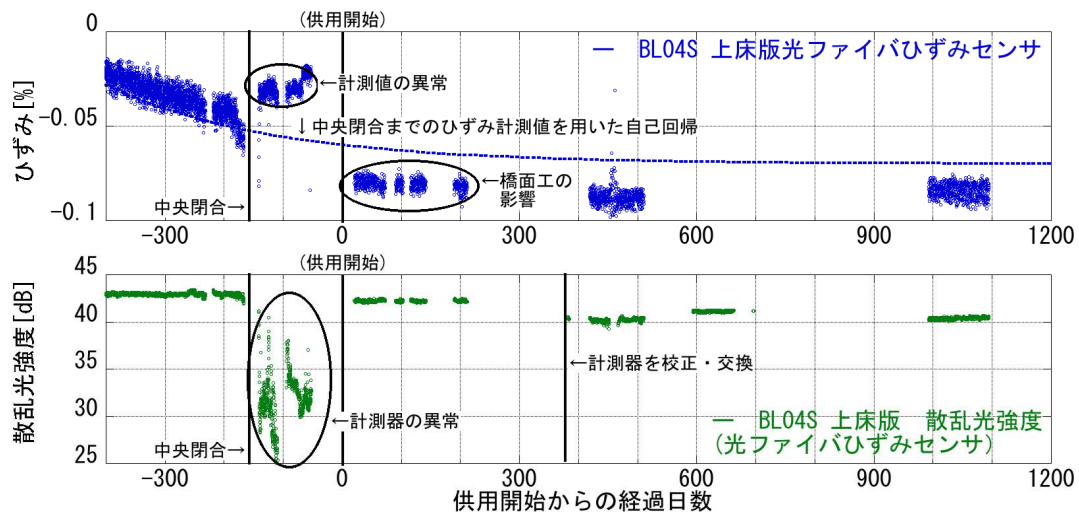


図 2.31 主桁上床版のひずみの経時変化と散乱光強度

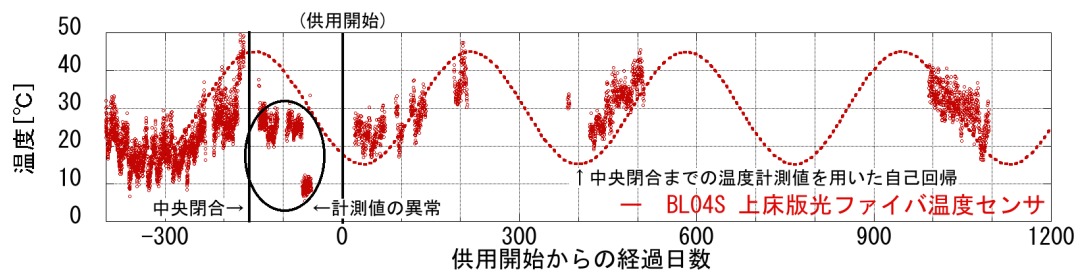


図 2.32 主桁上床版の温度の経時変化

また、図 2.31 に示すひずみ計測値は、施工期間中のひずみ計測値から自己回帰した予測値（点線）に対して、完成後供用時のひずみ計測値がわずかに圧縮側に推移していることがわかる。

これは、対象橋りょうの竣工前に、主桁上面に防水シートやアスファルト舗装を施す橋面工を行ない、さらに照明施設などを設置したことによって主桁の自重が増大した影響と考えられる。

図 2.32 に示す温度計測値は、長期的に見るとおおむね周期的（点線）に推移していると認められる。

これらの主桁上床版における傾向は図 2.33、図 2.34 に示す主桁下床版における計測値においても同様である。下床版においては橋面工の影響はないが、計測器の異常に伴う散乱光強度の低下はみられ、温度変化の周期的な推移についても認められる。

以上のひずみ計測値，温度計測値の僅かな動きや，周期的な推移からのずれを早期に捉えるためには，計測値の波長変化（ひずみ変化および温度変化）のみならず，散乱光強度，あるいはブリルアン散乱光スペクトルの変化も注視していく必要がある。

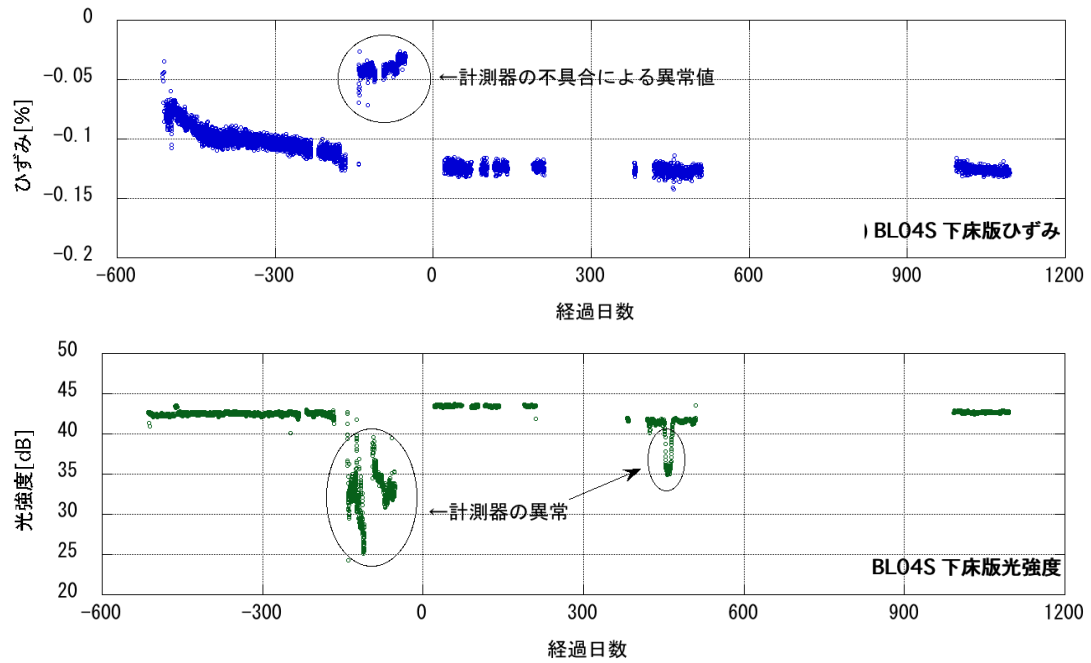


図 2.33 主桁下床版のひずみの経時変化と散乱光強度

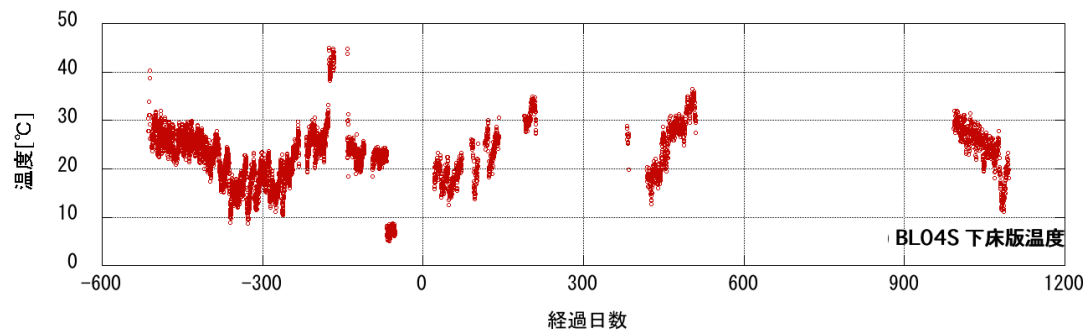


図 2.34 主桁下床版の温度の経時変化

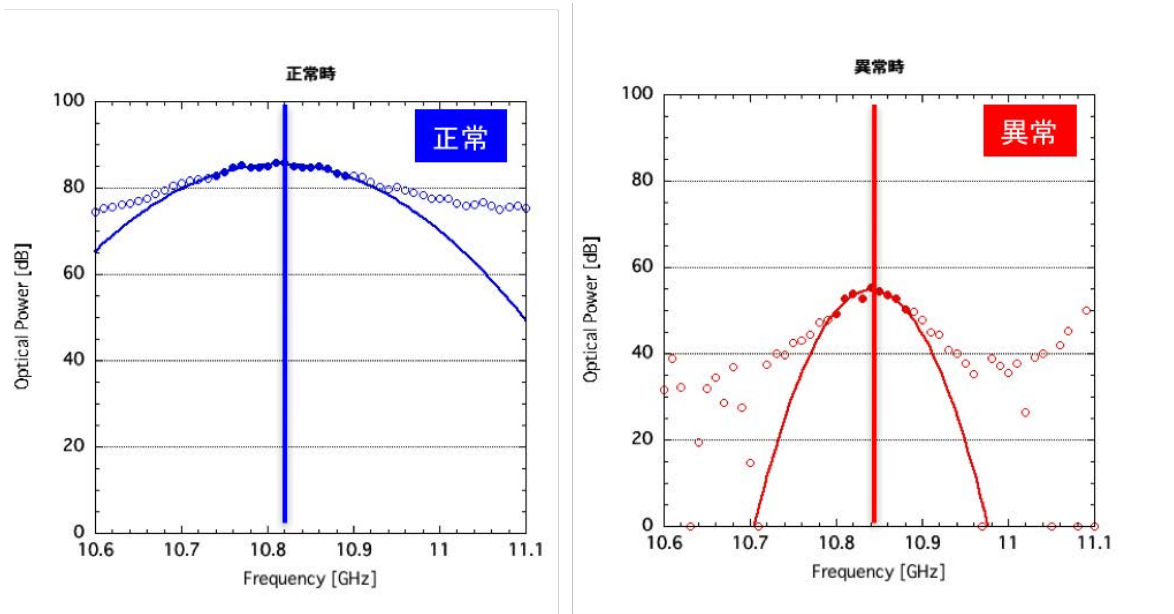


図 2.35 散乱光強度の低下とひずみ値の関連

## 2.6.6 光ファイバセンサの長期耐久性に関する検証

図 2.31 に示すひずみ計測値（および他の光ファイバひずみセンサの計測値）の推移から，光ファイバセンサ使用中に加わる伸びひずみ値  $\varepsilon_s$  は最大 0.08[%] であり，図 2.18 で検討した許容ひずみ値（0.2[%]）以下である．ひずみ計測値が許容ひずみ値以内に収まっているか計測期間中は，逐次留意し確認する必要があるが，本計測において設置した光ファイバセンサは 20 年以上の使用（長期耐久性）を期待できるといえる．

## 2.7 まとめ

第2章で得られた知見を以下の通りまとめる。

まず、構造物に安全かつ簡便に設置できる光ファイバひずみセンサおよび光ファイバ温度センサを開発し、その基本特性（初期値および感度）を、光ファイバセンサ単体に温度変化を与える基本試験と、小型コンクリート試験体へ適用し圧縮力および温度変化を与える基礎試験の適用を通じて取得した。

次に、開発した光ファイバセンサを、長大PC斜張橋の主桁施工時から完成後の供用期間を通じて適用した。

光ファイバセンサの設置は、従来のひずみゲージあるいは熱電対と比較し簡便に行うことができ、さらに光ファイバセンサの計測位置と、構造物の位置を対照するための位置合わせ（マッピング）は、光ファイバの長さ（位置）が既知となる箇所に温度変化を与えることで対照できることを示した。

光ファイバ分布計測におけるひずみ計測値および温度計測値は、一部にばらつきがみられるために、同一箇所に設置したひずみゲージや熱電対の計測値と差が見られるが、経時的には概ね同様な傾向をもち、主桁の上下床版に設置した光ファイバセンサひずみセンサの計測値から主桁線形（わたみ）曲線を求めた結果、一部の光ファイバセンサが破断した影響で主桁主径間の線形（たわみ）曲線と測量レベルとの間に差が見られたが、主桁側径間においては両者は概ね良好な相関があることが分かった。

光ファイバセンサを適用した橋りょうに対する施工時から完成後供用時に通じた主桁全域のひずみ計測値および温度計測では、計測装置の故障などにより一部の期間で欠測が生じたが、長期にわたる計測を行えることを示した。また、ひずみ計測値の推移で見られる微小な変化に加えて、後方散乱光の強度変化に注目することで、計測値の変化が計測対象構造物に生じる変化に起因するものか、センサおよび計測装置の異常（自己診断）によるものか判断することができる可能性を示した。

加えて、通信用光ファイバの長期性能保証手法として広く用いられているスクリーニング試験法に基づく寿命推定を設置後の光ファイバセンサに対して行った結果、20年以上の耐久性が本計測では期待できることを確認した。





## 第 3 章

# 電波を用いた面的計測

---



## 3.1 はじめに

第3章では、構造物の様々な部位の変位・振動を一括して捉えるために、電波を用いた面的計測の一手法であるレーダーを用いた計測に着目する。レーダーは構造物の外部から電波を照射し、その散乱波を一括して捉えることで、構造物の面的な動き、あるいは振動を把握することが可能となる。本章では、このレーダーを用いた計測を構造物に対し適用する際の課題を整理し、実際に構造物に適用する際の適用法および計測データの処理・分析手法を論ずる。

## 3.2 レーダーを用いた面的計測の概要

### 3.2.1 レーダーを用いた計測

電波を用いて空間的に拡がりを持った対象の計測を行うレーダー（Radio Detecting and Rangng: Radar）は、1900年代初頭から100年余にわたり開発が続いている技術であり、アンテナから送信した電波が計測対象で反射・散乱された後に受信アンテナで受信され、その電波の伝達遅延時間や周波数を解析することで対象物の位置、大きさ、あるいは移動速度を推定する装置である [38]。

図3.1にレーダーの基本的な構成の一つであるパルスレーダーの概要を示す。図3.1中のアンテナから送信したパルス状の電波（パルス波）は、対象物の表面で反射・散乱した後に再度アンテナで受信される。以上の送信波と受信波の関係を図3.2に示す。

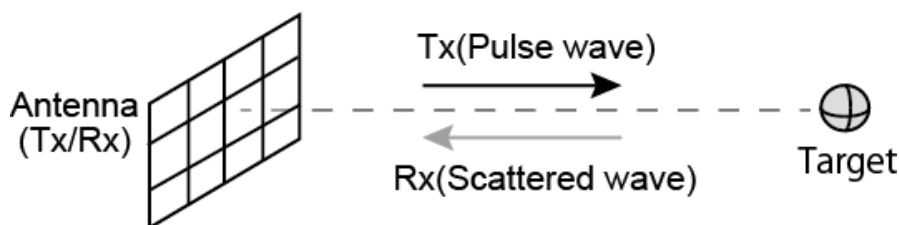


図 3.1 基本的なレーダー（パルスレーダー）の構成

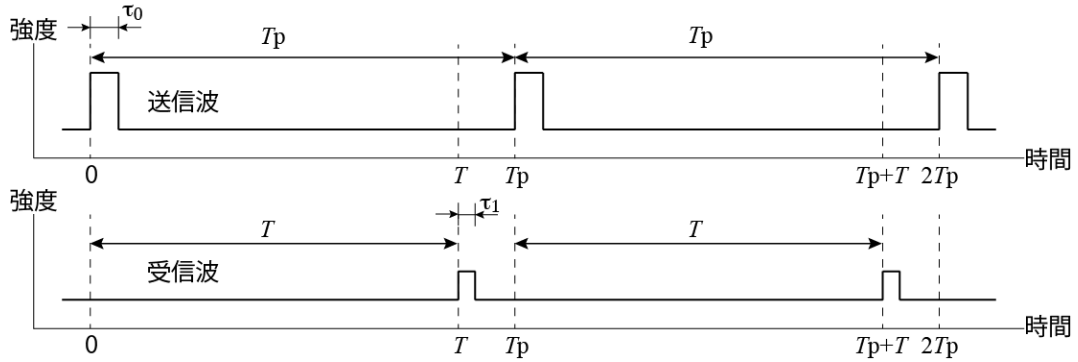


図 3.2 基本的なレーダー（パルスレーダー）の送受信波

レーダーと対象物との距離  $R$  は、電波の送受信に費やした時間  $T$  から式 3.1 で表すことができる。

$$R = \frac{cT}{2} \quad (3.1)$$

ここで、

- $R$  : レーダーと観測対象との間の距離
- $c$  : 光速 ( $\approx 2.99 \times 10^8 [\text{m/sec.}]$ )
- $T$  : レーダーと対象物との間の電波の往復時間

なお、この構成のレーダーでは、一定間隔  $T_p$  でパルス波を繰り返し送信して計測を行うため、レーダーと対象物との間の電波の往復時間  $T$  が  $T_p$  より大きい場合、対象物との距離を正しく計測することができない。これがレーダーにおける計測可能な最大距離  $R_{\max}$  であり、式 3.2 で表すことができる。

$$R_{\max} \leq \frac{cT_p}{2} \quad (3.2)$$

また、レーダーに対して距離が異なる複数の対象が存在する場合、それらを見分けることができる能力は、式 3.3 に示すレーダーの送信波が空間上に占める長さに等しい。すなわちレーダーが送信する電波のパルス幅（送信電波の継続時間）を  $\tau_0$  とすると、 $\Delta r$  が示す長さの間に複数の対象物がある場合、それらをレーダーの受信波から見

分けることはできない．この  $\Delta r$  を距離分解能（複数を対象物を見分ける限界）という [39]．

$$\Delta r = \frac{c\tau_0}{2} \quad (3.3)$$

ここで，

- $\Delta r$  : パルスレーダーの距離分解能
- $c$  : 光速 ( $\approx 2.99 \times 10^8$  [m/sec.])
- $\tau_0$  : レーダーから対象物に照射する電波のパルス幅（送信電波の継続時間）

### 3.2.2 散乱波の強さ（強度）

レーダーの送信波と受信波（散乱波）の強さの関係は式 3.4 を表すことができ，式 3.4 をレーダー方程式という．（式 3.4 は，電波を送信するアンテナと受信するアンテナが同じ構成（モノスタティックレーダー）の場合である．）

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma \quad (3.4)$$

ここで，

- $P_r$  : アンテナで受信する電波の電力密度（パワー）
- $P_t$  : 送信アンテナから出力した電波の電力密度（パワー）
- $G$  : 送受信アンテナのゲイン
- $\lambda$  : レーダーが用いる電波（マイクロ波）の波長
- $R$  : 送受信アンテナから対象物までの距離
- $\sigma$  : レーダー散乱断面積（後方散乱断面積：RCS）

式 3.4 における後方散乱断面積（Radar Cross Section:RCS） $\sigma$  は面積の単位をもち，対象物に照射する電波の放射パワーと入射パワーに対する比で表される．また， $\sigma$  は空間的に拡がりをもつ観測対象（計測対象，たとえば構造物）の各部位における送信電波と受信電波の強度比に比例する．すなわち， $\sigma$  が大きい箇所においては散乱波の強度も比較的高い結果となると考えられる．

表 3.1 に示すように  $\sigma$  は対象物の大きさ，形状や材質により大まかに求めることができるが，建築・土木構造物のように複雑な形状をもつ場合，レーダーからの電波が構造物の様々な箇所複雑に反射，散乱し，それらが互いに干渉するために後方散乱断面積を一義的に求めることは容易ではない．さらに，表面のわずかな凹凸やレーダーと対象物との位置，角度等により  $\sigma$  は大きく変化することに注意する必要がある [40][41]．

表 3.1 後方散乱断面積 ( $\text{RCS}(\sigma)$ ) の例

		$\text{RCS}(\sigma)$	備考
球	(半径 $a$ )	$\pi a^2$	$a \gg \lambda$
円板	(半径 $a$ )	$\frac{4\pi^3 a^2}{\lambda^2} \left[ 2 \frac{J_1(\sin\theta/\lambda)}{4a\sin\theta/\lambda} \right]^2 \cos^2\theta$	
長方形板	(一辺 $a, b$ )	$\frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \left[ \frac{\sin(2\pi b\sin\theta/\lambda)}{2\pi b\sin\theta/\lambda} \right]^2 \cos^2\theta$	
方形三面反射板	(一辺 $a$ )	$\frac{12\pi a^4}{\lambda^2}$	最大値

### 3.2.3 レーダーの受信範囲

レーダーに備えられたアンテナが電波を受信できる範囲（角度  $\varphi$ ）は，アンテナの大きさ（実開口長）を  $D$  とし，レーダーが使用する波長が  $\lambda$  の場合，式 3.5 で表される．

アンテナの大きさ（開口）を拡大すると  $\varphi$  は小さくなり，受信できる範囲（角度）は狭くなる．また， $\lambda$  が小さい場合（すなわち高い周波数の電波をレーダーで用いる場合）においても，アンテナが受信できる範囲は狭くなる．

なお，図 3.1 および図 3.3 に示す構成では，アンテナが受信できる範囲（角度）内に複数の対象物があり，レーダーとこれらの対象物との間の距離がほぼ等しい場合，これらを受信波から区別（見分ける）ことは難しい．

$$\varphi = \frac{\lambda}{D} \quad (3.5)$$

ここで,

$\varphi$  : アンテナが実効上受信できる角度

$\lambda$  : レーダーが使用する電波の波長

$D$  : アンテナの大きさ (実開口長)

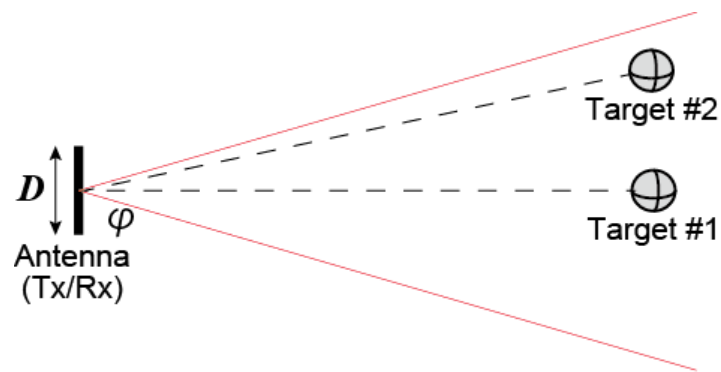


図 3.3 レーダーを用いた対象物の方向 (方位) の推定

このような場合, 大型化して指向性を高く (鋭く) したアンテナ (大きな開口  $D$  を持つアンテナ) を回転して受信範囲に複数の対象物が存在しないように計測を行う方法や, 図 3.4 に示すように, 対象物からの散乱波を複数のアンテナで同時に受信し, 各々のアンテナの受信波の位相差から対象物の方向 (方位) の推定を行う方法がある.



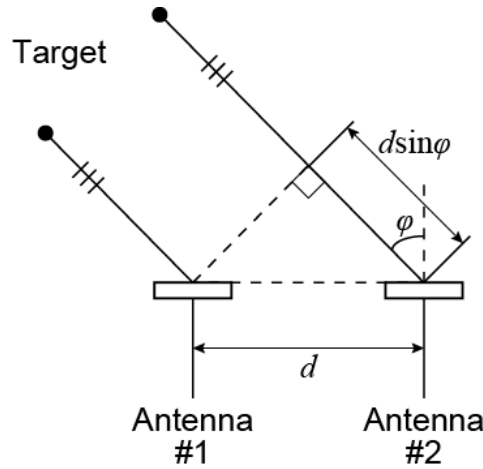


図 3.4 複数のアンテナによる対象物の方向（方位）の推定

図 3.4 に示す間隔  $d$  の二つのアンテナに対し，十分に遠方の対象からの散乱波（波長  $\lambda$ ）が到来しているとき，アンテナ#1 およびアンテナ#2 で受信する電波の位相差  $\beta$  は，式 3.6 の通り表すことができる．そのため，それぞれのアンテナの受信波から位相差  $\beta$  を求めることができれば，対象の方向  $\varphi$  を推定することが可能となる [42]．

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \varphi \quad (3.6)$$

### 3.2.4 レーダーを用いた面的計測

図 3.1 に示す基本的な構成のレーダーに対し，図 3.5 のように計測を行う対象（範囲）の斜め上方から電波を照射し，広い範囲から反射・散乱される電波を，広い受信帯域を持つアンテナで一括受信して処理することで，観測範囲の中の凹凸や微小変位などの分布を一括で取得できる 2 次元処理（面的計測）が可能となる [43][44]．

この構成のレーダーをイメージングレーダーといい，図 3.1 の構成では，レーダーから対象物までの距離を単に「距離」と記していたが，空間的（面的）に拡がりをもつ範囲の計測を行うレーダーでは，レーダーから対象物までの距離および方向をレンジ距離，レンジ方向と呼び，レンジ方向に直交する方向および距離についてはアジマス方向，アジマス距離と呼ぶ．

この構成のレーダー（イメージングレーダー）においても、レーダーから対象物までの距離（レンジ距離）およびレンジ方向の距離分解能は、式 3.1 および式 3.3 で示した通りとなる。式 3.3 で示した距離分解能を向上する（ $\Delta r$  を小さくする）ためには、送信波のパルス幅  $\tau_0$  を短くすればよいが、実際には強力かつ短時間のパルス波を繰り返し送信することは、大きな電力を要するため困難である。

そこで近年のレーダーでは、高い距離分解能を得るために、図 3.6 に示すような周波数変調（Frequency Modulation: FM）を加えたパルス波を送信波に用い、受信アンテナでは、その周波数変調の幅に応じた広帯域の電波を受信し解析する技術（レンジ圧縮技術）を用いている。

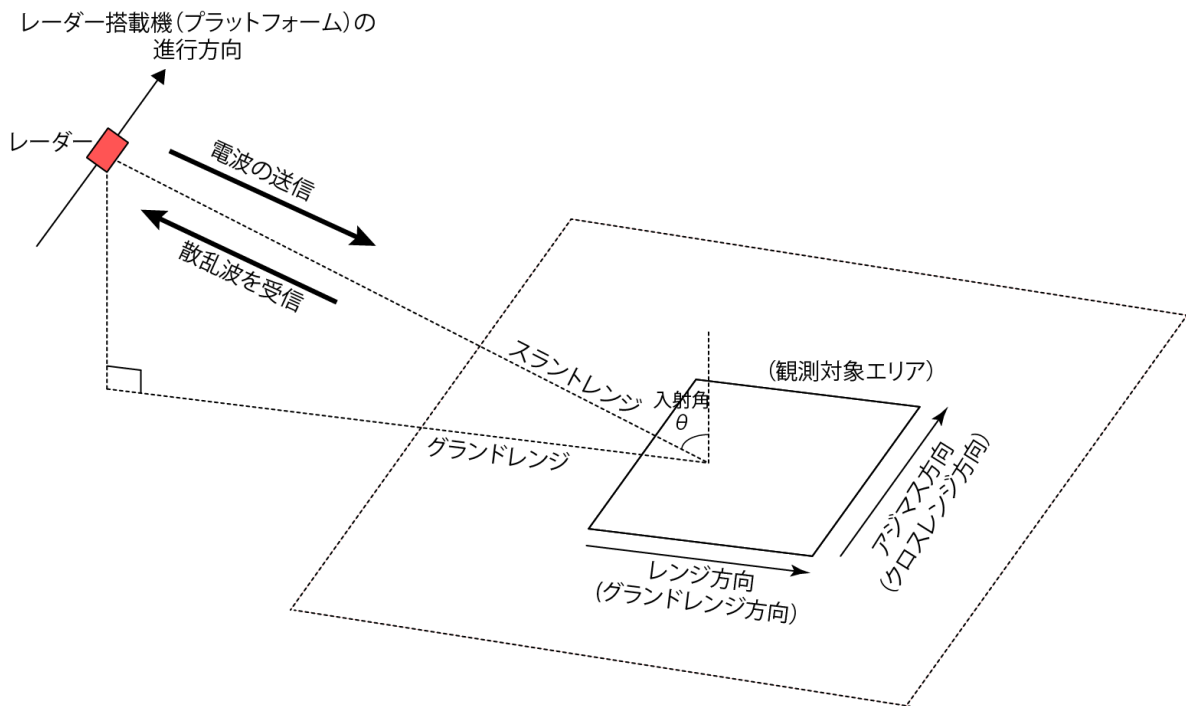


図 3.5 面的計測を行うレーダー（イメージングレーダー）の構成

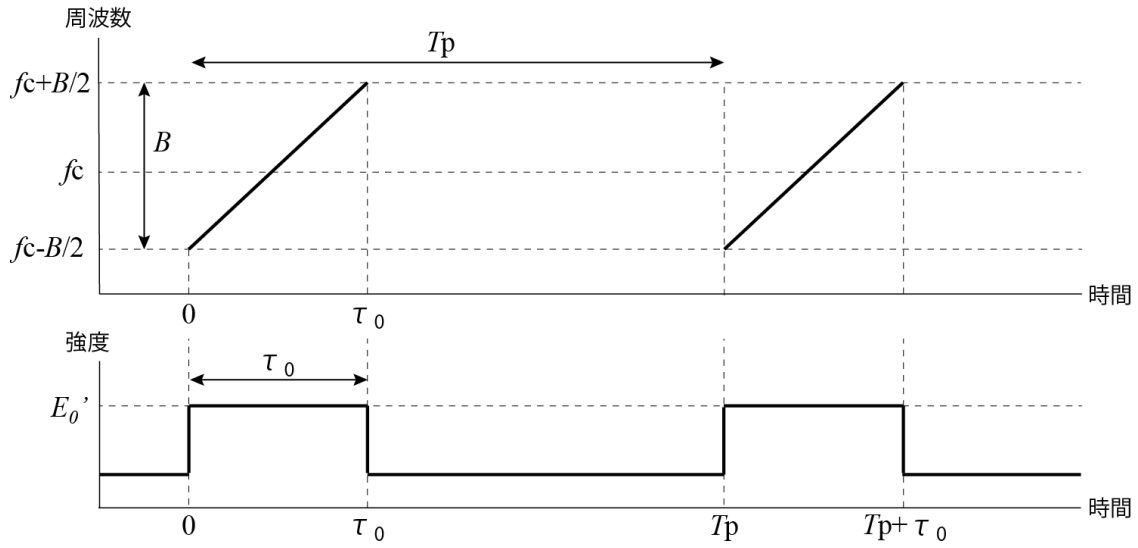


図 3.6 イメージングレーダーで用いる周波数変調を加えたパルス波

図 3.1 で示したパルスレーダーの送信波と同様に，送信波のパルス幅  $\tau_0$  の間に送信周波数が時間  $\tau$  に応じて線形に  $f_c$  を中心に  $\pm B/2$  だけ変化する場合，送信波は式 3.7 で表すことができる．

$$E_t(\tau) = E_0' \cos\left(2\pi f_c \tau + \frac{B\pi}{\tau_0} \tau^2\right) \quad : -\frac{\tau_0}{2} \leq \tau \leq \frac{\tau_0}{2} \quad (3.7)$$

ここで，

- $E_0'$  : 送信波の振幅
- $\tau$  : 時間
- $f_c$  : 送信波の中心周波数
- $B$  : 周波数変調幅
- $\tau_0$  : パルス幅

なお，図 3.6 で示した周波数変調を加えたパルス波を送信した後，距離  $R$  にある対象物から反射・散乱する電波は，式 3.1 に示した通り， $2R/c$  だけ時間が遅れてアンテナで受信される． $R$  が比較的近距离で送受信の間に電波の減衰がほぼないと仮定すると，受信波は送信波と同様に一定の振幅  $E_0$  を持ち，式 3.8 で表すことができる．

$$E_s(\tau) = E_0 \cos(2\pi f_c(\tau - \frac{2R}{c}) + \frac{B\pi}{\tau_0}(\tau - \frac{2R}{c})^2) : |\tau - 2\frac{R}{c}| \leq \frac{\tau_0}{2} \quad (3.8)$$

これらの式 3.7 および式 3.8 で表す送信波および受信波は、複素振幅表示では式 3.9 および式 3.10 として示され、両者に相関処理を行うことにより、イメージングレーダーの観測範囲の中の任意の点（図 3.7）における受信波を、式 3.11 で表す複素振幅で表すことができる。

$$E_t(\tau) = E'_0 \exp(i2\pi f_c \tau + i\frac{B\pi}{\tau_0} \tau^2) : -\frac{\tau_0}{2} \leq \tau \leq \frac{\tau_0}{2} \quad (3.9)$$

$$E_s(\tau) = E_0 \exp(-i2\kappa R + i\frac{B\pi}{\tau_0}(\tau - \frac{2R}{c})^2) \quad (3.10)$$

ここで、

$\kappa$  : 波数 ( =  $2\pi/\lambda$  )

$\lambda$  : 送信電波の中心周波数における波長 ( =  $c/f_c$  )

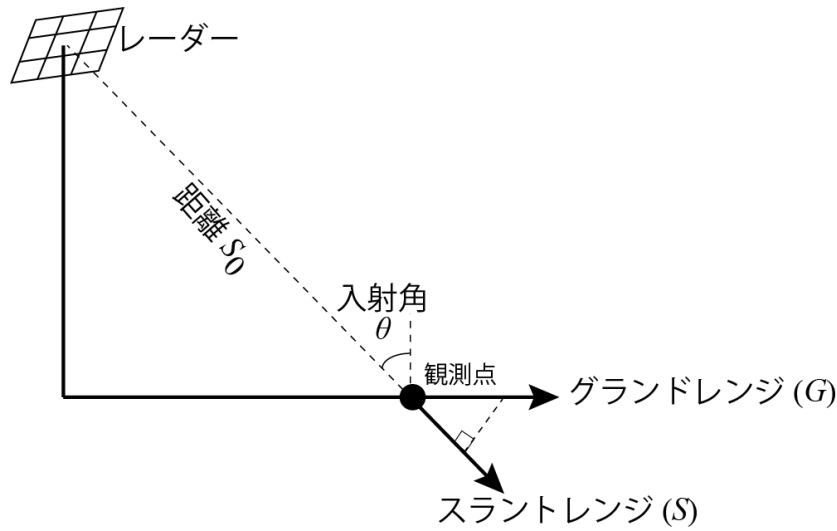


図 3.7 イメージングレーダーのレンジ方向の座標

$$E_s(S) = E_0 \exp(-i2\kappa S_0) \operatorname{sinc} \frac{G\pi}{R_g} \quad (3.11)$$

なお、式 3.11 に示す  $R_g$  は、イメージングレーダーのグラントレンジ方向の距離分解能であり、観測点におけるレーダーからの電波の入射角  $\theta$  に対して式 3.12 で示すことができる [44].

$$R_g = \frac{c}{2B \sin \theta} \quad (3.12)$$

さらに、図 3.5 に示すレーダーと、観測範囲が直交する方向（アジマス方向）では、距離分解能  $R_a$  は、受信アンテナの長さ（開口）を  $D$ 、送信電波の波長を  $\lambda$ 、レーダーと観測対象との距離（スラントレンジ距離）を  $S_0$  とすると、式 3.5 で示したパルスレーダーの受信アンテナの実効上の範囲（角度）を示す  $\varphi$  に観測対象との距離を乗じた値となり、式 3.13 で示すことができる。

$$R_a = \frac{\lambda S}{D} \quad (3.13)$$

図 3.5 のように航空機にレーダーを搭載して、レーダーからの距離  $S = 8,000[\text{m}]$  の観測対象エリアを波長  $\lambda = 23[\text{cm}]$  の電波で観測する場合、アジマス方向の距離分解能  $R_a = 3[\text{m}]$  を得るためには、開口  $D \simeq 600[\text{m}]$  と極めて大型なアンテナを航空機に搭載する必要がある。（しかし実際には  $600[\text{m}]$  の大きさのアンテナを航空機に搭載することはほぼ不可能である。）

そこで、長さ（開口）が短いアンテナを備えたレーダーを、人工衛星や航空機などの移動する機体（プラットフォーム）に搭載し、これらと一体で移動させながら観測対象からの散乱波を受信することによって見かけ上の開口を拡大する合成開口（SAR）技術を用いる。

実開口  $D$  のアンテナを備えたレーダーを搭載した人工衛星や飛行機が、ある時間で距離  $L$  を移動する間に、アンテナが連続受信する受信波を、前述のレンジ方向と同様に相関処理 [44] を行うことにより、アジマス方向においても高い距離分解能が得られる。

これら一連の処理の結果、受信波  $E_{ga}$  は、式 3.14 で示す通り、レンジ方向とアジマス方向の座標で位置が定義される複素振幅で表すことができ、 $E_{ga}$  は強度と位相を併せ持つ値となる。

$$E_{ga}(G, A) = E_0 \text{sinc}\left(\frac{G\pi}{R_g}\right) \text{sinc}\left(\frac{A\pi}{R_a}\right) \quad (3.14)$$

なお，式 3.13 で示したアジマス方向の距離分解能  $R_a$  は，仮想的に大きな開口  $L$  を持つアンテナ（合成開口長  $L$  のアンテナ）と考えることができ，改めて式 3.15 で表すことができる [44].

$$R_a = \frac{\lambda S}{L} \quad (3.15)$$

### 3.3 構造物に対する面的計測 (衛星 SAR を用いた面的計測)

#### 3.3.1 衛星 SAR を用いた構造物の変状監視

レーダー技術を用いて構造物の面的計測を行う手法を検証するために、前節 3.2 で示したイメージングレーダーを用いた地表観測で得た観測データから、構造物の変化を捉える検討を行う。

前節 3.2 で示した構成のイメージングレーダーは、近年多くの人工衛星（人工衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR））や航空機に搭載（PI-SAR）され、日々地表観測などに活用されている。

衛星 SAR の観測データから、観測対象となる地域（範囲）の変化（変位）を面的に捉え、さらに観測範囲の中の構造物の変化を捉えるためには、観測時刻が異なる 2 セット以上の観測データを取得し、これらの差分を求める差分干渉 SAR（DinSAR）解析 [45][46] を主に用いる。衛星 SAR の観測データに対し差分干渉解析を行うと、各々の観測データの空間分解能に沿った観測範囲中の各点における受信波（散乱波）の強度差、位相差および相互の観測データの干渉度（コヒーレンス）を面的に得ることができる。

#### 3.3.2 地震被災後の地表面の変状

平成 28 年 4 月に発生した熊本地震の前後（4 月 8 日および 4 月 20 日）に、衛星 SAR（欧州宇宙機構 (ESA) が運用する Sentinel-1 衛星）が九州地域に対して地表観測を行った際の観測データ [47] を用いて差分干渉解析を行った。差分干渉解析の手順は付録 A の通り行い、結果を図 3.8 に示す。

図 3.8 中の等高線状の縞模様は、地震前後の観測範囲における地表の変化（変位）を表しており、衛星 SAR の観測データの散乱波の位相差分に対し衛星 SAR で用いている電波の波長（C-band 帯： $\lambda \approx 12[\text{cm}]$ ）の半値を乗じた値である。

図 3.8 から、同図中に示した熊本地域に設置されている電子基準点 [48] の位置における変位（移動量）を読み取り、それらを電子基準点の地震前後の動き [49] と比較すると、双方の値の推移は概ね等しい。（比較結果を付録 A に示す。）

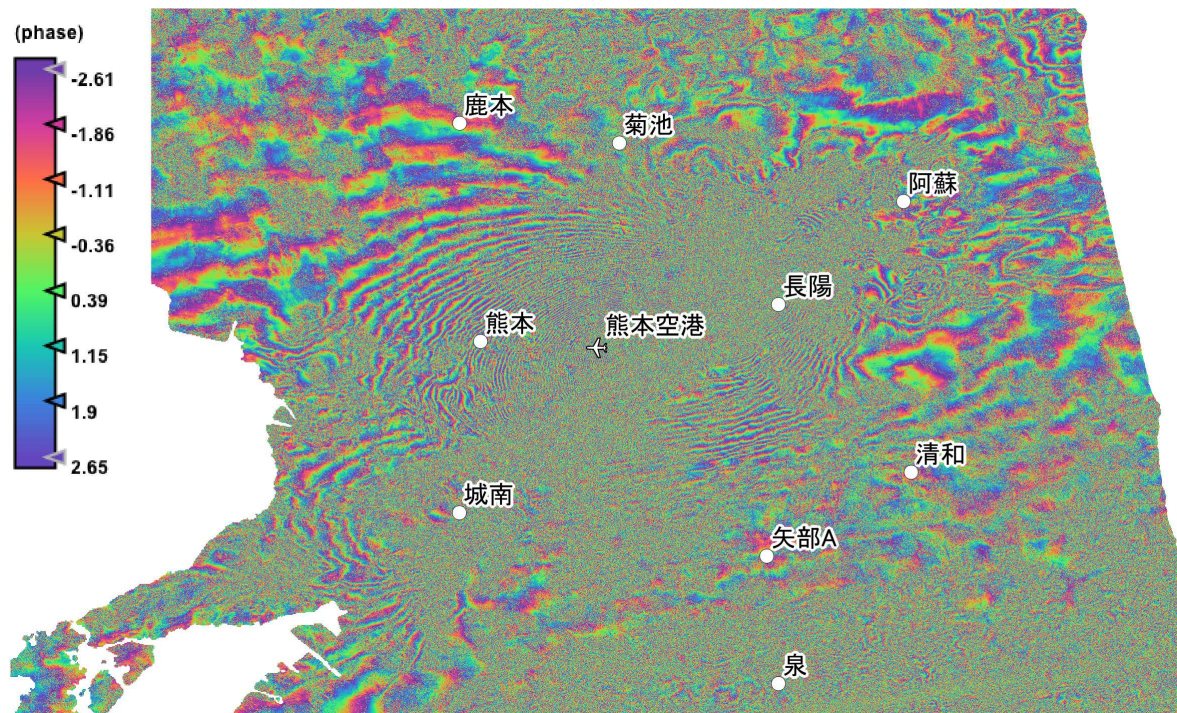


図 3.8 熊本地域における衛星 SAR の差分干渉解析結果と電子基準点の位置

### 3.3.3 地震被災後の構造物の状況

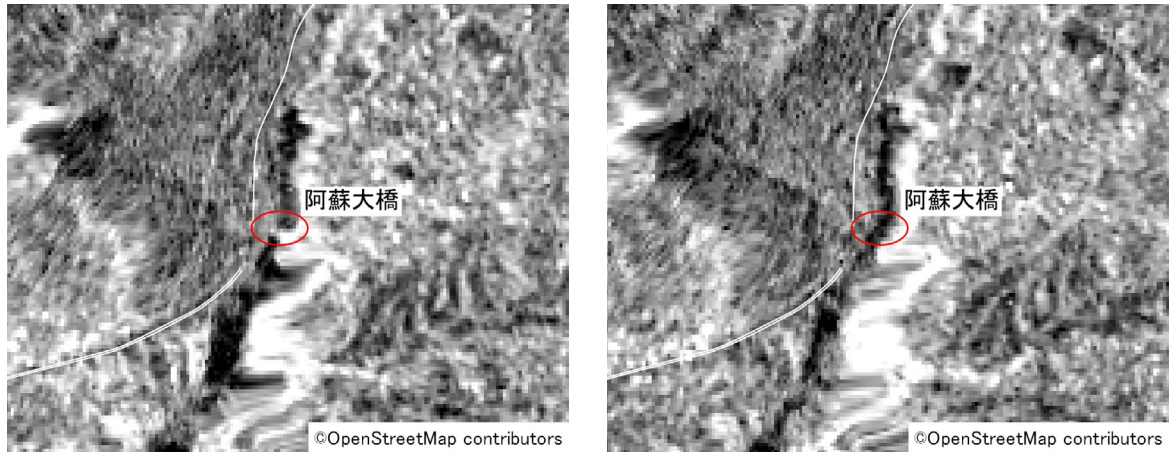
熊本地震前後の衛星 SAR の観測データから、観測範囲の中にある構造物の変化を捉えるために、図 3.8 から阿蘇大橋（32.88N，130.99E）および大切畑ダム貯水池（32.84N，130.93E）における散乱波の位相差からこれらの構造物の地震前後における変位（移動量）を読み取った。

阿蘇大橋の位置における散乱波の位相差から得られる地表の変位（移動量）は 0.55[cm]，大切畑ダム貯水池においては-0.19[cm] と殆ど差がない結果となった。この結果から、散乱波の位相差から構造物の変状を捉えることは難しいと考えられる。

一方、地震前後の観測データのコヒーレンス（干渉度）はそれぞれ 0.31 および 0.18 と低いことから、これらの構造物に何らかの変化があったと推定できる。さらに、図 3.9 および図 3.10 に示す通り、地震発生前の観測データでは、阿蘇大橋および大切畑ダム貯水池からの強い散乱波が確認できるが、地震発生後は阿蘇大橋からの散乱波は確認できない。阿蘇大橋における散乱波強度は、地震発生前（4 月 8 日）の 44.0[dB] に対し、地震後（4 月 20 日）は 31.2[dB] と大きく低下していた。このことから、衛



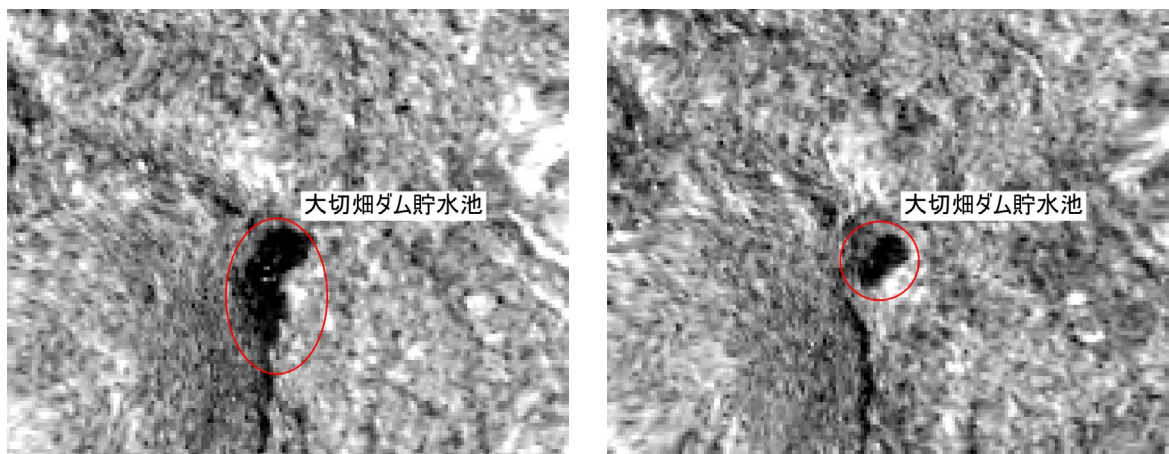
星 SAR 画像における散乱波強度の低下から熊本地震による阿蘇大橋の崩落が確認できるといえる．一方，大切畑ダム貯水池では，散乱波強度が低い箇所の面積変化から貯水池の水位 (貯水量) に変化があった可能性を推定することができるが，ダム堤体部では，地震前の散乱波強度 34.4[dB] に対し，地震後は 34.1[dB] であるため，強度差はほぼ無く，散乱波の強度変化から構造物の変状の有無を判断することは難しい．



(a) 地震前 (4 月 8 日)

(b) 本震後 (4 月 20 日)

図 3.9 平成 28 年熊本地震前後の阿蘇大橋周辺の衛星 SAR 観測結果



(a) 地震前 (4 月 8 日)

(b) 本震後 (4 月 20 日)

図 3.10 平成 28 年熊本地震前後の大切畑ダム貯水池周辺の衛星 SAR 観測結果

これは、図 3.8 の地上分解能 (解析処理した画像における 1 画素 (ピクセル) の大きさ) が  $5[m] \times 20[m]$  と比較的粗いために、構造物からの散乱波が数ピクセル程度の領域に限定されたためと考えられる。

### 3.3.4 MTC 解析による被災構造物の抽出

衛星 SAR の観測データを用いた構造物の変状の抽出を容易に行うために、図 3.8 で示した解析結果に対して、MTC (Multi Temporal Coherence) 解析 [50] を行った結果を図 3.11 に示す。図 3.11 は、地震前の散乱波強度データを赤色に、地震後の散乱光強度データを緑色に、さらに地震前後の散乱波の干渉度を示すコヒーレンス値を青色に着色し、それらを RGB 合成した結果であり、図 3.9 のように後方散乱の有無の判別が比較的容易な対象に加えて、比較的小規模な構造物に対しても災害被災判別の一手法として用いることができる可能性がある。表 3.2 に MTC 解析画像の判別法を示し、阿蘇大橋周辺および熊本城 (32.81N, 130.71E) 周辺を拡大した MTC 解析画像を図 3.12 に示す。

図 3.12(a) 阿蘇大橋周辺では、図 3.9 で示した位置に構造物の滅失を示す赤色の画素が確認できる。また、図 3.12(b) 熊本城周辺で赤色画素が集中している箇所の抽出を試みたところ、長さ約  $35[m]$  (7 画素) に亘る範囲が抽出できた。この赤色の範囲は、熊本城頬当御門付近の石垣の位置であり、同石垣は熊本地震本震により石垣を構成する 1,200 個以上の岩の崩落が報告されている [51]。

このように衛星 SAR の差分干渉解析で得た散乱波の位相差および強度差では抽出が困難な構造物の変化に対しては、MTC 解析画像を用いることにより変化が生じた構造物の抽出が行える可能性がある。

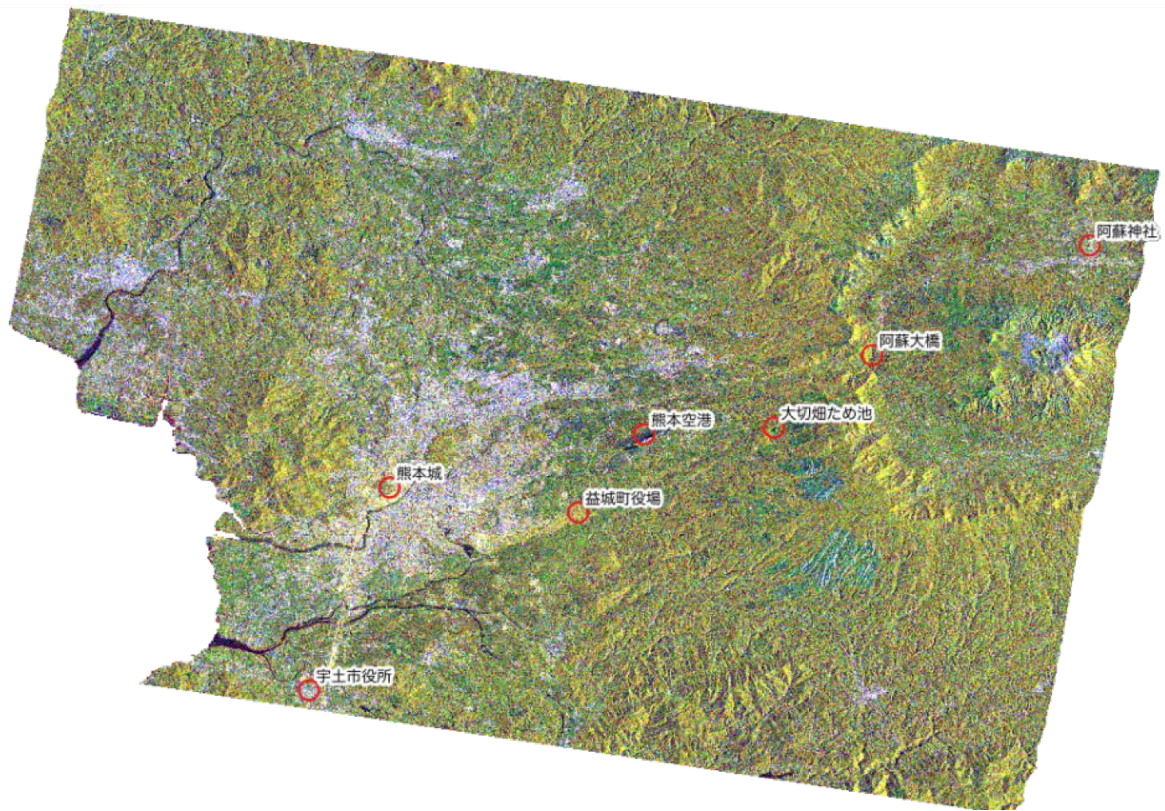
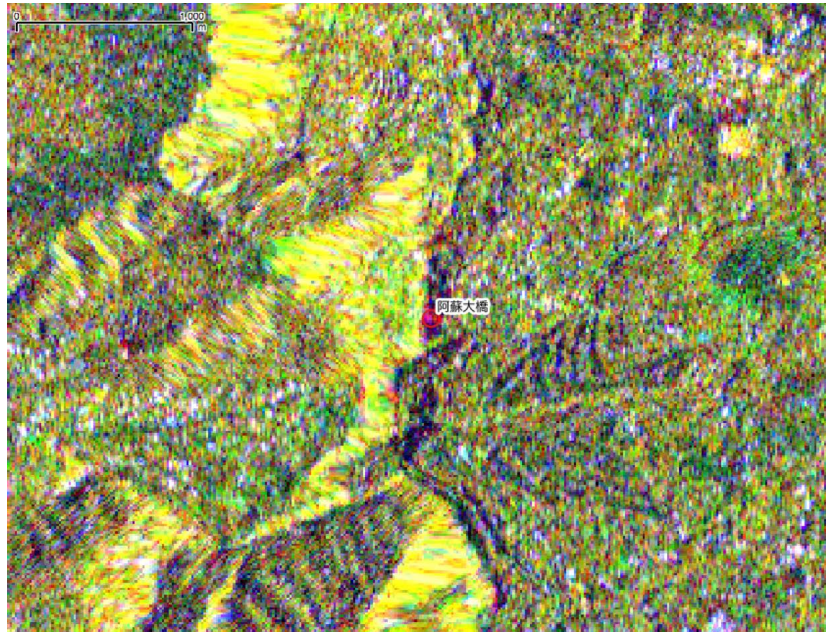


図 3.11 熊本地域の MTC 解析画像

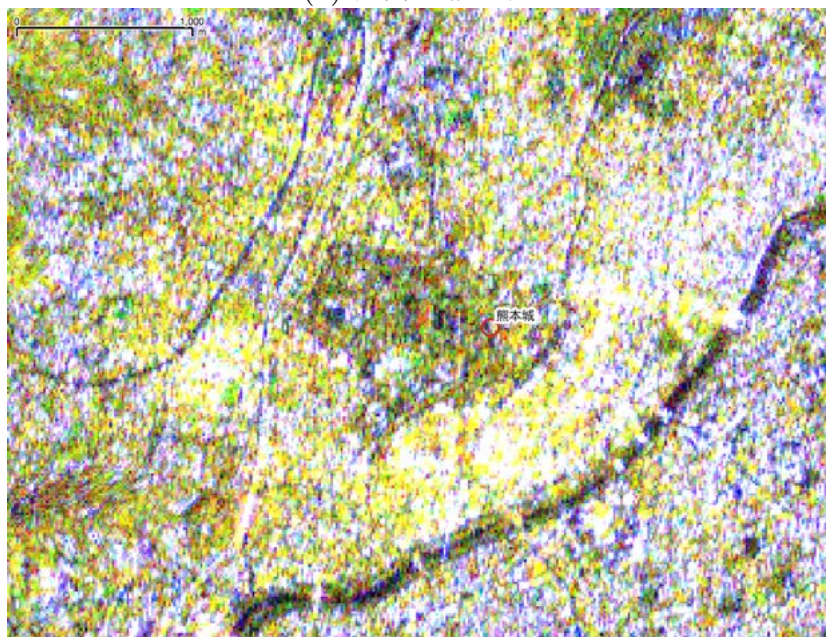
表 3.2 MTC 解析における画像判読

事象	色
反射物の滅失	赤
反射物の出現	緑
森林など	黄色
都市部など	青色





(a) 阿蘇大橋周辺



(b) 熊本城周辺

図 3.12 阿蘇大橋，熊本城周辺の MTC 解析画像（拡大）

## 3.4 レーダーを用いた面的振動計測

### 3.4.1 レーダーを用いた面的振動計測の概要

前節 3.2 のレーダーは，人工衛星や飛行機の移動に沿って比較的高速にアンテナを移動することによりアンテナ開口を仮想的に拡大し，その各々の受信信号を合成することで高いレンジ方向およびアジマス方向の分解能を得ることを可能とした手法である．

しかし，レーダーを搭載した人工衛星などが計測対象の上空を通過して計測が可能となる間隔は，概ね数日から数週間程度に限定されるため，計測対象の動的な変化，すなわち本研究で対象とする建築・土木構造物のような大型構造物の振動を捉えることは難しい．

この問題に対し，能美ら [52][53][54] は，前節で示した周波数変調を加えたパルス波をレーダーの送信波として相関処理を行うことでレンジ方向の高い距離分解能を得るレンジ圧縮技術を拡張して，周波数変調を加えた電波を，ほぼ途切れなく送信する FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 技術 [55] と，複数の送信アンテナを切り替える MIMO 技術 [56] を用い，さらに比較的小型のアンテナを複数用いて各々のアンテナが同時に受信する電波を位相同期させることにより，大きなアンテナ開口を得ることができるデジタル・ビーム・フォーミング (DBF) 技術 [57] を組み合わせた図 3.13 に示すレーダー（高速イメージングレーダー）を開発した．表 3.3 に示す主要諸元の通り，この構成のレーダーではレンジ方向とアジマス方向の双方で高い距離分解能が得られ，数百 [Hz] 程度の高速なサンプリング間隔で対象構造物の面的な変位分布，すなわち面的な振動分布計測が行うことが可能となる．

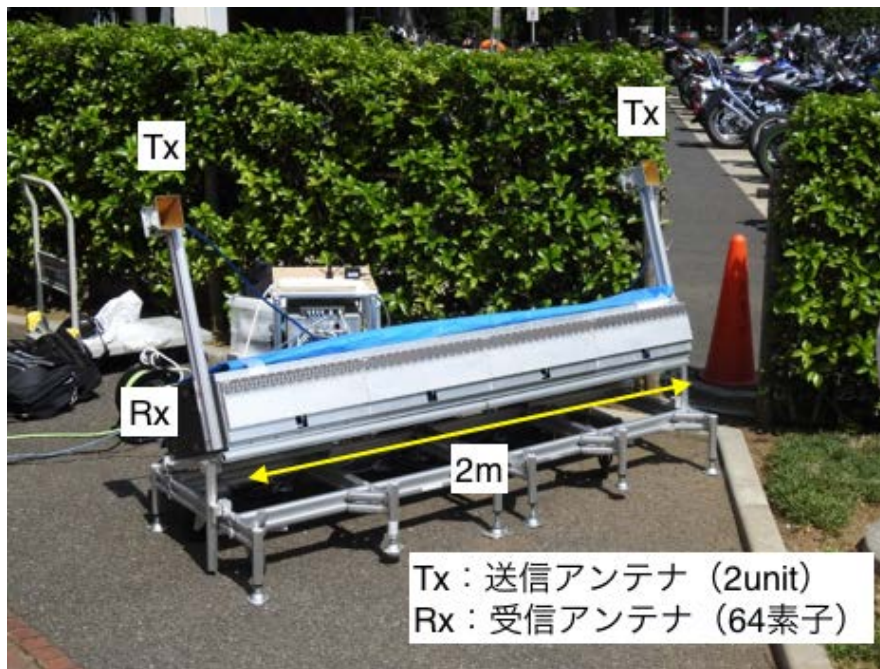


図 3.13 高速イメージングレーダーの外観

表 3.3 高速イメージングレーダーの主要諸元

項目	諸元
方式	FMCW
使用周波数	17.15[GHz] (Ku-band)
送信変調周波数	300 [MHz]
観測角度	(上下方向) 30° (水平方向) 45°
観測距離	10[m]~10[km]
アジマス分解能	0.5[m] (計測対象との距離=100[m] の場合)
スラントレンジ分解能	0.5[m]
サンプリング速度	500[回/sec.]
振動計測周波数	最大 250[Hz]
計測精度 (計測可能振幅)	約 0.02[mm]

この構成のレーダー（高速イメージングレーダー）のスラントレンジ方向の距離分解能  $R_s$  は、式 3.16 の通り求められる。

$$R_s = \frac{c}{2B} = \frac{2.99 \times 10^8}{2 \times 300 \times 10^6} \doteq 0.5[\text{m}] \quad (3.16)$$

また、図 3.13 に示す 64 素子の受信アンテナと 2 式の送信アンテナを用いる構成の場合、受信アンテナの合成開口  $L$  は、 $L=2 \times 2 = \text{約 } 4[\text{m}]$  と考えることができるため、レーダーと計測対象との距離  $S=100[\text{m}]$  の場合のアジマス方向の距離分解能は、式 3.17 の通り表すことができる。

$$R_a = \frac{\lambda S}{L} = \frac{\frac{2.99 \times 10^8}{17.15 \times 10^9} \times 100}{4} \doteq 0.5[\text{m}] \quad (3.17)$$

レーダーと計測対象との間の距離  $R$  は、図 3.14 に示すように、周波数変調  $B$  を加えた送信電波に対する受信電波との周波数差  $f_b$  を測定することにより式 3.18 に示す通り求めることができる。

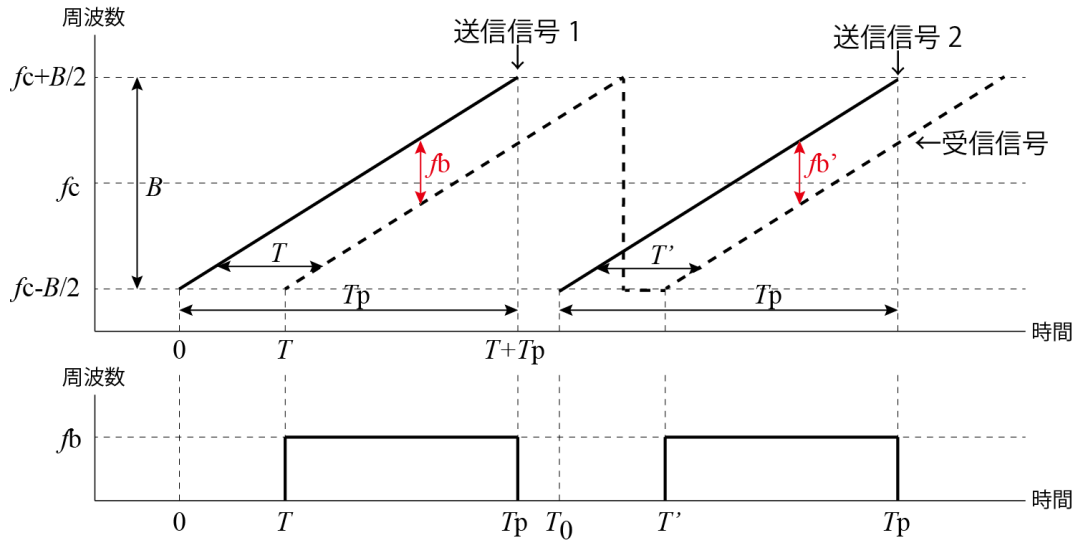


図 3.14 FMCW レーダーの送受信信号

$$R = \frac{T_p c f_b}{2B} \quad (3.18)$$

ここで,

- $R$  : レーダーと対象物の間の距離
- $T_p$  : 送信波の継続時間
- $c$  : 光速
- $f_b$  : 送信波と受信波の周波数差
- $B$  : 送信波の周波数変調幅

表 3.3 に示す通り, このレーダーの送信波の中心周波数  $f_c=17.15[\text{GHz}]$ , 周波数変調幅  $B=300[\text{MHz}]$  である. 送信波の継続時間  $T_p=1,000 \times 10^{-6}[\text{sec.}]$ , レーダーと対象物の距離  $R=100[\text{m}]$  の場合  $f_b \doteq 0.2[\text{MHz}]$  となる.

なお, このレーダーでは, あらかじめ  $f_b$  の範囲を限定して限られた範囲の計測のみを行うよう設定している.  $f_b$  の範囲 (すなわち受信帯域)  $f_b=0.2 \pm 0.1[\text{MHz}]$  と設定すると, 計測可能な距離  $R$  は  $50[\text{m}] \sim 150[\text{m}]$  となる.

レーダーで計測を行った範囲の中では,  $R_s$  および  $R_a$  の分解能で散乱波の強度と微小変位  $\Delta s$  を取得できる. 前節 3.2 中の式 3.14 で示した強度と位相を併せ持つ受信波から位相成分  $\psi$  を抽出し,  $\psi$  に対してレーダーの送信波の波長  $\lambda$  の  $1/2$  を乗ずることによって式 3.19 の通り微小変位  $\Delta s$  を求めることができる.  $\Delta s$  の精度は  $\psi$  の計測精度に比例するが, 図 3.13 のレーダー (計測装置) では, 受信回路の内部雑音などにより表 3.3 に示す約  $0.02[\text{mm}]$  と制限される.

$$\Delta s = \frac{\psi}{2\pi} \frac{\lambda}{2} \quad : \lambda \doteq 17.48[\text{mm}] \quad (3.19)$$

### 3.4.2 レーダーを用いた面的振動計測の課題

前項 3.2 までに述べた通り, 図 3.5, あるいは図 3.13 のようなイメージングレーダーを用いて計測したデータは, 散乱波の強さ (強度) と位相を含んだ複素振幅データとして記録される [44][52]. このデータは, レーダーの視野 (計測範囲) に沿って整列した画像 (スラントレンジ画像) として図 3.15 のように記録されており, 縦軸がスラントレンジ距離を表し, 横軸がアジマス距離を表わしている. 各々の画素が示す色 (青



色から赤色)は、送信波の強さに対する散乱波の強さの相対値(比)で表される散乱波の強度を示している。

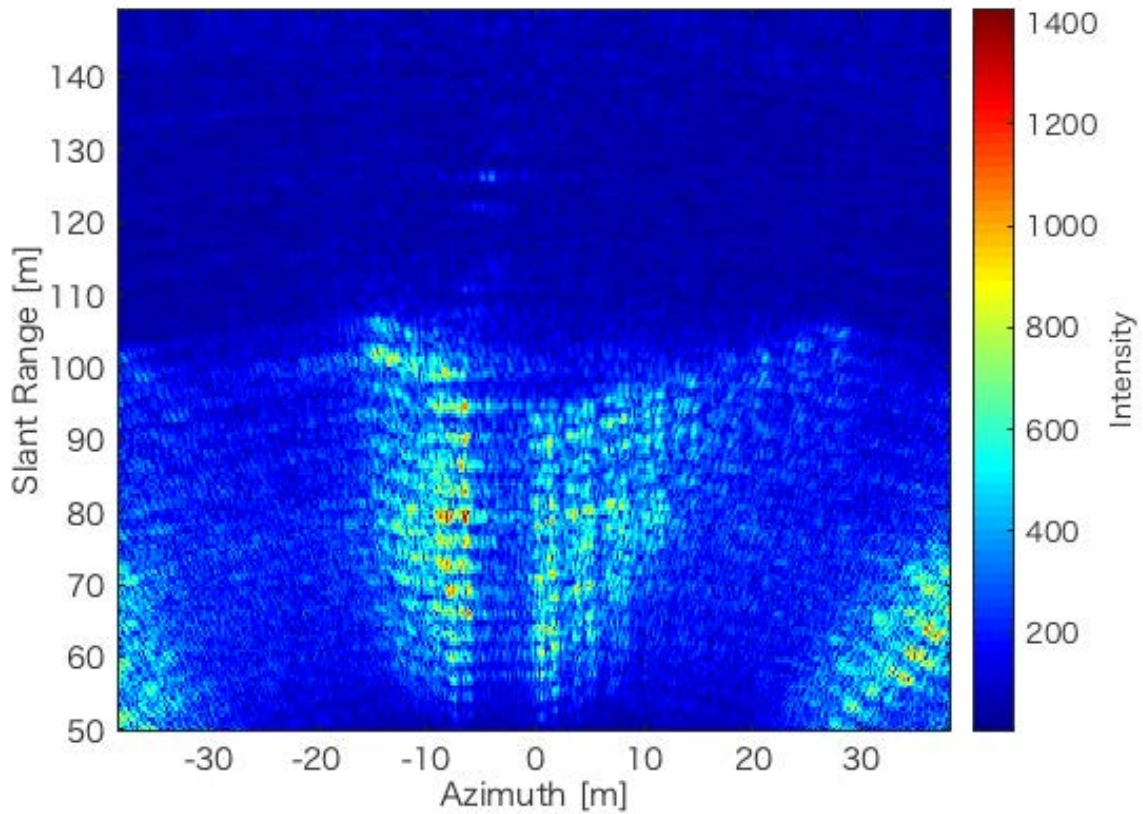


図 3.15 高速イメージングレーダーで取得した計測データ(画像データ)

また、図 3.15 の計測データ(画像)は、図 3.16 に示すように、レーダーの受信範囲の中で処理された図 3.16 b) の網掛け部であり、その大きさ(範囲)は、図 3.15 の計測の場合、(縦軸)スラントレンジ方向が 100[m] (スラントレンジ距離 50~150[m])、(横軸)のアジマス方向が 76.8[m] (レーダーの受信アンテナの中心を 0[m] として  $\pm 38.4$ [m])である。

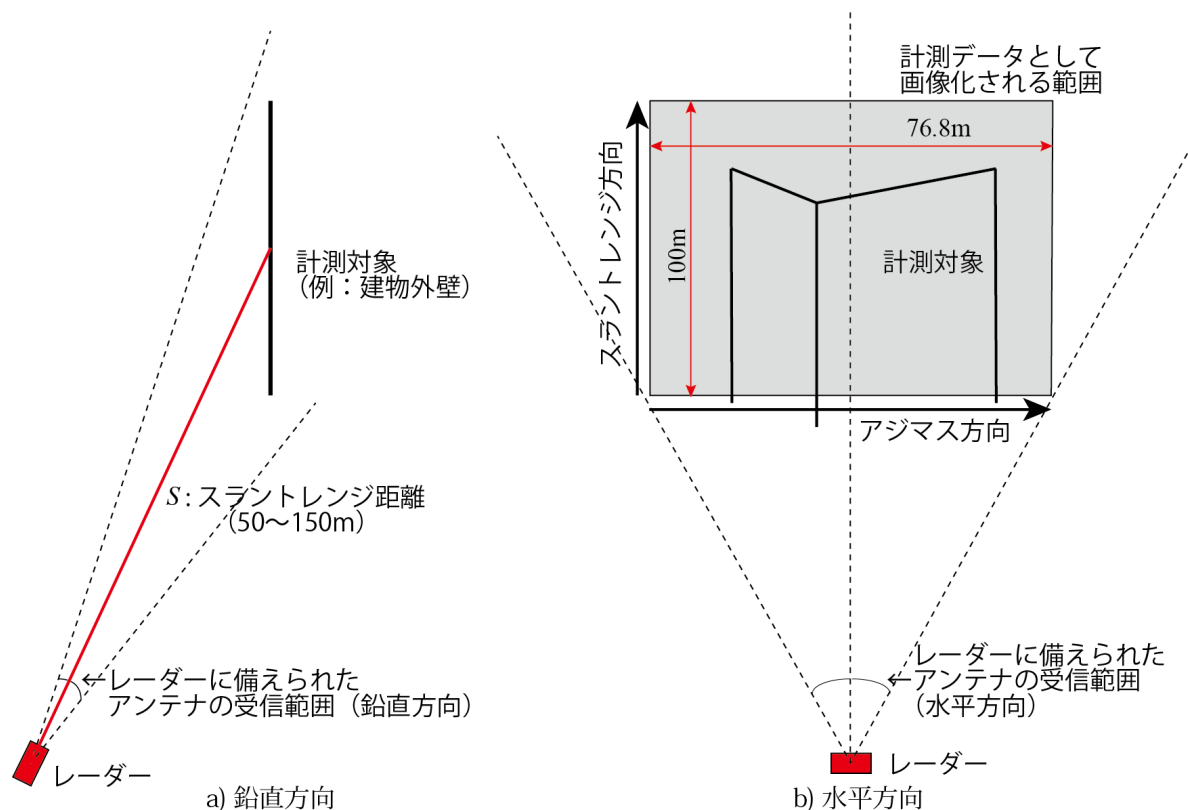
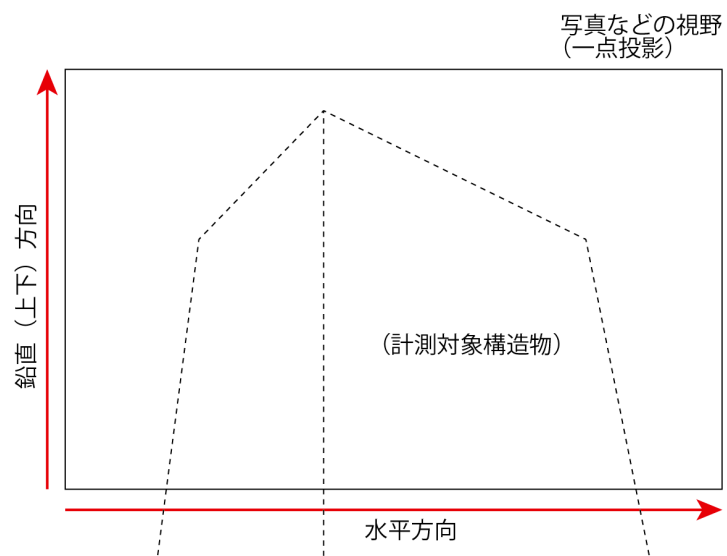


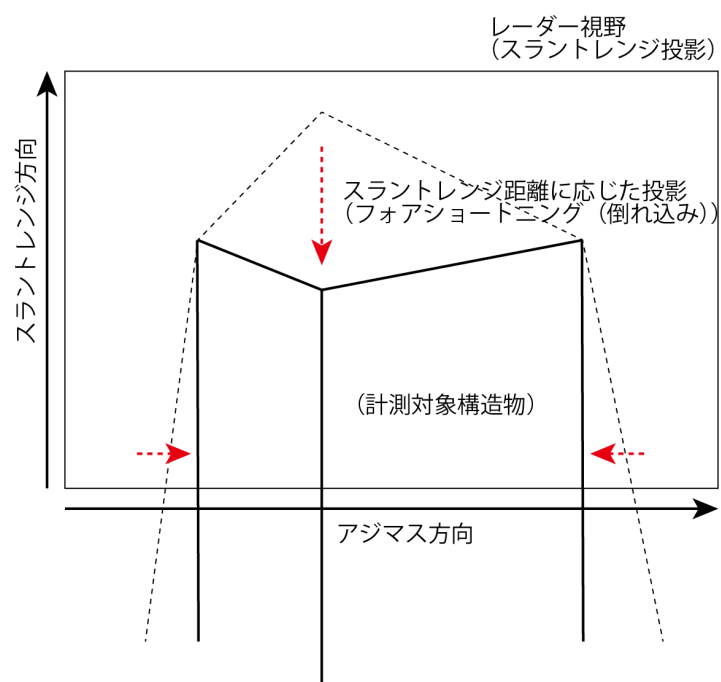
図 3.16 高速イメージングレーダーで取得した計測データ（計測範囲）

なお、図 3.15 の画像は、通常のカメラ等で撮影する写真（1 点投影画像）とは異なり、図 3.17 に示すように、計測システムからの距離が近い点が実際の位置よりも近い点に配置される。すなわち、レーダーから高層建物に対して面的計測を行う場合、図 3.18 中の A 点よりもスラントレンジ距離（レーダーから観測対象までの距離）が短い B 点の方がレーダー観測の見かけ上、近い位置にあると解釈される倒れ込み（フォアショートニング）が生じる。

そのため、レーダーで取得した計測データから、構造物の面的振動を求めるためには、図 3.17 に示すレーダー視野と写真画像、あるいは直交座標の違いを踏まえて、レーダーで取得した計測データを、構造物の寸法や位置を表す三次元直交座標系に沿って座標変換（マッピング）する必要がある。



(a) 写真などの視野 (1点投影)



(b) レーダー視野 (スラントレンジ投影)

図 3.17 レーダーの観測視野

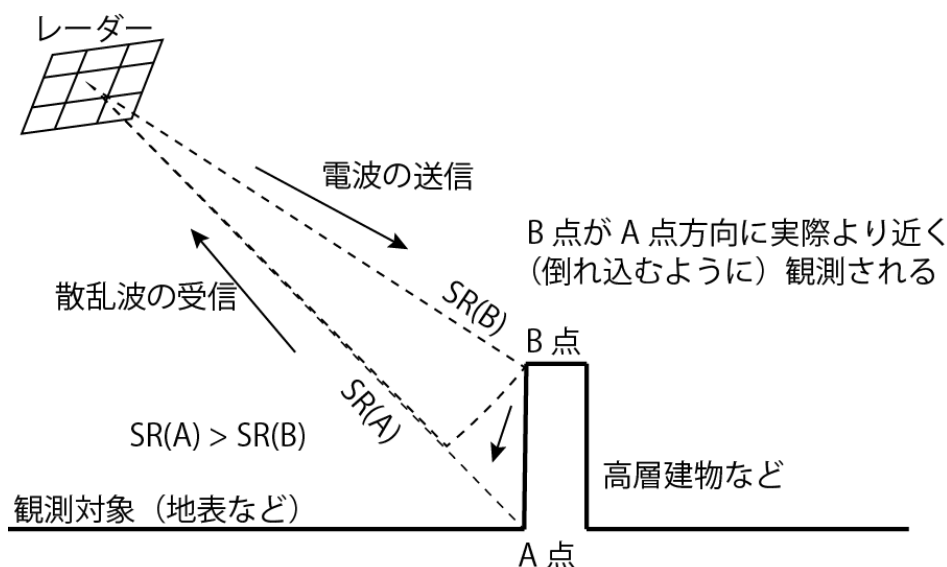


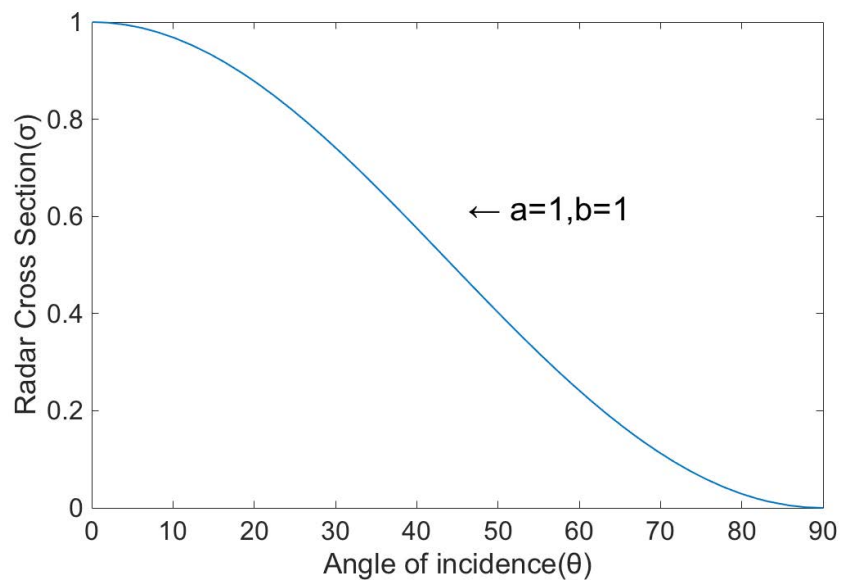
図 3.18 イメージングレーダーの計測で生じるフォアショートニング

また，構造物に対するレーダーを用いた面的計測では，レーダーと対象との間の角度や距離の違い，さらに計測対象（建物）の外壁の材質や形状の違いにより計測データの精度低下やばらつきが増大する可能性がある．

計測対象（建物）の外壁がカーテンウォール等の平板（長方形板）である場合，散乱波の強度に大きく影響する後方散乱断面積  $\sigma$  は，前節 3.2 における表 3.1 および式 3.20 で表すことができるが，レーダーの送信波の入射角  $\theta$  が大きくなると図 3.19 に示すように  $\sigma$  が低下するため，散乱波の強度が低下する恐れがある．

散乱波強度の低下と計測データの精度低下やばらつきの量の関係は別途検討する必要があるが，実建物における計測ではレーダー電波の入射角  $\theta$  と散乱波の強度，さらに計測データのばらつきの把握が重要となると考えられる．

$$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \left[ \frac{\sin(2\pi b \sin\theta / \lambda)}{2\pi b \sin\theta / \lambda} \right]^2 \cos^2\theta \quad (3.20)$$



(一辺  $a=1, b=1$  の長方形平板の場合)

図 3.19 レーダーの送信波の入射角  $\theta$  の変化に対する後方散乱断面積  $\sigma$  の変化

## 3.5 構造物に対する面的振動計測

前節までに述べたレーダーを用いた面的振動計測で得られる計測データから，構造物の面的振動を分析評価するためのデータ処理法および分析・解析法について述べる．

### 3.5.1 レーダー視野から直交座標への変換

レーダーを用いた面的計測で取得する計測データは，散乱波の強度と位相を併せ持つ．その中の位相データは，式 3.19 を用いてスラントレンジ方向の変位に換算できる．

図 3.20 に示すように，構造物の中のある点（解析点） $P$  におけるレーダー電波の入射角および方位角をそれぞれ  $\theta$ ， $\varphi$  とし，位相から換算したスラントレンジ方向の変位（解析点  $P$  の移動量）を  $\Delta s$  とすると，解析点  $P$  における直交座標系の変位成分  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  は式 3.21 の通り表すことができる．

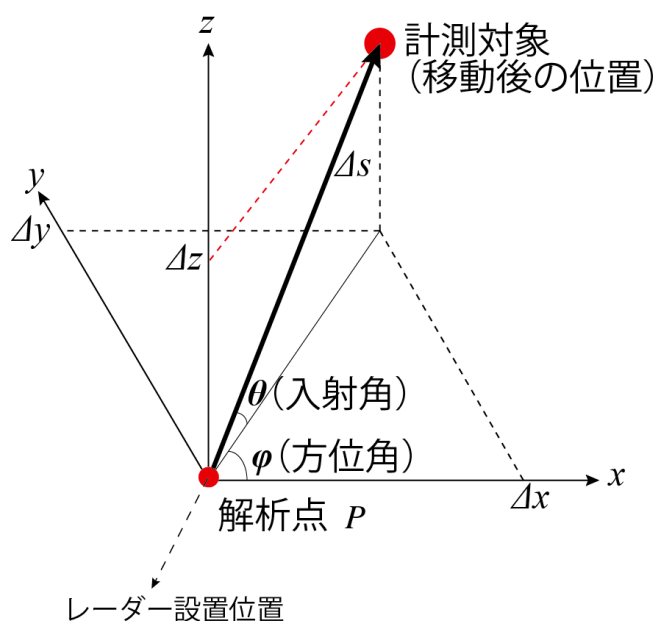


図 3.20 解析点  $P$  におけるレーダー電波の入射角と方位角

$$\begin{aligned}\Delta x &= (\cos\theta\cos\varphi)\Delta s \\ \Delta y &= (\cos\theta\sin\varphi)\Delta s \\ \Delta z &= (\sin\theta)\Delta s\end{aligned}\tag{3.21}$$

ただし、スラントレンジ方向と直交する動きが構造物に生じた場合、変位  $\Delta s$  は変化しない。そのため、構造物の動きを精緻に捉えるためには、構造物の外部の異なる位置に複数台のレーダーを設置して同時に計測を行い、それらのレーダーで取得したスラントレンジ方向変位計測値を合成して実際の構造物の動きを捉える必要がある。

そのためには、複数台のレーダーで取得した各々の  $\Delta s$  を、式 3.21 を用いて  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  に分解し、解析点ごとに足し合わせる方法および、3 台のレーダーを用いて同時に計測を行い、取得したスラントレンジ方向の各々の変位  $\Delta s_1, \Delta s_2, \Delta s_3$  から、式 3.22 および式 3.23 を用いて直交座標系の変位成分  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  を一括して求める方法などが考えられる。

$$\begin{pmatrix} \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \\ \Delta s_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 \sin\theta_1 & \sin\varphi_1 \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \\ \cos\varphi_2 \sin\theta_2 & \sin\varphi_2 \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \\ \cos\varphi_3 \sin\theta_3 & \sin\varphi_3 \sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 \sin\theta_1 & \sin\varphi_1 \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \\ \cos\varphi_2 \sin\theta_2 & \sin\varphi_2 \sin\theta_2 & \cos\theta_2 \\ \cos\varphi_3 \sin\theta_3 & \sin\varphi_3 \sin\theta_3 & \cos\theta_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \\ \Delta s_3 \end{pmatrix} \quad (3.23)$$

### 3.5.2 レーダー設置位置の推定

前項 3.5.1 で述べた通り、レーダーを用いて取得した計測データを構造物の位置および方向を表す直交座標系に変換を行うためには、それぞれの計測点における入射角  $\theta$  および方位角  $\varphi$  を求める必要があるが、そのためには計測実施の際にレーダーを設置した位置と、解析点の間の相対位置を把握する必要がある。

レーダーを設置した位置を求めるためにはまず、対象構造物周辺の地図や図面等から構造物とレーダーの相対位置を読み取る方法、あるいは測量を行い構造物とレーダーの相対位置を得る方法などが考えられる。しかし構造物とレーダーとの間に障害物がある場合や、測量の実施が困難な場合などは、以下の手順に示す通り、レーダーを用いて取得した計測データ（画像）と、対象構造物の図面を用いてレーダー設置位置の推定を行う方法が考えられる。

1. レーダーを用いて取得した計測データ（画像）から，散乱波の強度が比較的強い点を複数選択して解析点とし，それらのレーダー視野における座標  $(S_i, A_i), (S_j, A_j), (S_k, A_k), \dots$  を読み取る．さらに読み取った値からスラントレンジ距離  $S_i, S_j, S_k, \dots$  を抽出する．
2. 対象構造物を表す図面等から，上記の解析点に対応する直交座標  $(x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j), (x_k, y_k, z_k), \dots$  を読み取る．
3. レーダー計測値（画像）から読み取ったスラントレンジ距離と，構造物の直交座標系における座標の2式から，レーダー設置位置の直交座標  $(x_0, y_0, z_0)$  は，式 3.24 に示す三元連立方程式（異なる中心と半径を持つ三つの球の交点を求める公式）を解くことより求めることができる．

$$\begin{aligned}
 (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 &= (S_i)^2 \\
 (x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2 &= (S_j)^2 \\
 (x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 + (z_k - z_0)^2 &= (S_k)^2
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

なお，式 3.24 を解き交点を求めるために必要な点は3点であるが，表 3.3 で示した通り，スラントレンジ方向の距離分解能  $R_s$  が約 0.5[m] に限られることから，3点のみを抽出して交点を求め，その結果のみからレーダーの設置位置を推定すると，推定誤差が大きくなる恐れがある．さらに，読み取った3点が一直線上に並んでいる場合など，3点の組み合わせによっては，球が交わらない可能性もある．

そこで，レーダーで取得した計測データからできるだけ多くの解析点を抽出し，これらの解析点から任意の3点を抽出した後に，式 (3.24) に代入して交点を求め，これらの交点の集合のばらつきを考慮してレーダー設置位置の推定を行う．

式 3.24 の三元連立方程式を解くには数式処理ソフトを用いる方法が簡便であるが，本論文では以下，付録 B に示す方法を併せて用いる．



### 3.5.3 レーダーを用いた面的振動計測の手順（フロー）

以上、図 3.13 のレーダーを用いて取得した計測データから構造物の面的振動を捉えるためには、表 3.3 など示したレーダーの諸元および前項までに述べた課題を踏まえて、以下の手順（フロー）を示すことができる。

1. レーダーを計測対象構造物を概ね見渡すことができる位置に設置し、計測（面的振動計測）を行う範囲（計測範囲）がレーダーの観測視野（上下方向  $30^\circ$ 、水平方向  $45^\circ$ ）に含まれていることを確認した後に計測を行う。
2. レーダー計測で取得した計測データ（生データ）を、図 3.15 で示されるような複素振幅データに変換する。
3. 計測範囲（画像）の中から複数の点（解析点）を抽出し、それらの点とレーダーの設置位置との間の相対位置からレーダー電波の入射角  $\theta$  および方位角  $\varphi$  を求める。
  - レーダーの設置位置は、予め測量などの手法を用いて求め、対象構造物との相対位置を求める。
  - 対象構造物とレーダー設置位置の間に障害物などがあり実測が難しい場合は、レーダー計測で得た計測データから前項 3.5.2 の手法を用いてレーダー設置位置を推定する。
4. 各々の解析点における計測データに含まれる散乱波の位相から式 3.19 を用いて各点の微小変位（移動量） $\Delta s$  に変換する。
5. 各々の解析点における微小変位（移動量） $\Delta s$  と、レーダー電波の入射角  $\theta$  および方位角  $\varphi$  を用いて、前項 3.5.1 で示す手順により構造物の直交方向（水平方向および鉛直方向）に沿った変位を抽出する。

計測対象構造物の直交方向に沿った微小変位（移動量）に対して周波数解析等を行うことにより、構造物の面的振動特性を得ることが可能となる。

## 3.6 まとめ

電波を用いた計測手法のうち、面的な計測が可能なイメージングレーダーを用いると、構造物の面的計測が実現できる可能性がある。人工衛星や航空機などに搭載される合成開口レーダーとして実用化されているイメージングレーダーは、地表の大まかな変化を捉えることができ、さらに構造物の変状を捉える可能性がある。さらに近年は高速なサンプリング周期で面的振動計測が行える可能性がある高速イメージングレーダーが開発され、これを用いることで構造物の面的な振動計測が可能となる見込みが高まっている。以上を踏まえて、第3章で得た知見と成果を以下の通りまとめる。

- 人工衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）の計測データを用いた差分干渉解析の結果、散乱波の位相差から観測対象（地表）の大まかな変位を把握することができるが、構造物の細かな変化を捉えることは困難であった。しかし、散乱波の強度差が大きい箇所から、地震災害で被災した構造物が抽出でき、他の計測データおよび観測対象においても展開できる可能性がある。
- レーダーを構造物の面的計測に用いる場合は、レーダーの観測視野から構造物の位置を表す直交座標への座標変換（マッピング）が必要となる。
- レーダーの計測データのうち計測点における微小変位を表す位相データは、レーダーと計測対象を結ぶスラントレンジ方向の変位であるため、構造物の水平、鉛直方向すべての変位を含んだデータとなる。それらを各方向に分離するために、レーダー電波の入射角および方位角を用いた変換法を示した。
- さらに構造物の水平方向および鉛直方向の変位（振動）を精緻に把握するためには、複数のレーダーを用いた同時計測を行い、各々のレーダーの電波の入射角および方位角を求めた上で、計測データの合成、分離を行うことが必要となる。これら計測データの合成、分離法を示した。
- なお、座標変換を行うためには計測の際にレーダーを設置した位置を特定し、計測対象との位置関係を把握した上で入射角と方位角を得る必要があるが、レーダー設置位置の推定手法として、レーダーで得た計測データをから比較的信号強度が高い点を解析点として複数抽出し、その解析点の座標とレーダーとの間の距離（スラントレンジ距離）をもとに統計的に推定する方法を示した。
- 以上を踏まえ、レーダーを用いて構造物の面的振動計測を行うための手順（フロー）を示した。



## 第 4 章

# 電波を用いた面的振動計測の検証

---



## 4.1 はじめに

第4章では、第3章で述べた高速イメージングレーダーを用いた構造物に対する面的振動計測法を実際の高層建物に適用し、計測データの処理・分析を通じて本手法の検証を行うとともに計測法としての有用性を示す。

計測対象とした建物は、図4.1に概要を示す千葉県内に建つ高層鉄骨造建物（地下1階，地上20階，塔屋1階）であり，用途は学校（研究室・実験室等）である。

この建物の高層部基準階（5階～19階）の平面寸法は39.6[m]×26.4[m]で建物全高は91.77[m]であるが，高層部基準階の最高高さは85.85[m]となっている。基礎は杭基礎で，内部には粘性制震壁が1階から17階に設置されている。なお，外壁は，アルミカーテンウォール，タイル，ガラスなどで構成されている。

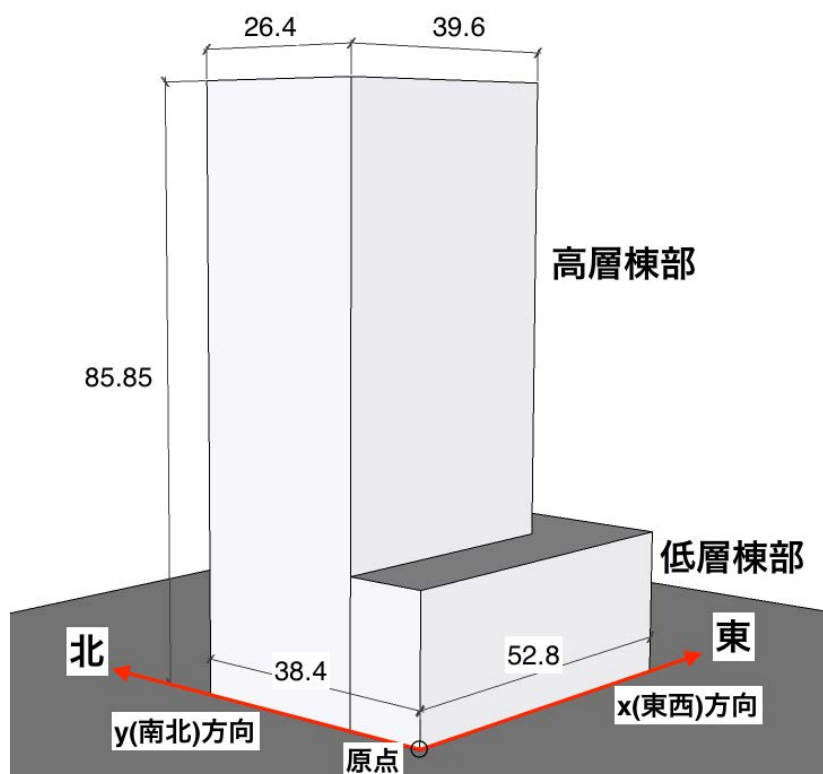


図 4.1 計測対象建物

この建物は、竣工後の使用開始後に山田，鈴木，川島 [58][59][60] により，常時微動測定，人力加振実験，地震動および台風時の振動観測が行われており，速度計を建物内部に複数台設置して微動計測を行った計測値と部分空間法により求めた伝達関数（絶対値と位相差）との比較から，表 4.1 に示す固有周期が求められている．なお減衰定数は常時微動レベルでは 1[%] 以下で，地震時には 4[%] 程度に高まっていたことがあわせて報告されている．

表 4.1 計測対象建物の固有周期

	短辺方向 (y 軸)	長辺方向 (x 軸)	ねじれ方向
1 次	1.66 秒 (0.60Hz)	1.53 秒 (0.65Hz)	1.44 秒 (0.69Hz)
2 次	0.55 秒 (1.81Hz)	0.52 秒 (1.94Hz)	0.52 秒 (1.92Hz)
3 次	0.34 秒 (2.94Hz)	0.31 秒 (3.23Hz)	0.36 秒 (2.78Hz)

## 4.2 高層建物に対する面的振動計測

### 4.2.1 計測の概要

図 4.2 に示す通り，計測対象建物の 1 階西南角部から西側に 17[m]，南側に 26[m] 離れた点に，図 3.13 で示したレーダー（高速イメージングレーダー）を設置し，送受信アンテナの仰角を  $60^\circ$  に設定して約 10 分間の計測を行った．計測当日の天候は晴天でほぼ無風であり，山田ら [58] が行った常時微動測定の場合とほぼ等しい．なおレーダーの計測周期（サンプリング周波数）は  $0.002[\text{sec.}]$  ( $500[\text{Hz}]$ ) と設定し，取得した計測データのばらつきを抑えるために 10 回分の計測値を，加算（積分）平均したデータを以下の解析に用いた．そのため，本計測における実効サンプリング周波数は  $50[\text{Hz}]$  である．

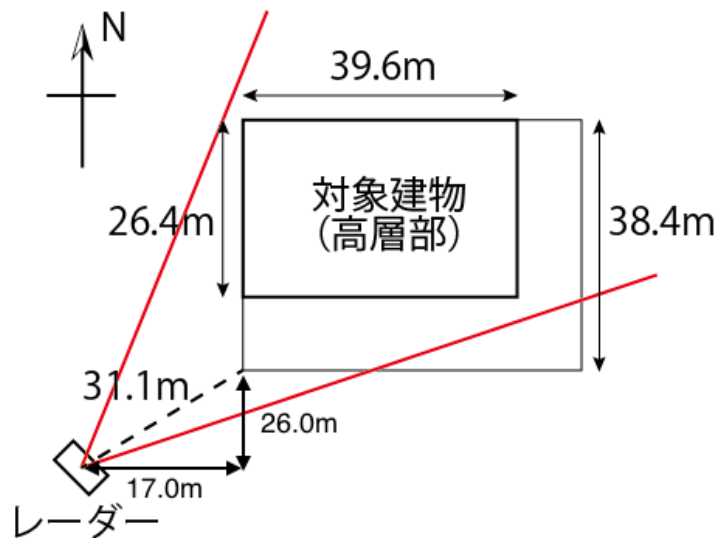


図 4.2 計測概要（レーダーと対象建物の配置）

本計測で取得した散乱波の強度画像を図 4.3 に示す．図 4.3 の縦軸はレーダーと対象建物の間お距離（スラントレンジ距離）を表し，横軸はレーダーの受信アンテナの中心から，レンジ方向と直交する方向（アジマス方向）の距離（アジマス距離）を表している．また，図 4.3 の各点の色（黒色から白色）は送信波に対する受信波の強さの相対値（比）を示す散乱波の強度を表しており，白色の箇所が周囲に比べ比較的散乱波の強度が高い．（なお，計測対象建物の下部に傾斜して視認できる計測対象に似た像



は、計測対象建物の周囲の建物等から反射した電波による偽像であり、解析点の抽出からは除外する。)

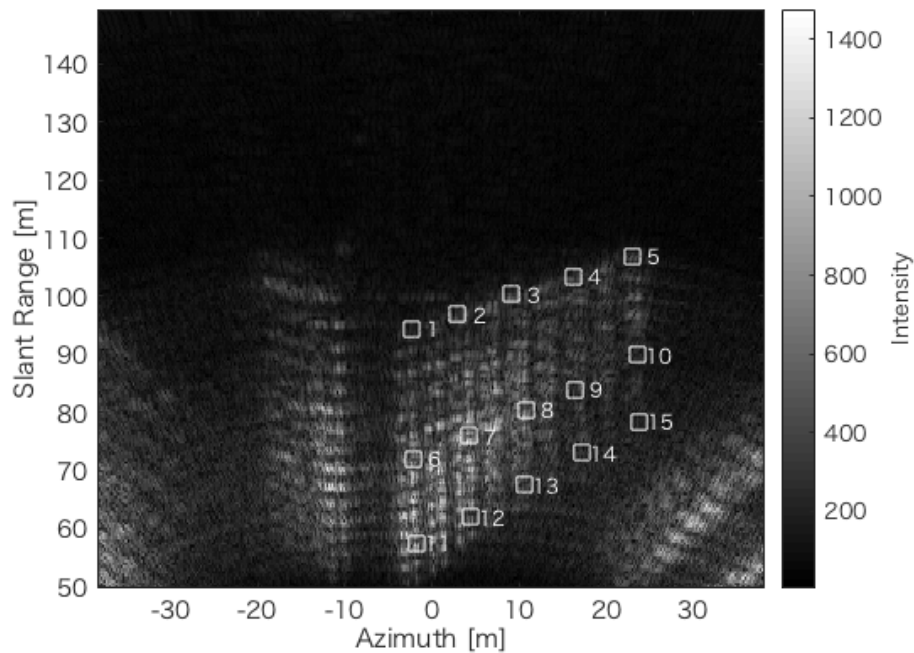


図 4.3 散乱波の強度画像

#### 4.2.2 レーダー設置位置の推定

本計測では、レーダーの設置位置は実測により既知であり、レーダーと対象建物との相対位置は明確であるが、対象構造物の周辺環境によっては、レーダー設置位置と対象構造物との間に障害物などがある場合など相対位置が未知となる場合がある。そこでレーダーの設置位置をレーダーの計測データを用いて推定する方法について検討を行う。

まず、図 4.3 に示す受信強度画像から、散乱波の電波強度が比較的高い箇所を解析点として抽出し、その各々のスラントレンジ距離  $S$  をそれぞれ読み取り、対象建物の図面から、これらの解析点に相当する箇所の座標  $(X, Y, Z)$  を図 4.4 に示すように読み取った。なお、図 4.4 の直交座標の原点は建物西南角 1 階（地上）としている。読み取った解析点およびスラントレンジ距離を表 4.2 に示す。

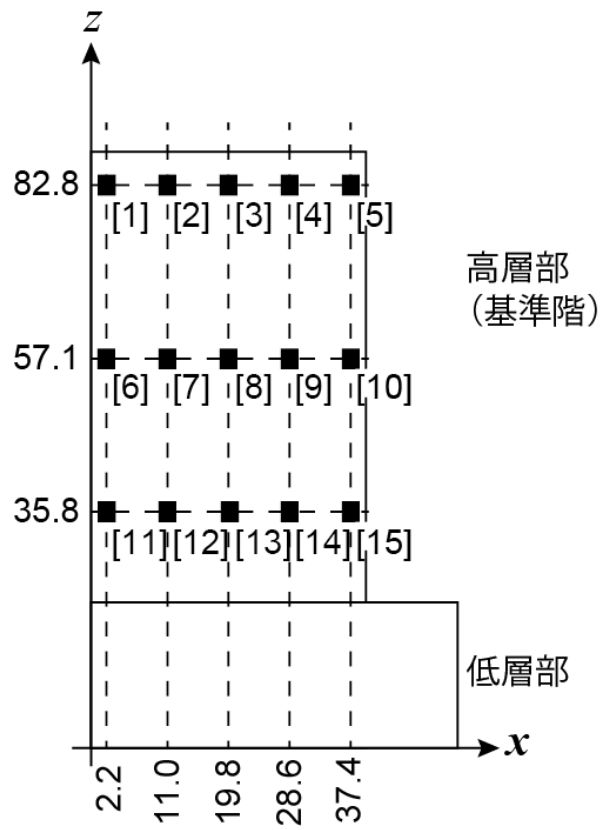


図 4.4 計測対象建物図面から抽出した解析点

表 4.2 レーダー計測値（画像）と計測対象建物図面から抽出した解析点一覧

解析点	(レーダー計測値)	(建物図面)		
	スラントレンジ	長辺方向	短辺方向	鉛直方向
	距離 (S) [m]	(X) [m]	(Y) [m]	(Z) [m]
1	94.41	2.2	12.0	82.8
2	96.91	11.0	12.0	82.8
3	100.40	19.8	12.0	82.8
4	103.39	28.6	12.0	82.8
5	106.89	37.4	12.0	82.8
6	71.96	2.2	12.0	57.1
7	75.95	11.0	12.0	57.1
8	80.44	19.8	12.0	57.1
9	83.93	28.6	12.0	57.1
10	89.92	37.4	12.0	57.1
11	57.49	2.2	12.0	35.8
12	61.98	11.0	12.0	35.8
13	67.47	19.8	12.0	35.8
14	72.95	28.6	12.0	35.8
15	78.44	37.4	12.0	35.8

表 4.2 に示す全ての解析点から三つの点を抽出する組み合わせは、 ${}_{15}C_3=455$  通りで、その組み合わせの全てを、式 3.24 に代入して求めた結果を図 4.5 に示す。455 通りのうち、3つの球が交わる組み合わせは 331 通りであり、3つの球の交点（解）は 2 点あるため図 4.5 に示した点は 662 点である。

表 4.2 の解析点はいずれも建物南面の同一平面上にあり、3 点の組み合わせが一直線に並ぶ場合は交点を得ることができない。また図 4.3 の画像から読み取ったスラントレンジ距離は、レーダーの距離分解能 0.5[m] の誤差を含んでいる。さらに、図 4.3 の画像から読み取った解析点と、図 4.4 から読み取った解析点の位置にずれが生じている可能性がある。その結果、各々の解析点から求めたレーダー設置位置の推定値（図 4.5）は大きなばらつきを含んだ結果となる。

これらの大きなばらつきを持った集合からまず東西、南北および鉛直方向の最頻値を図 4.6 で示す通り求めた結果、本計測におけるレーダーの設置位置は、建物 1 階西南角部から西側に 19[m]、南側に 28[m] と推定できる。

最頻値から大きく離れた解は、表 4.3 で示す通り、表 4.2 で示したスラントレンジ距離と、図 4.5 で推定したレーダー設置位置（最頻値）を用いて求めた（再計算した）スラントレンジ距離に大きな差が生じている。

これらの（レーダー計測値から読み取った）スラントレンジ距離と、レーダー設置位置の推定値（最頻値）と解析点の各々の座標を用いて再計算した距離（スラントレンジ距離差）が大きい解析点では、図 4.3 の画像から読み取った解析点と、図 4.4 から読み取った解析点の位置にずれが生じている可能性がある。そこで、それらの解析点（差が 0.5[m] を超える解析点）を除外して再度式 3.24 に代入してレーダーの設置位置を求めた。結果を図 4.7 に示す。

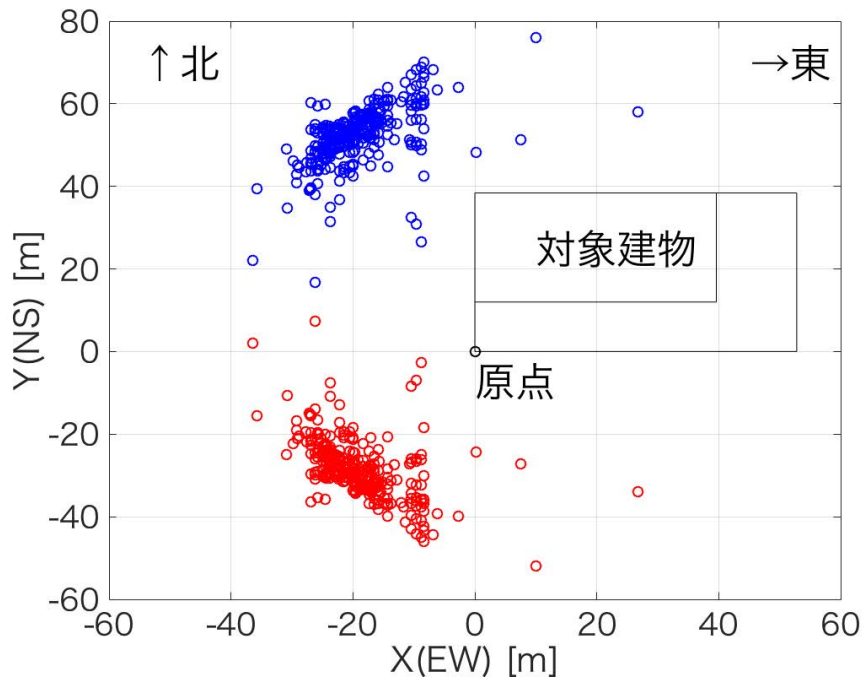
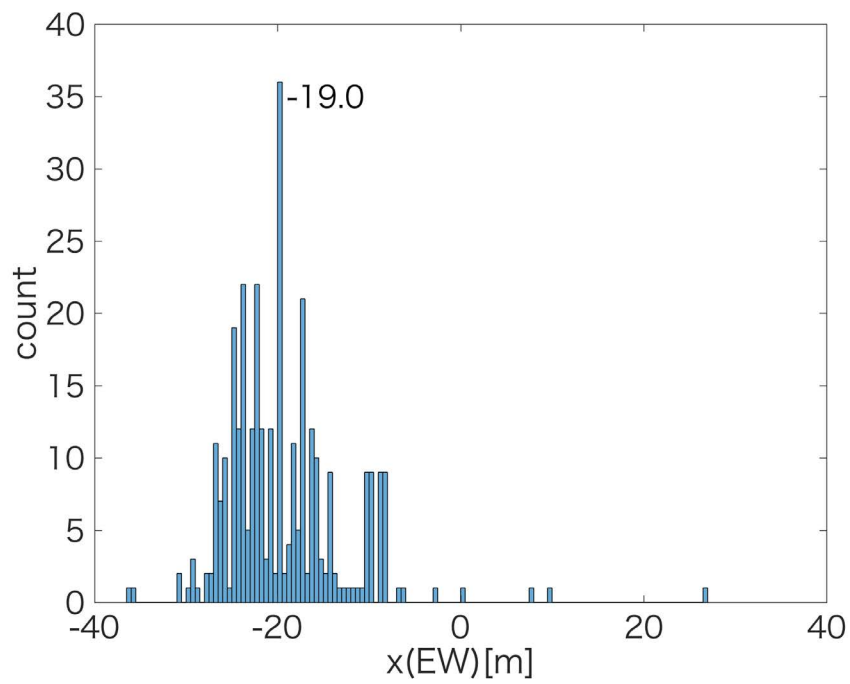
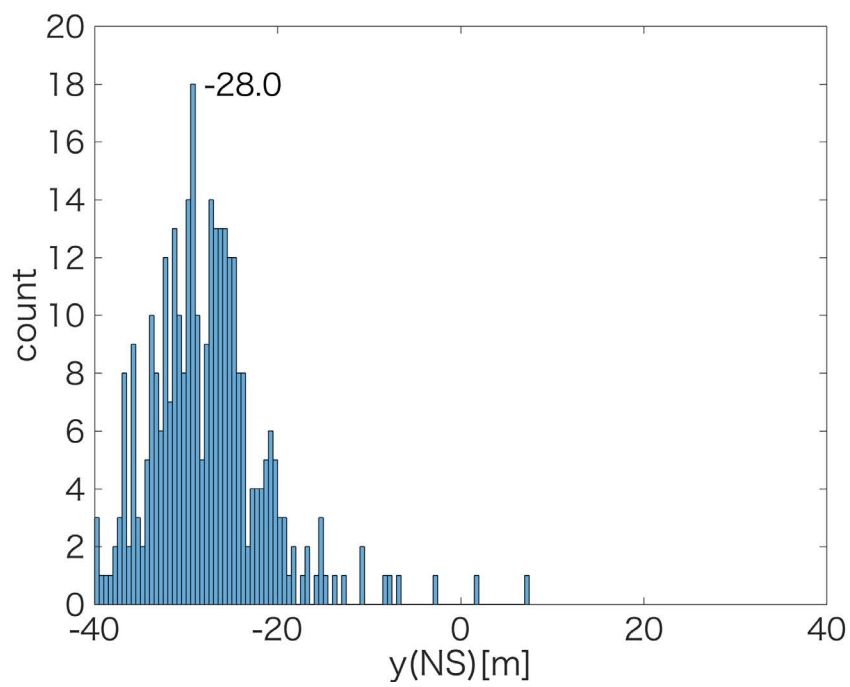


図 4.5 レーダー設置位置の推定結果



(a) x(東西) 方向



(b) y(南北) 方向

図 4.6 レーダー設置位置の推定結果（水平方向の頻度分布）

表 4.3 スラントレンジ距離の再計算値との比較

解析点	スラントレンジ 距離 (S) [m]	スラントレンジ 距離 (再計算) (S') [m]	再計算値との差 (S-S') [m]
1	94.41	94.37	0.04
2	96.91	96.73	0.18
3	100.40	99.81	0.59
4	103.39	103.55	0.15
5	106.89	107.87	0.99
6	71.96	72.87	0.91
7	75.95	75.90	0.05
8	80.44	79.79	0.65
9	83.93	84.42	0.48
10	89.92	89.67	0.25
11	57.49	57.72	0.23
12	61.98	61.50	0.48
13	67.47	66.24	1.23
14	72.95	71.75	1.20
15	78.44	77.86	0.58

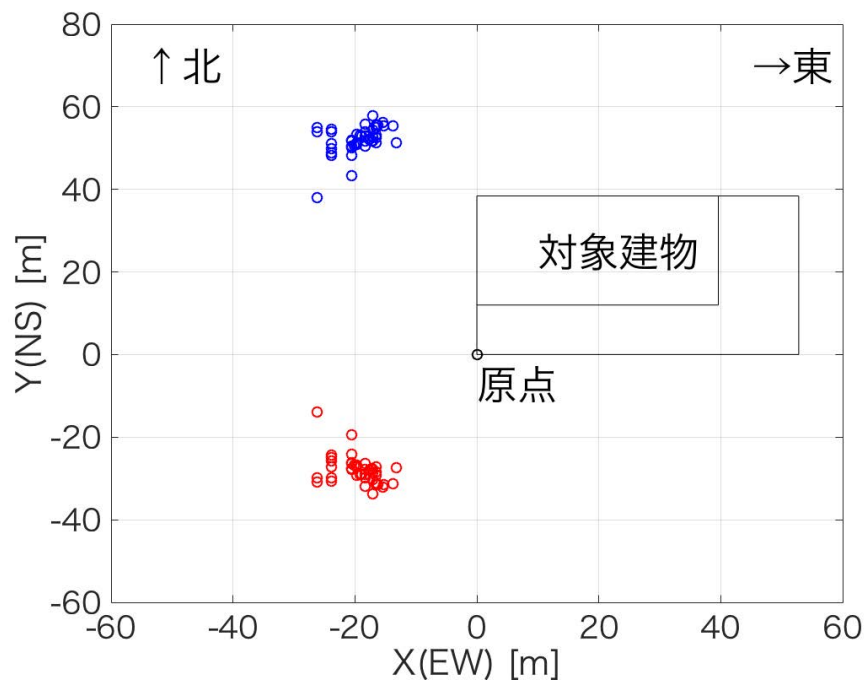


図 4.7 レーダー設置位置の推定結果（再計算）

図 4.7 に大きなばらつきはなく、それらの平均値からレーダー設置位置（推定値）を再度求めると、建物 1 階西南角部から西側に 19.3[m]，南側に 28.0[m] である．この値は全ての点を式 3.24 に代入して求めたレーダー設置位置から求めた最頻値と等しい．

#### 4.2.3 面的振動計測における座標変換

前項で推定したレーダーの設置位置を用いて、レーダーと各々の解析点を結ぶ線の角度、すなわちレーダーの送信波の入射角  $\theta$  と方位角  $\varphi$  は、表 4.4 に示す通り求めることができる．これらの  $\theta$  と  $\varphi$  は、レーダー計測値から求めた推定値と実測値から求めた値の差は概ね  $1.5^\circ$  以内であり、計測データ（スラントレンジ方向の変位データ）を、構造物の各方向成分に分解する際には、ほぼ等しいと考えられる．

表 4.4 レーダー設置位置から換算した各解析点の入射角と方位角（実測値との比較）

解析点	(推定値)			(実測値)		
	入射角 $\theta$	方位角 $\varphi$	スラントレンジ 距離（再計算）	入射角 $\theta$	方位角 $\varphi$	スラントレンジ 距離
1	61.3°	62.1°	94.4m	62.8°	63.2°	93.1m
2	58.9°	53.1°	96.7m	60.3°	53.6°	95.3m
3	56.1°	45.9°	99.8m	57.4°	45.9°	98.3m
4	53.1°	40.0°	103.6m	54.3°	39.8°	101.9m
5	50.1°	35.3°	107.9m	51.3°	34.9°	106.1m
6	51.6°	62.1°	72.9m	53.3°	63.2°	71.2m
7	48.8°	53.1°	75.9m	50.4°	53.6°	74.1m
8	45.7°	45.9°	79.8m	47.2°	45.9°	77.8m
9	42.6°	40.0°	84.4m	43.9°	39.8°	82.4m
10	39.6°	35.3°	89.7m	40.7°	34.9°	87.5m
11	38.3°	62.1°	57.7m	40.1°	63.2°	55.6m
12	35.6°	53.1°	61.5m	37.2°	53.6°	59.2m
13	32.7°	45.9°	66.2m	34.1°	45.9°	63.9m
14	29.9°	40.0°	71.8m	31.1°	39.8°	69.3m
15	27.3°	35.3°	77.9m	28.3°	34.9°	75.4m



#### 4.2.4 変位記録の評価

すべての解析点における計測開始時からの変位（移動量） $\Delta s$  を，図 4.8，図 4.9，図 4.10 に示す．本計測では計測時間が約 10 分（600 秒弱）と限られていたが，すべての解析点において変位  $\Delta s$  が減少傾向にある．この現象は，本計測に先立ち計測対象建物の北西面から同様に約 10 分間の試験計測を行った際に  $\Delta s$  が増加する傾向が見られ，さらに各々の解析点における変位計測値の傾きが異なっていることから，レーダーが計測中に温度変化などで変形することにより生じたドリフトとは考えにくい．そのため，計測対象建物の南北壁面の温度差に起因する建物の微小な傾き変化，あるいは計測中の湿度変化による電波の伝達時間の変化 [61] などの要因による長周期の変化を捉えた可能性がある．

本計測では，表 4.1 で示した固有振動を抽出し，対象建物の面的な振動性状を捉えることを目的として，各々の解析点の変位計測値に 0.05[Hz]～10[Hz] のバンドパスフィルタを加えた解析を行う．

全ての解析点の変位計測値に上記のバンドパスフィルタを加えたフーリエ振幅スペクトルを図 4.11，図 4.13，図??にそれぞれ示す．これらのほぼ全ての解析点において，0.59[Hz] と 0.65[Hz]，さらに 0.69[Hz] の卓越振動が認められる．これらは山田ら [58] の計測で求めた建物短辺方向，長辺方向の並進一次卓越周波数およびねじれ方向の一次卓越周波数とほぼ等しい．

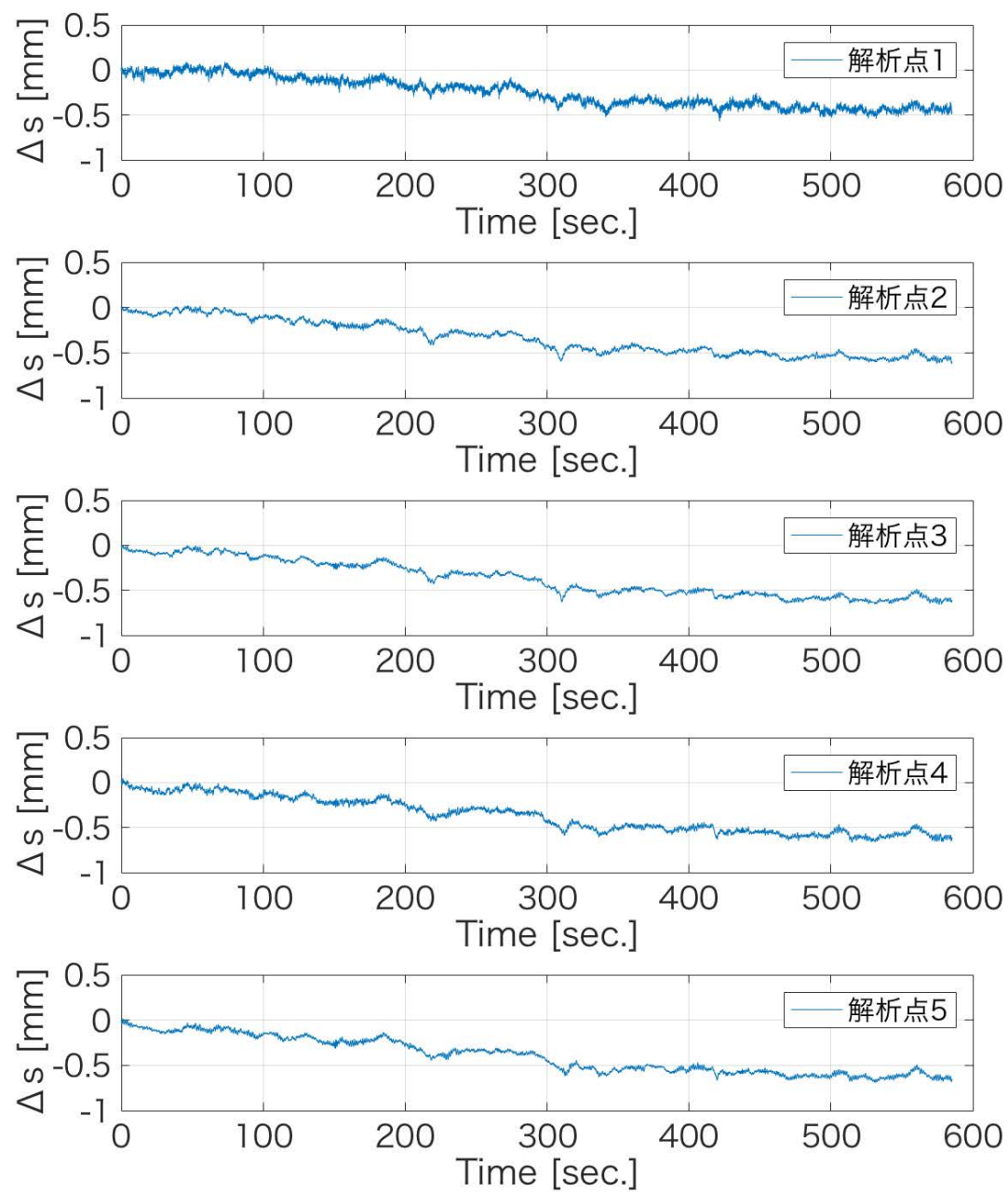


図 4.8 スラントレンジ方向の変位  $\Delta s$  (解析点 1~5 (建物 19 階))

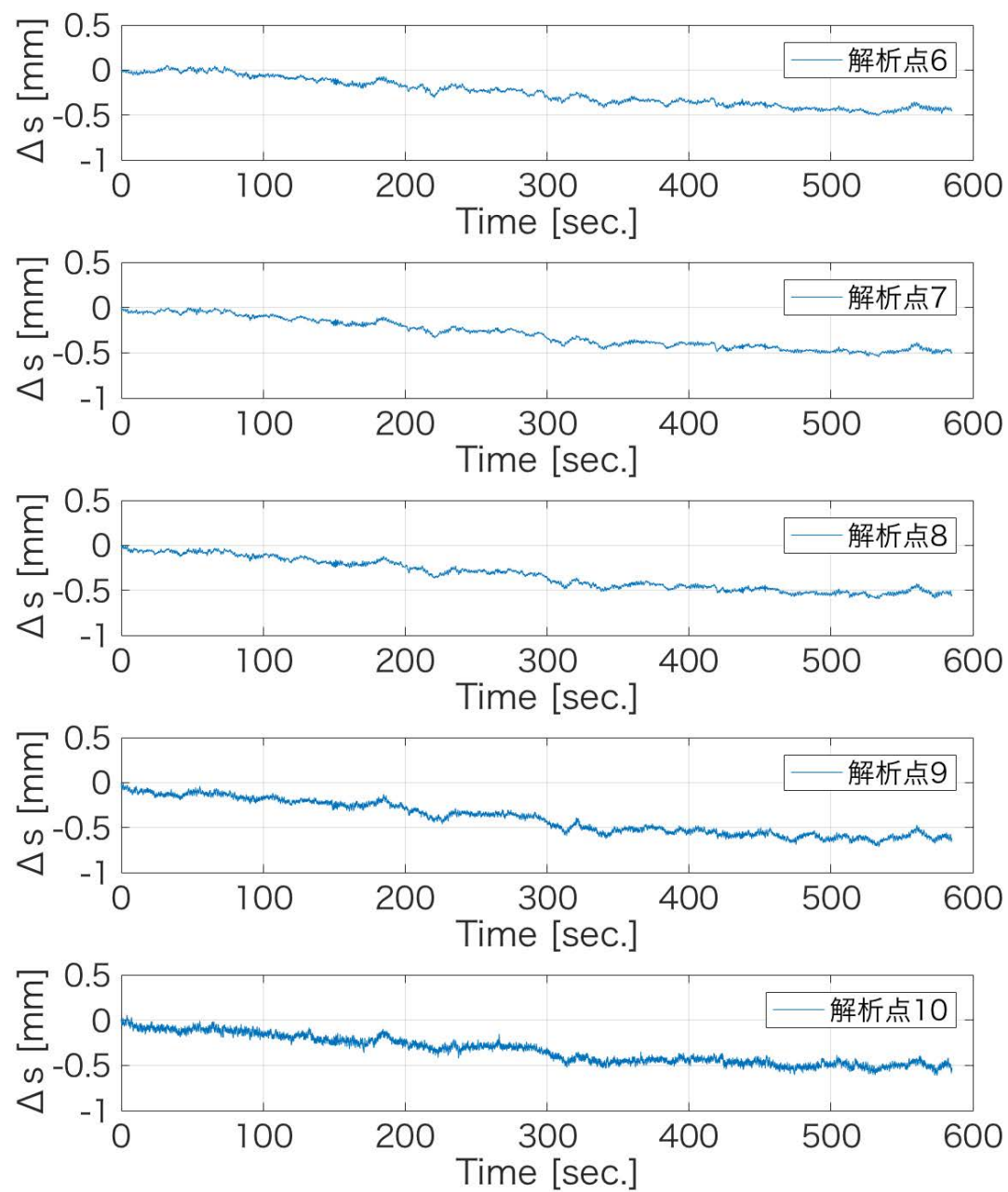


図 4.9 スラントレンジ方向の変位  $\Delta s$  (解析点 6~10 (建物 13 階))

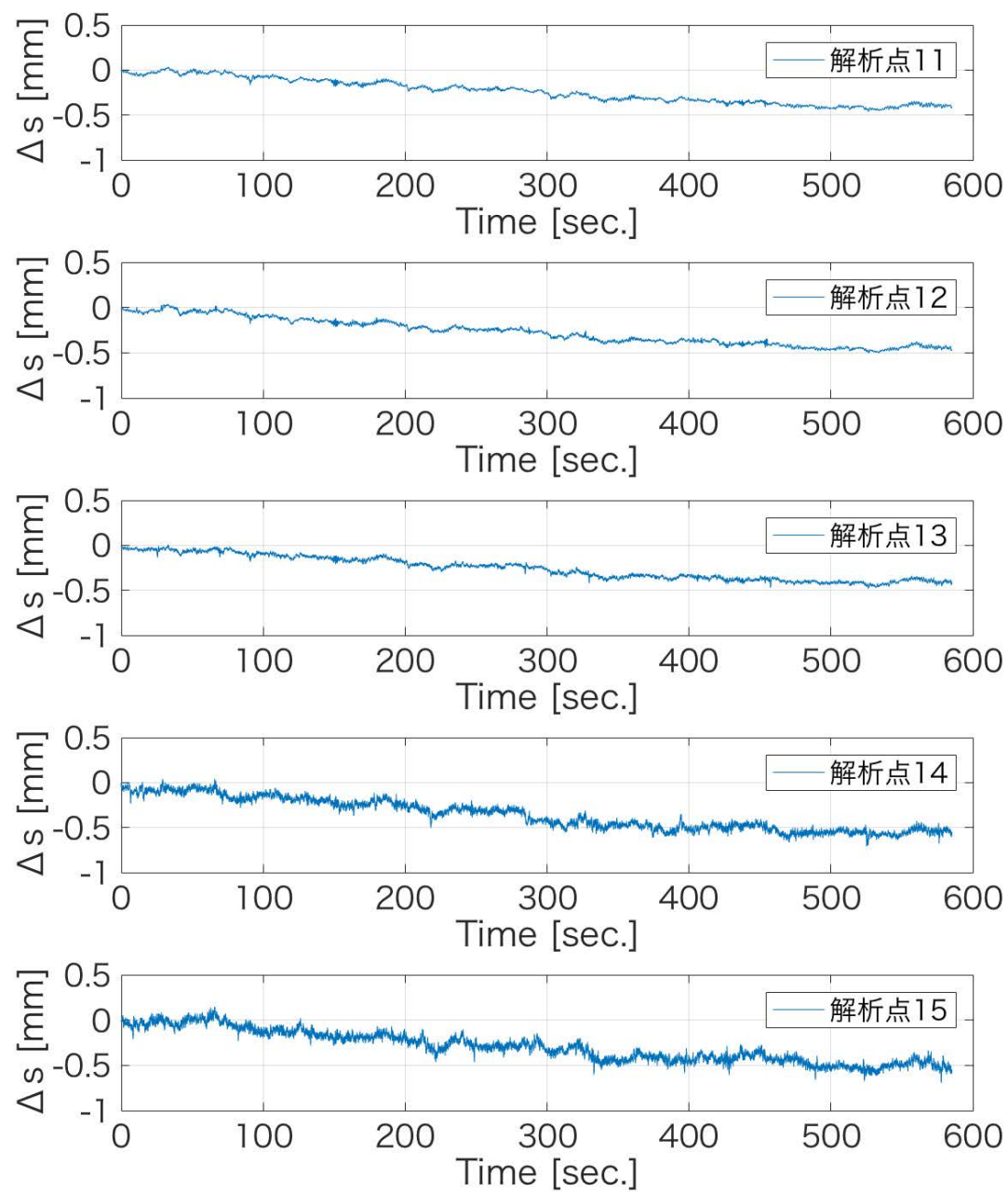


図 4.10 スラントレンジ方向の変位)  $\Delta s$  (解析点 11～15 (建物 8 階))

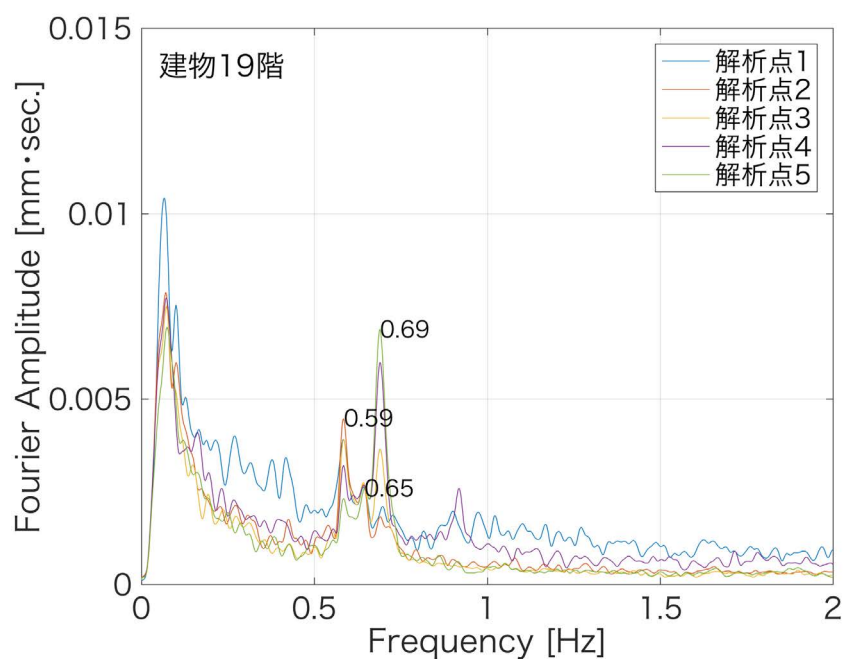


図 4.11 建物 19 階（解析点 1 から 5）のスラントレンジ方向変位のフーリエ振幅スペクトル

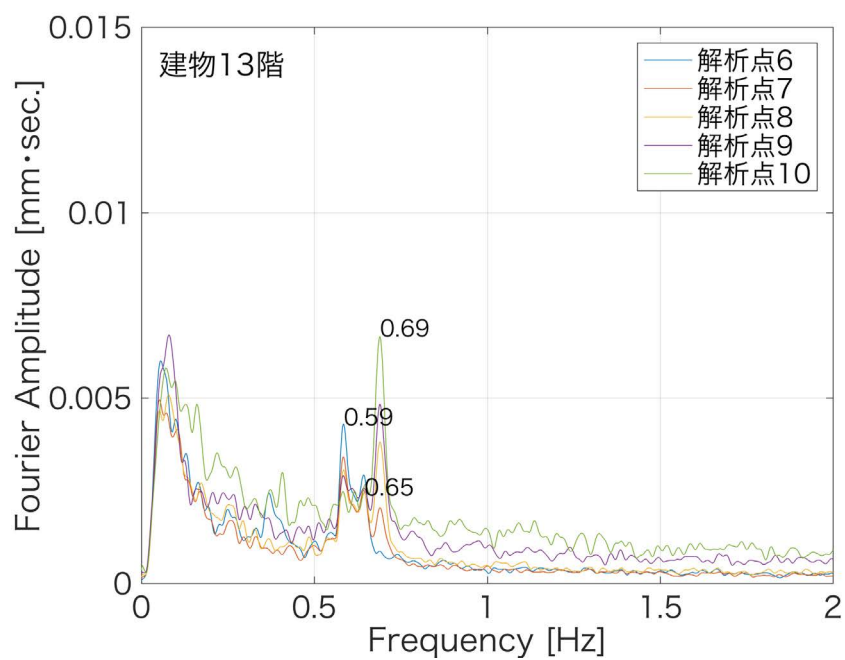


図 4.12 建物 13 階（解析点 6 から 10）のスラントレンジ方向変位のフーリエ振幅スペクトル

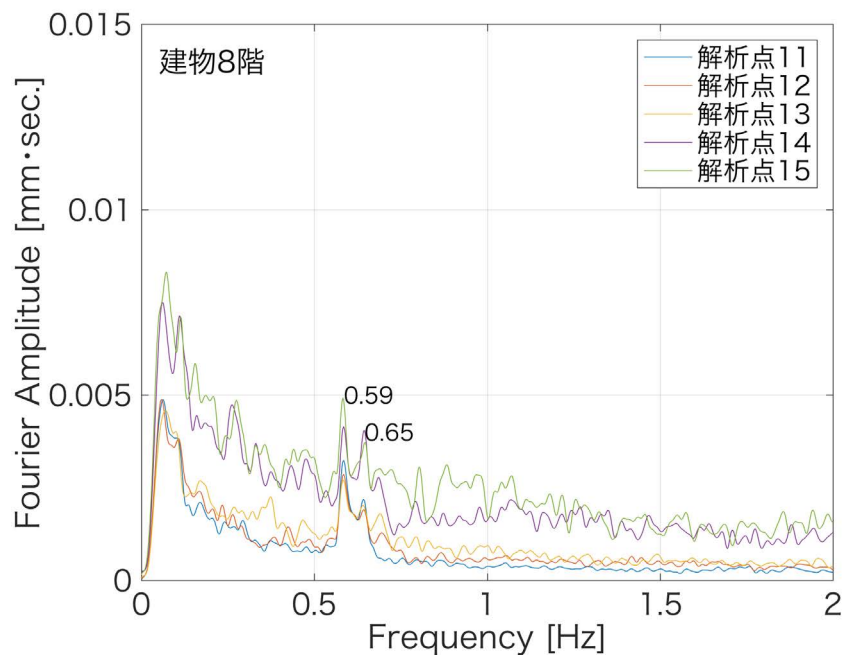


図 4.13 建物 8 階（解析点 11 から 15）のスラントレンジ方向変位のフーリエ振幅スペクトル

次に建物高層部の解析点 1 と解析点 5，および建物中層部の解析点 6 と解析点 10 の相互に振幅二乗コヒーレンスを求めた結果を図 4.14 に示す．いずれの組み合わせにおいても建物短辺方向および長辺方向の並進一次固有周波数とほぼ等しい 0.59[Hz]，0.65[Hz] の卓越周波数を確認できる．

また，対象建物のねじれ性状を把握するために，建物東西端および中央部の変位記録の差（解析点 1 と解析点 5，解析点 1 と解析点 3，さらに解析点 3 と解析点 5 の差）を求め，さらにその差分に対し周波数解析を図 4.15 に示す通り行った．その結果，建物短辺方向の回転（ねじれ）とみられる 0.69[Hz] の卓越周波数を確認した．

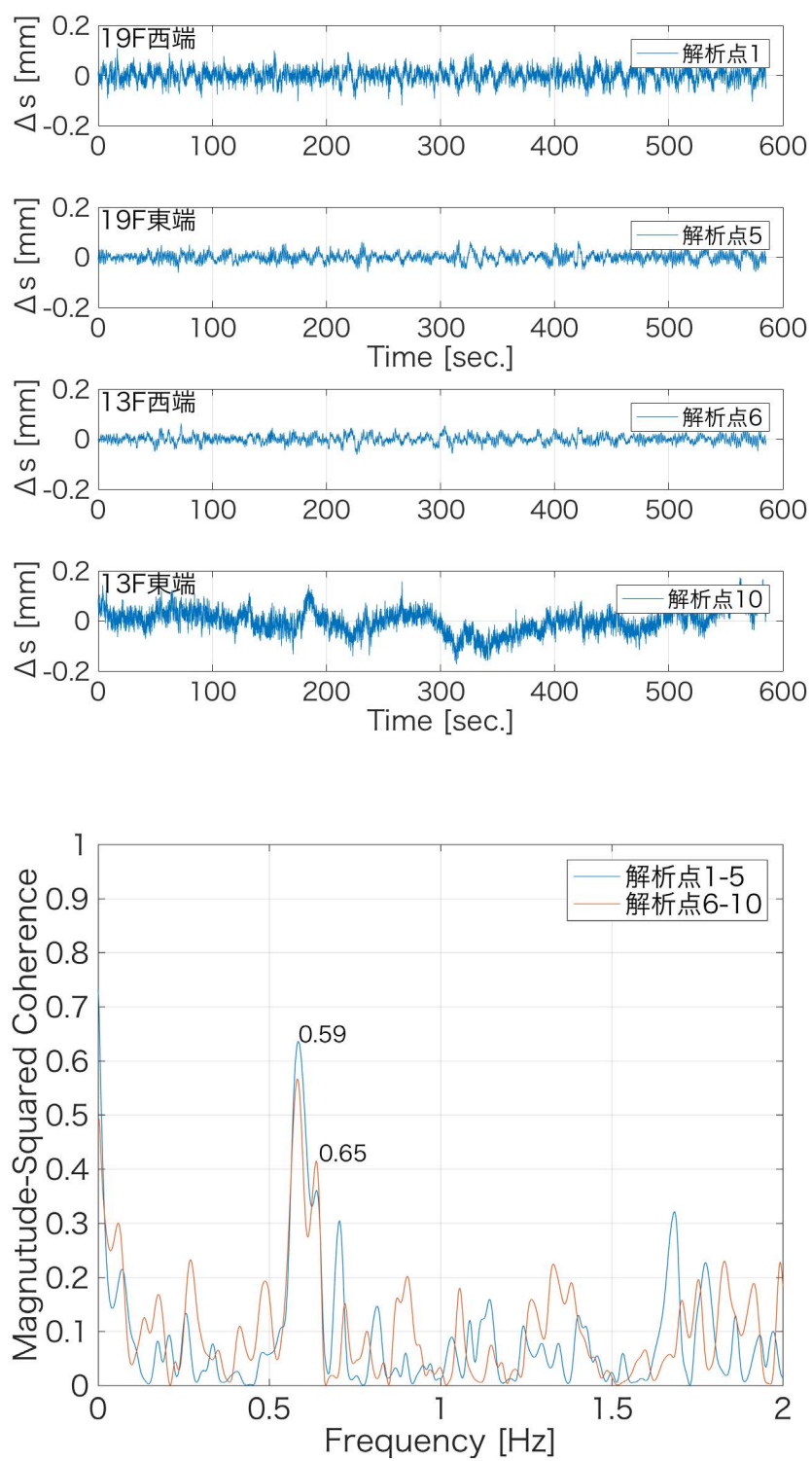


図 4.14 建物東西端の変位記録と振幅二乗コヒーレンス



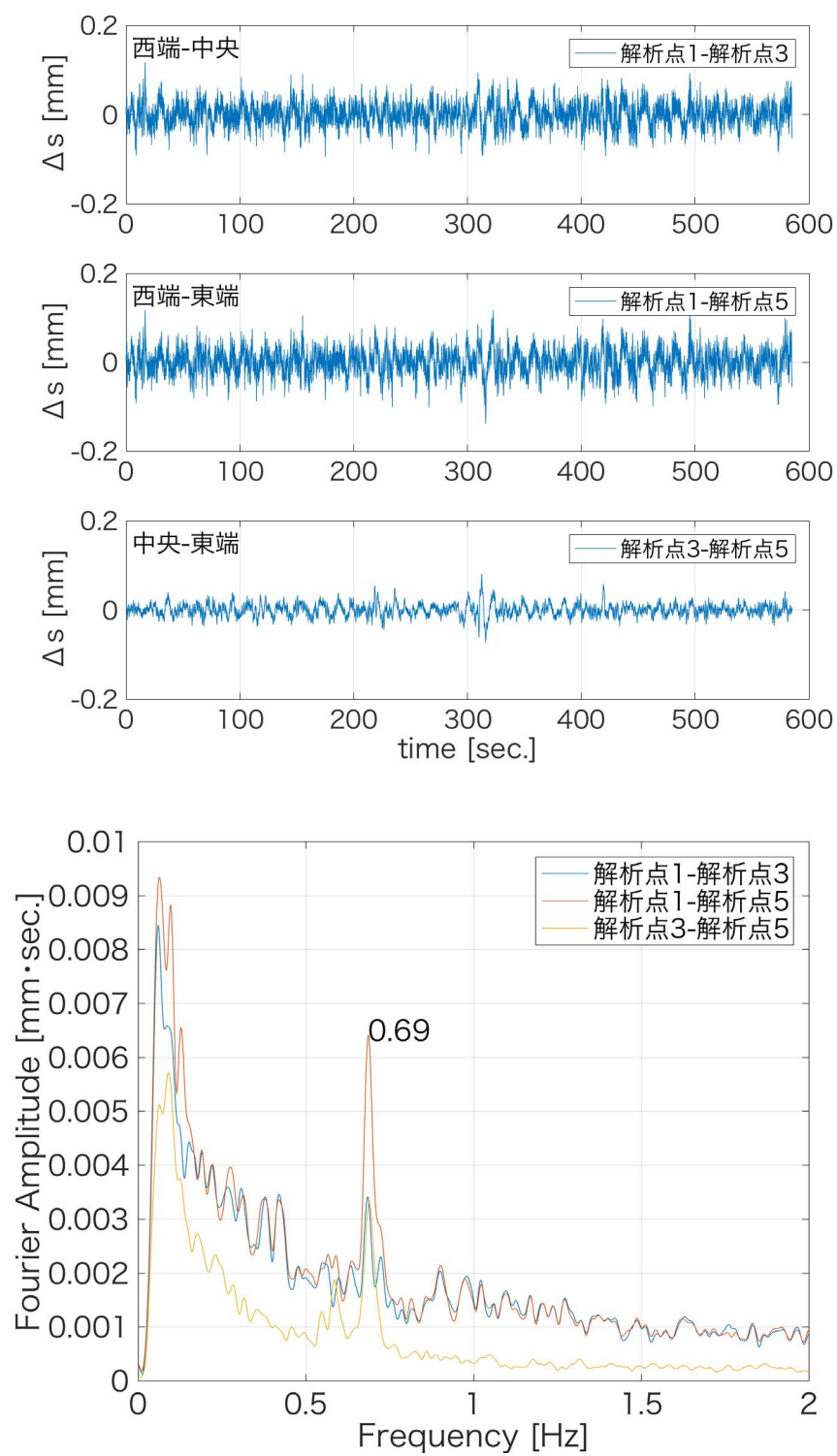


図 4.15 建物東西端の変位記録差分と周波数解析（フーリエ振幅スペクトル）



## 4.3 複数レーダーの適用

### 4.3.1 複数レーダーを用いた計測の概要

前節 4.2 で 1 台のレーダーを用いた計測を行った結果，各々の計測点（解析点）におけるスラントレンジ方向の変位の計測データが得られ，周波数解析の結果，表 4.1 に示す既往の結果とほぼ等しい卓越振動が得られたが，建物長辺方向および短辺方向の動きを分離してそれぞれ捉えることは困難であった．そこで，建物の振動性状をより詳しく捉えるために，図 4.16 に示す通り，計測対象建物の 1 階東南角部近傍の建物東南角から約 30[m] 離れた地点と，建物西南角から約 80[m] 離れた地点（レーザ距離計を用いたおよその計測値）にそれぞれ 1 台，計 2 台のレーダーを設置し，双方のレーダーから同時に計測を行った．なお本計測における実効サンプリング周波数は前節 4.2 と同じ 50[Hz] とした．

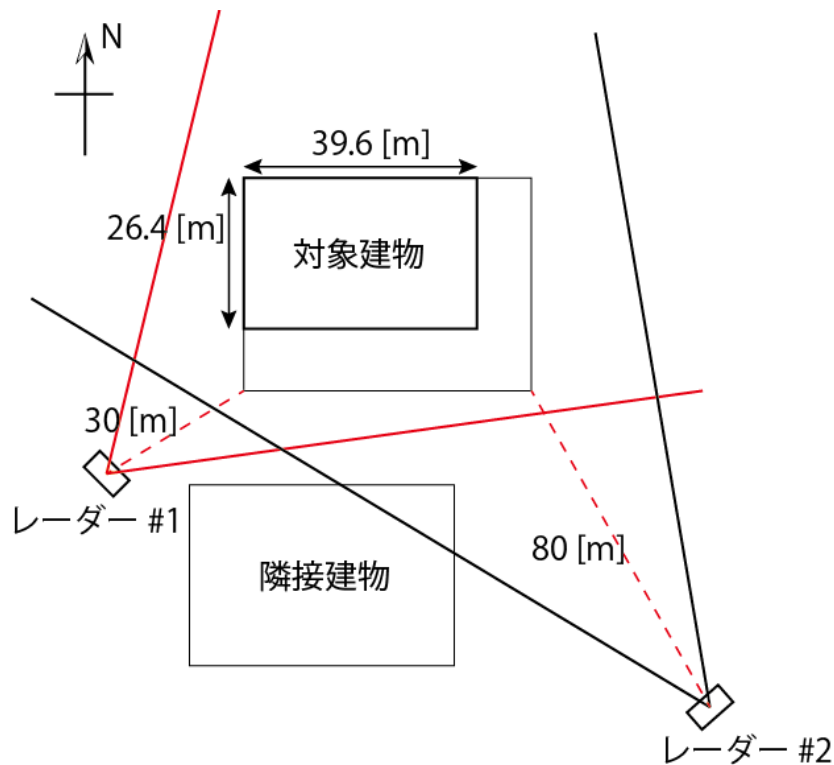


図 4.16 複数レーダーを用いた計測（レーダーの配置）

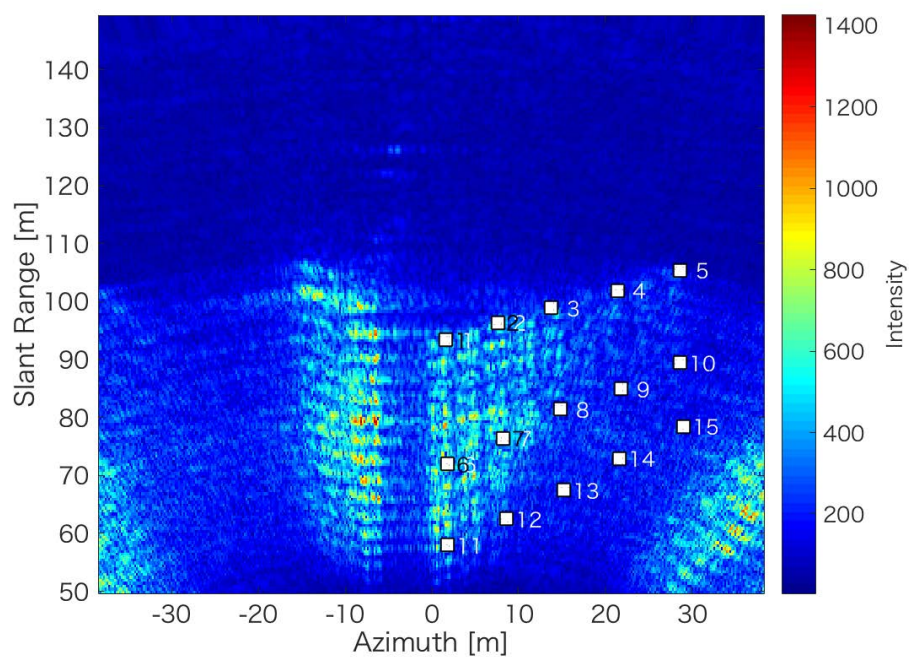
### 4.3.2 レーダー設置位置の推定

各々のレーダーで取得した散乱波の強度画像を図 4.17 に示す．前節 4.2 と同様に，各々の画像の縦軸はレーダーと対象建物の間の距離（スラントレンジ距離）を表し，横軸はレーダーを中心とした対象建物のアジマス距離を表している．散乱波強度においても同様に，赤色から黄色の箇所が青色の箇所より比較的散乱波の強度が高い．

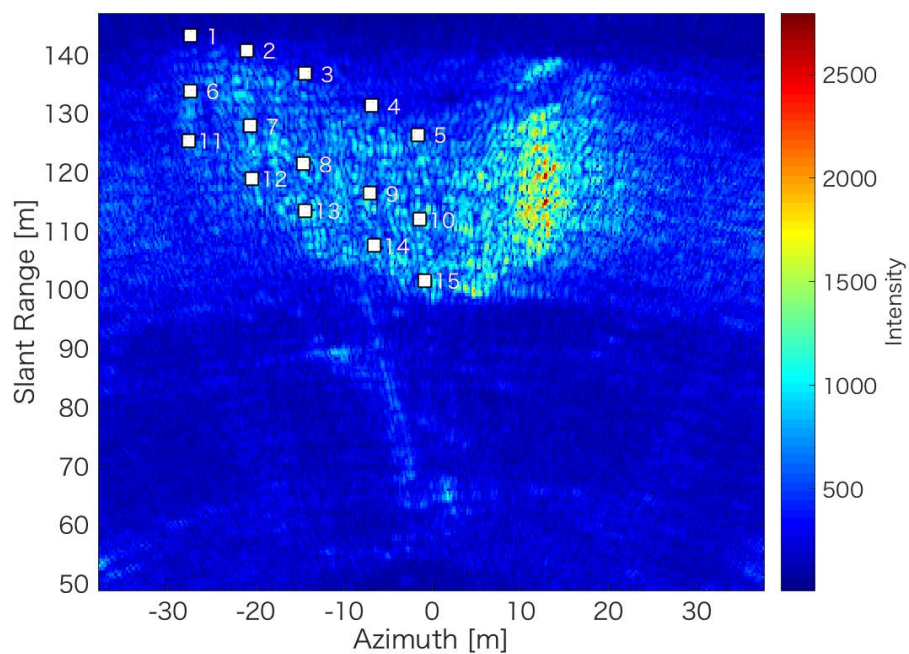
なお本計測では，レーダーを設置した位置と対象建物の間に障害物が多く，実測によるレーダー設置位置の計測が困難であったため，レーダーで取得した計測データからレーダー設置位置を推定する手法を用いる．

図 4.17 から比較的散乱波強度が高い点を解析点として抽出し，図 4.4 に示す対象建物の図面から読み取った解析点との対応を行った．レーダー#1 およびレーダー#2 の画像から抽出した結果を表 4.5 に示す．

抽出した解析点を用いて  ${}_{15}C_3 = 455$  通りの組み合わせすべてから求めた交点を図 4.18 に示し，それらの最頻値を各レーダーの位置と推定した．レーダー#1 の位置は建物 1 階西南角部（原点）から西側に 17.5[m]，南側に 28.5[m] とし，レーダー#2 の位置は，建物西南角部から東に 93.5[m]，南に 65.5[m] と推定した．



(a) レーダー#1 の散乱波強度画像



(b) レーダー#2 の散乱波強度画像

図 4.17 複数のレーダーを用いた計測における受信強度画像

表 4.5 複数レーダーを用いた計測における解析点一覧とスラントレンジ距離

解析点	長辺方向 (X)	短辺方向 (Y)	鉛直方向 (Z)	スラントレンジ距離 (S)	
				レーダー#1	レーダー#2
1	2.2	12.0	82.8	93.41	143.27
2	11.0	12.0	82.8	96.41	140.79
3	19.8	12.0	82.8	98.90	136.82
4	28.6	12.0	82.8	101.90	131.36
5	37.4	12.0	82.8	105.39	126.40
6	2.2	12.0	57.1	71.97	133.84
7	11.0	12.0	57.1	76.45	127.89
8	19.8	12.0	57.1	81.44	121.44
9	28.6	12.0	57.1	84.93	116.48
10	37.4	12.0	57.1	89.42	112.01
11	2.2	12.0	35.8	57.98	125.41
12	11.0	12.0	35.8	62.47	118.96
13	19.8	12.0	35.8	67.47	113.50
14	28.6	12.0	35.8	72.95	107.55
15	37.4	12.0	35.8	78.44	101.59

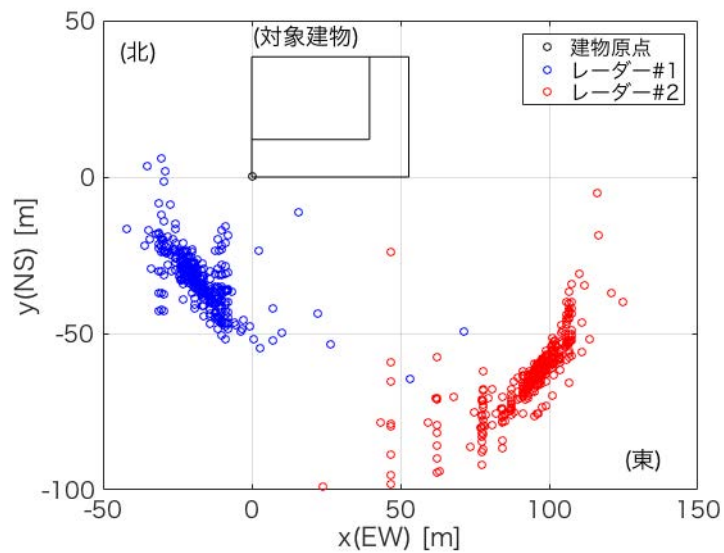


図 4.18 レーダー設置位置の推定結果

### 4.3.3 複数レーダーを用いた計測における座標変換

レーダー設置位置の推定結果を踏まえて、それぞれの解析点における各々のレーダーから照射される電波の入射角  $\theta$  と方位角  $\varphi$  を求め、表 4.6 に示す。

表 4.6 各レーダーの設置位置から求めた解析点の入射角と方位角

解析点	レーダー#1			レーダー#2		
	入射角 $\theta$	方位角 $\varphi$	スラントレンジ 距離（再計算）	入射角 $\theta$	方位角 $\varphi$	スラントレンジ 距離（再計算）
1	61.3°	64.3°	94.3m	34.7°	139.6°	145.8m
2	59.1°	55.1°	96.5m	36.1°	136.8°	140.4m
3	56.3°	47.6°	99.5m	37.7°	133.5°	135.4m
4	53.4°	41.5°	103.1m	39.3°	129.9°	130.8m
5	50.5°	36.6°	107.3m	40.8°	125.9°	126.7m
6	51.7°	64.3°	72.8m	25.5°	139.6°	132.9m
7	49.0°	55.1°	75.7m	26.7°	136.8°	127.0m
8	46.0°	47.6°	79.4m	28.1°	133.5°	121.4m
9	42.9°	41.5°	83.9m	29.4°	129.9°	116.3m
10	39.9°	36.6°	89.0m	30.8°	125.9°	111.6m
11	38.4°	64.3°	57.6m	16.6°	139.6°	125.2m
12	35.8°	55.1°	61.2m	17.5°	136.8°	118.9m
13	33.0°	47.7°	65.7m	18.5°	133.5°	113.0m
14	30.2°	41.5°	71.1m	19.5°	129.9°	107.4m
15	27.7°	36.6°	77.1m	20.5°	125.9°	102.4m

### 4.3.4 複数レーダー計測におけるデータの時刻同期

複数のレーダーを用いた計測を行う際に、その各々の計測時刻が異なると、計測値から建物各方向の変位の抽出や周波数解析において異常値が出力される恐れがある。

複数のレーダー間の時刻同期を行うためには、計測開始前に各々のレーダーの計測データを保存する PC の時刻同期を行う必要がある。PC の時刻は概ね秒単位の表示であり、本計測のように 1 秒未満のサンプリング周期で計測データを保存する場合は、

各々の計測データの間の時刻差を 1 秒未満の精度で検出し、その時刻差分だけ一方の計測データの時刻をずらす必要がある。

本計測のレーダー#1 とレーダー#2 において、双方のデータの相互相関を図 4.19 に示す通り取得したところ、一方のレーダーの計測データの時刻を 11 サンプル (0.22[sec.]) ずらした場合に双方のデータの相関が最大となる。そのため、レーダー#2 のデータを 11 サンプル分時刻をずらして以降の解析を行う。

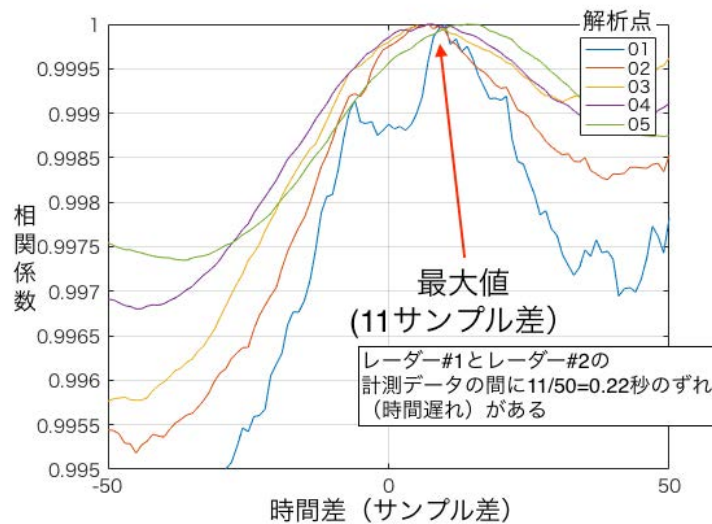


図 4.19 複数レーダーを用いた計測における計測データの相互相関

計測の際に GPS(GNSS) 受信機等を用いて高精度に時刻検知を行い、その時刻情報を計測データに付加する方法に対し、本方式は比較的簡便に行える。実効サンプリング周期が比較的低い 50[Hz] の計測では、本方式による時刻同期手法も有用と考えられる。

#### 4.3.5 複数レーダー計測における変位記録の評価

2 台のレーダーのスラントレンジ方向の変位記録を、図 4.20 から図 4.25 に示す。

ほぼすべての解析点において、前節で示したスラントレンジ方向の長周期変位と逆の傾向、すなわち建物の北方向に計測値が推移しており、レーダー#1 では前章の計測と同様に建物低層部東側の計測点 13 から 15 における計測値の変位振幅が大きい。また、建物低層部東側の計測値の変位振幅が大きく、ノイズ状の記録が見られることから、レーダーから解析点までの方向に建物低層棟部のカーテンウォールの反射波が干

渉している可能性がある。

また、レーダー#2の解析点のほぼ全てにおいては同時刻に混入するスパイク状の計測値の変動がみられる。これは、レーダー設置位置の前方に人などの通行があり、対象建物とレーダーとの間の電波が遮られたことが原因と考えられる。さらにレーダー#2においては建物高層部西側の解析点1の計測値の変位振幅が他の解析点と比べ顕著に大きい。

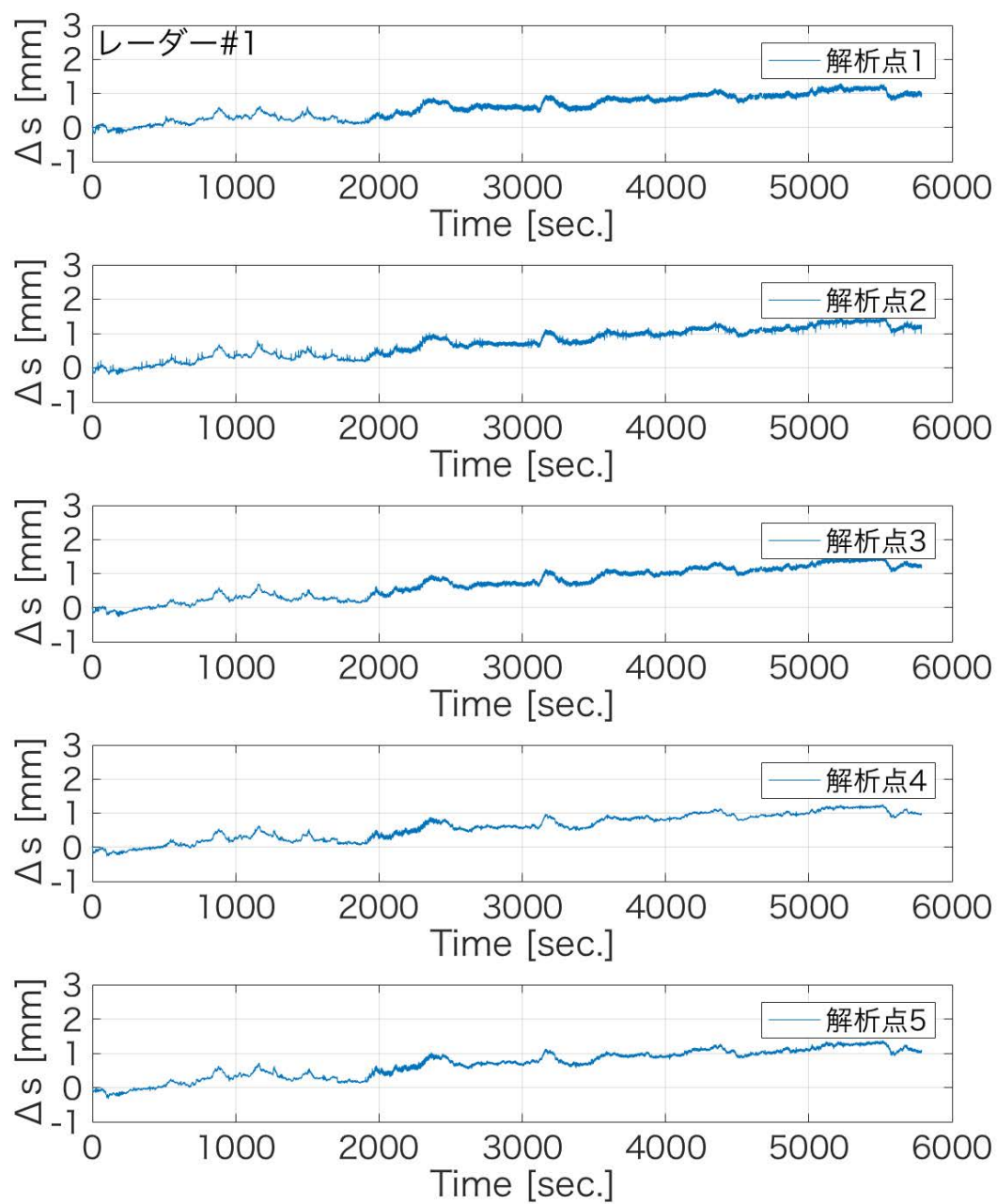


図 4.20 レーダー#1 で計測したスラントレンジ方向の変位  $\Delta s$  (19 階)



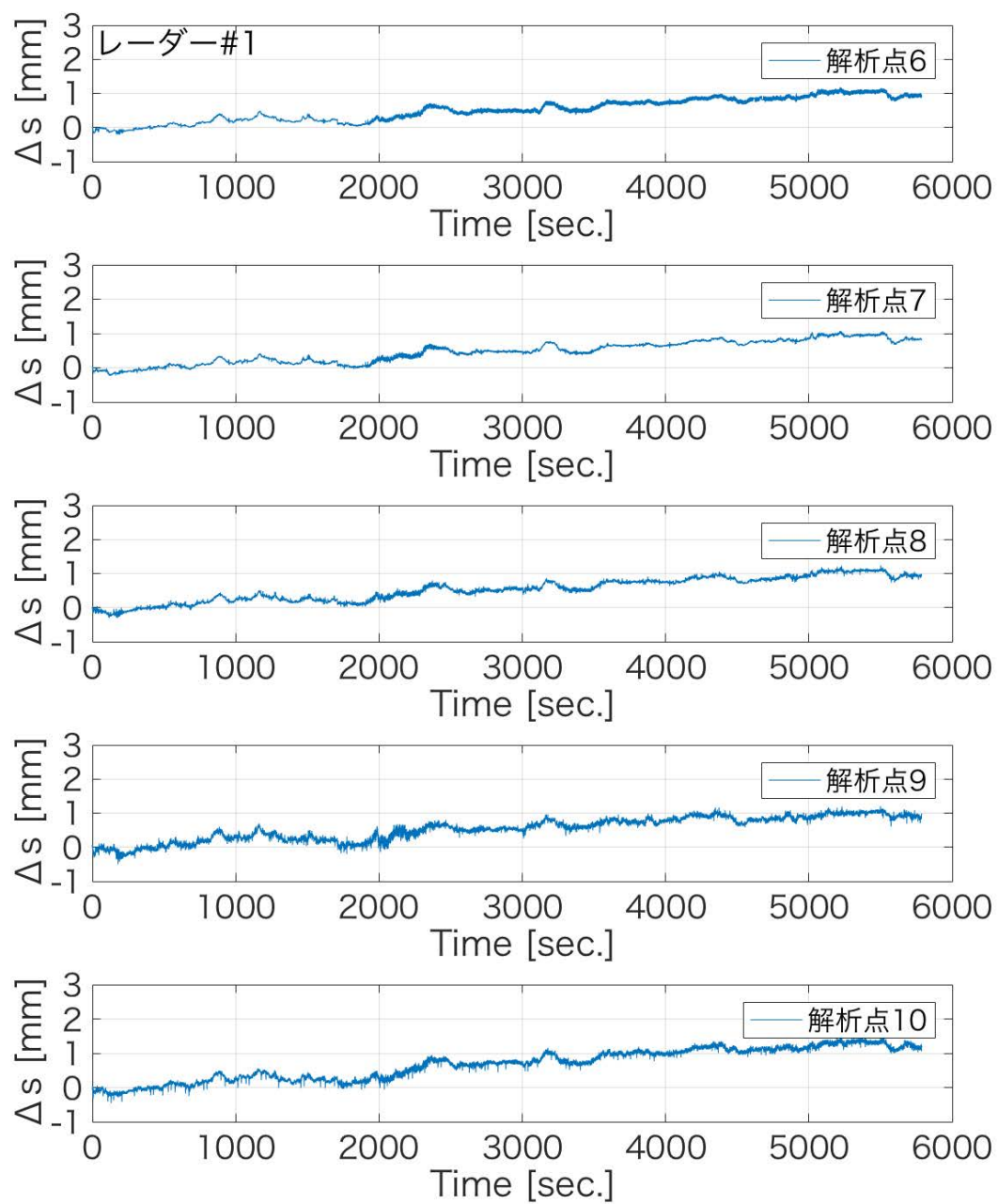


図 4.21 レーダー#1 で計測したスラントレンジ方向の変位  $\Delta s$  (13 階)

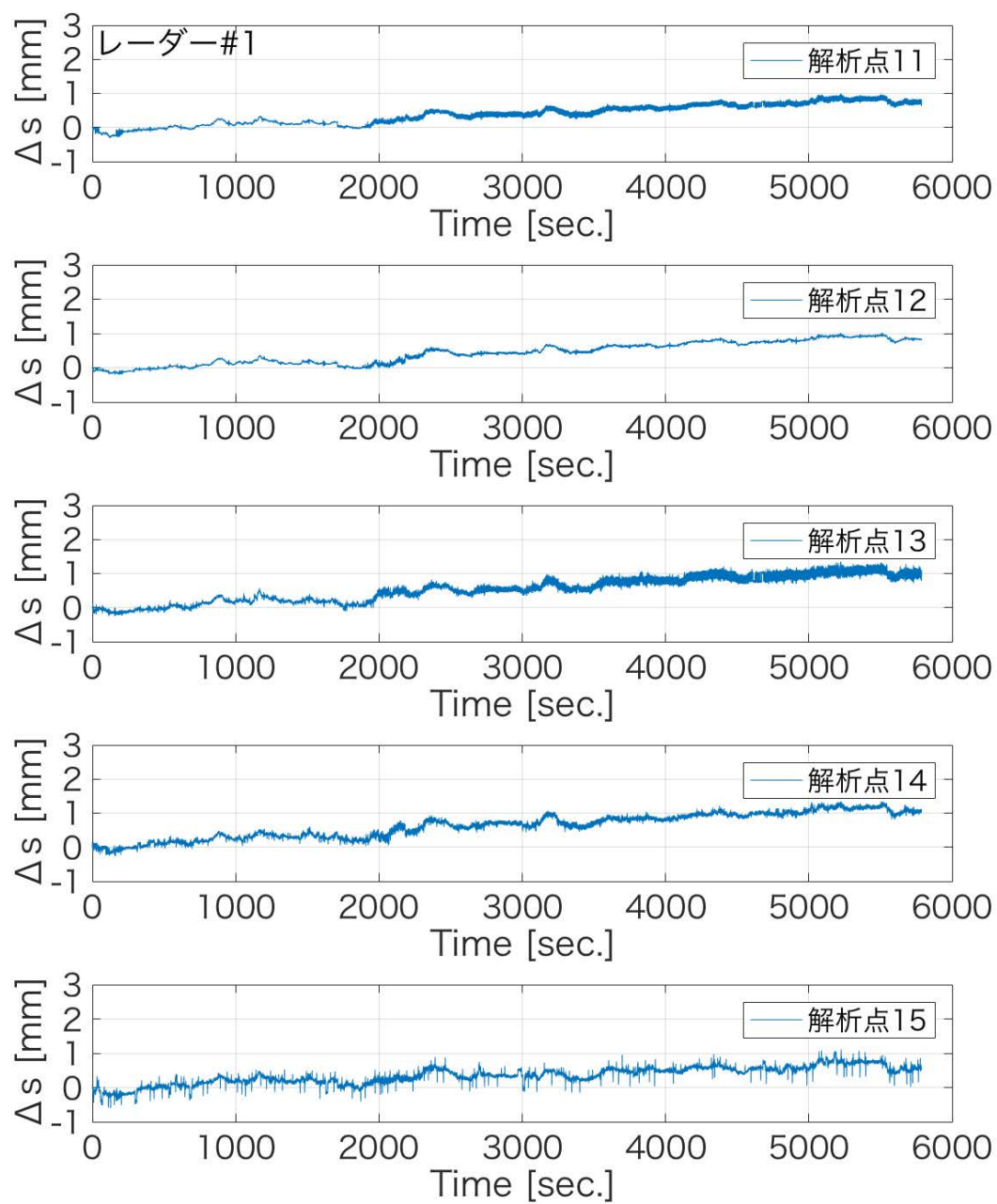


図 4.22 レーダー#1 で計測したスラントレンジ方向の変位  $\Delta s$  (8 階)

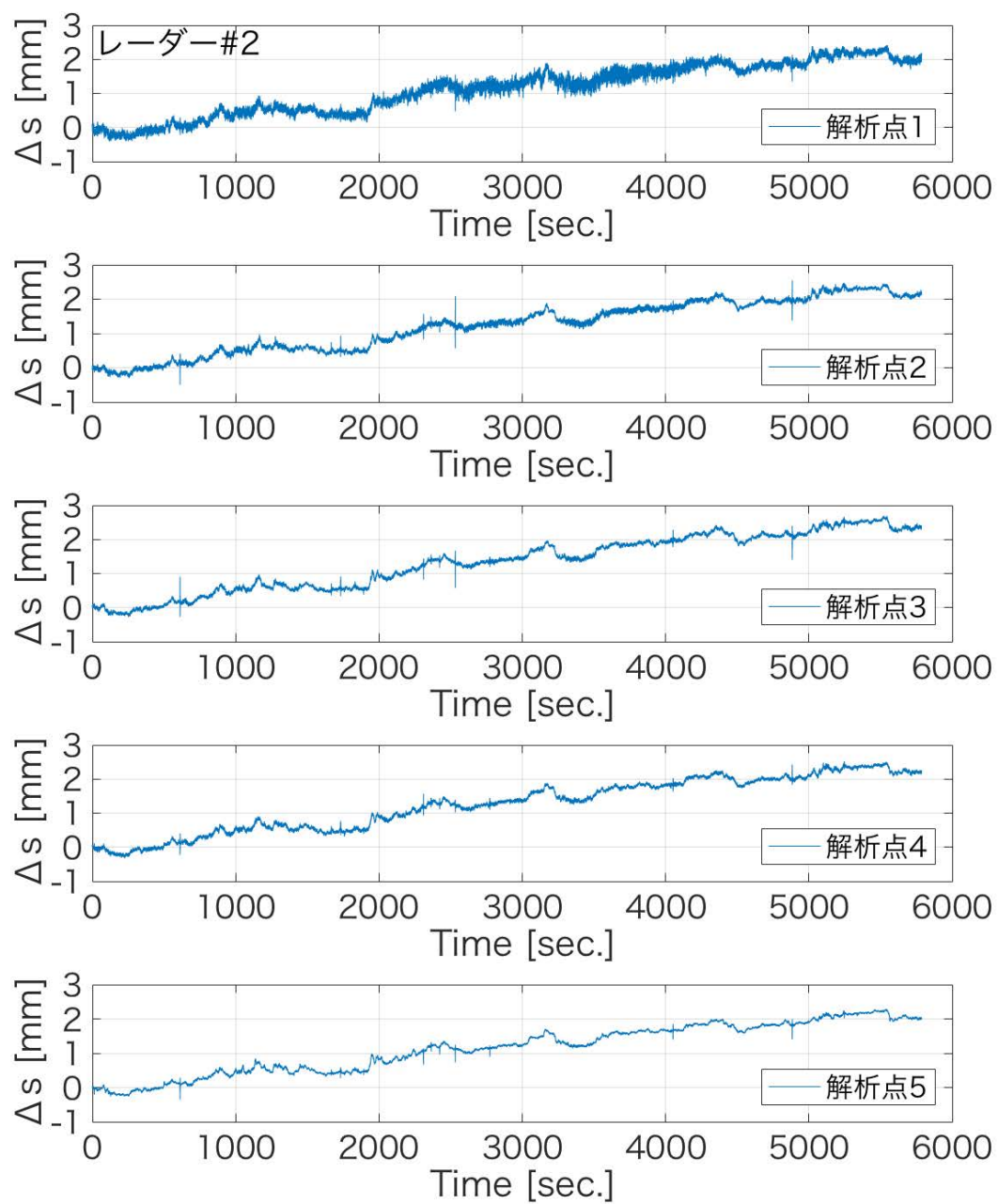


図 4.23 レーダー#2 で計測したスラントレンジ方向の変位  $\Delta s$  (19 階)

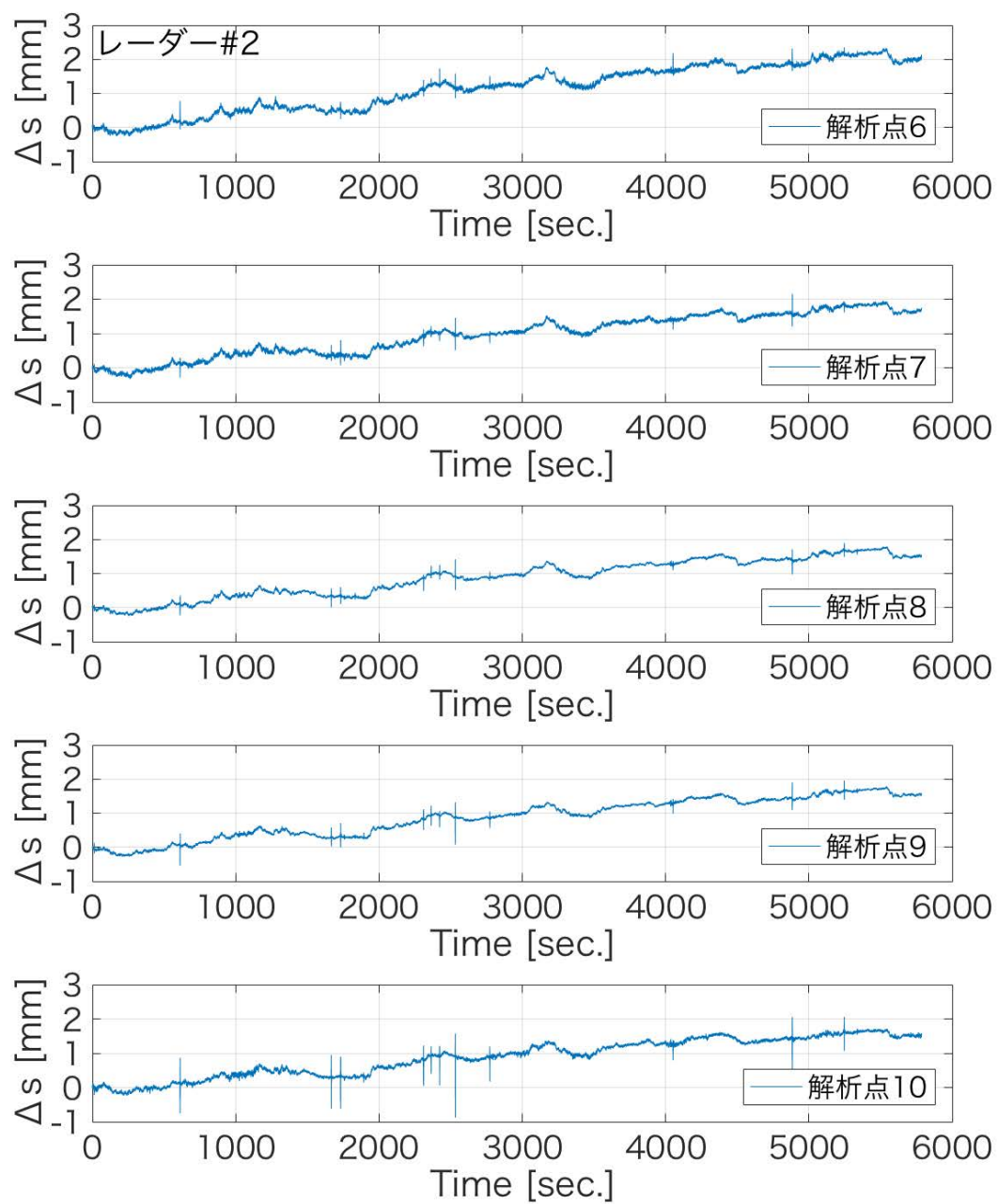


図 4.24 レーダー#2 で計測したスラントレンジ方向の変位  $\Delta s$  (13 階)

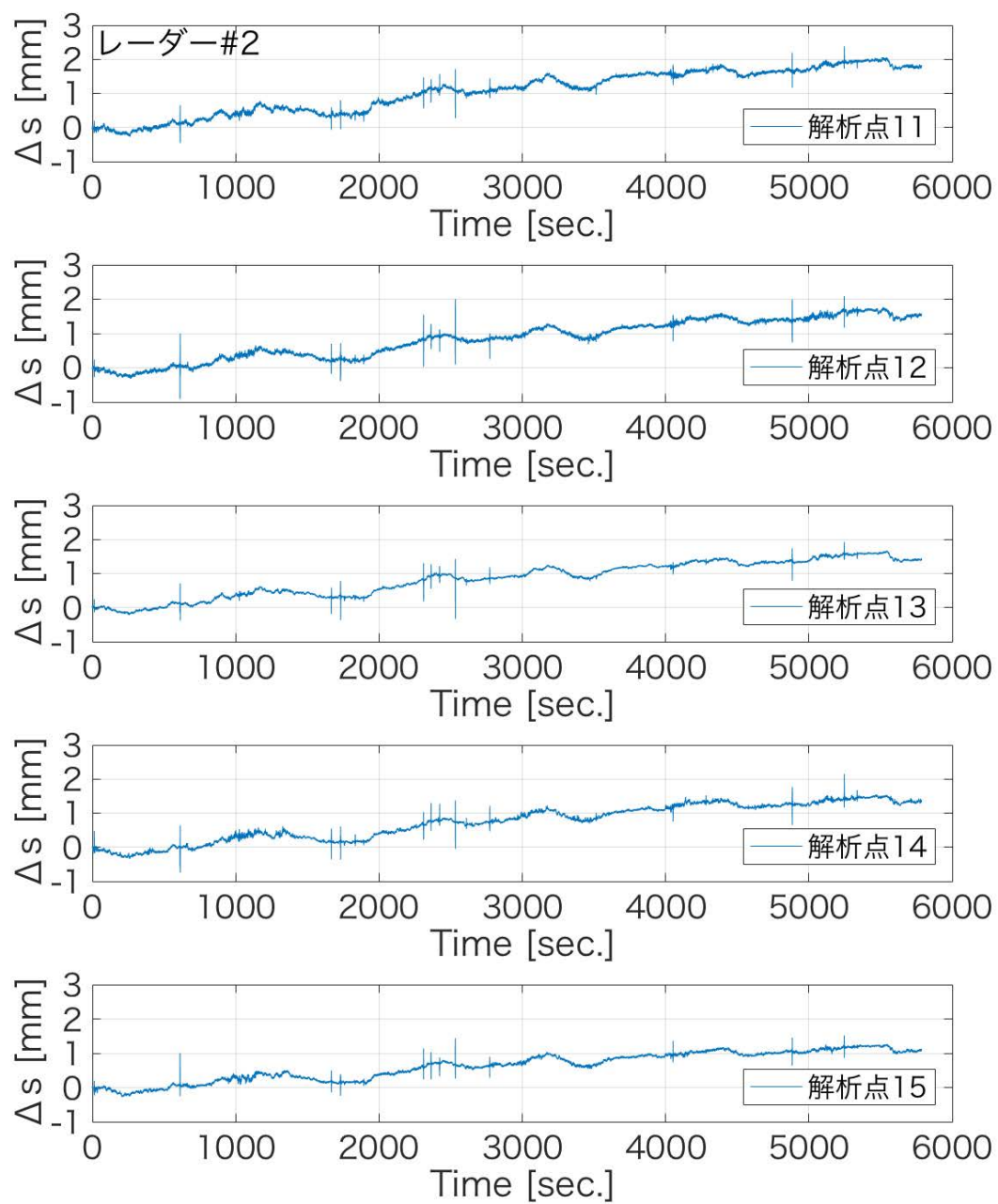


図 4.25 レーダー#2 で計測したスラントレンジ方向の変位  $\Delta s$  (8 階)

式 3.23 および表 4.6 の結果を用いて，図 4.20 から図 4.25 に示したスラントレンジ変位  $\Delta s$  を，対象建物直交方向の変位  $\Delta x$  および建物短辺方向の変位  $\Delta y$  に変換し，さらに長周期成分を除去する 0.05～10[Hz] のバンドパスフィルタ処理を行った．結果を図 4.26 に示す．

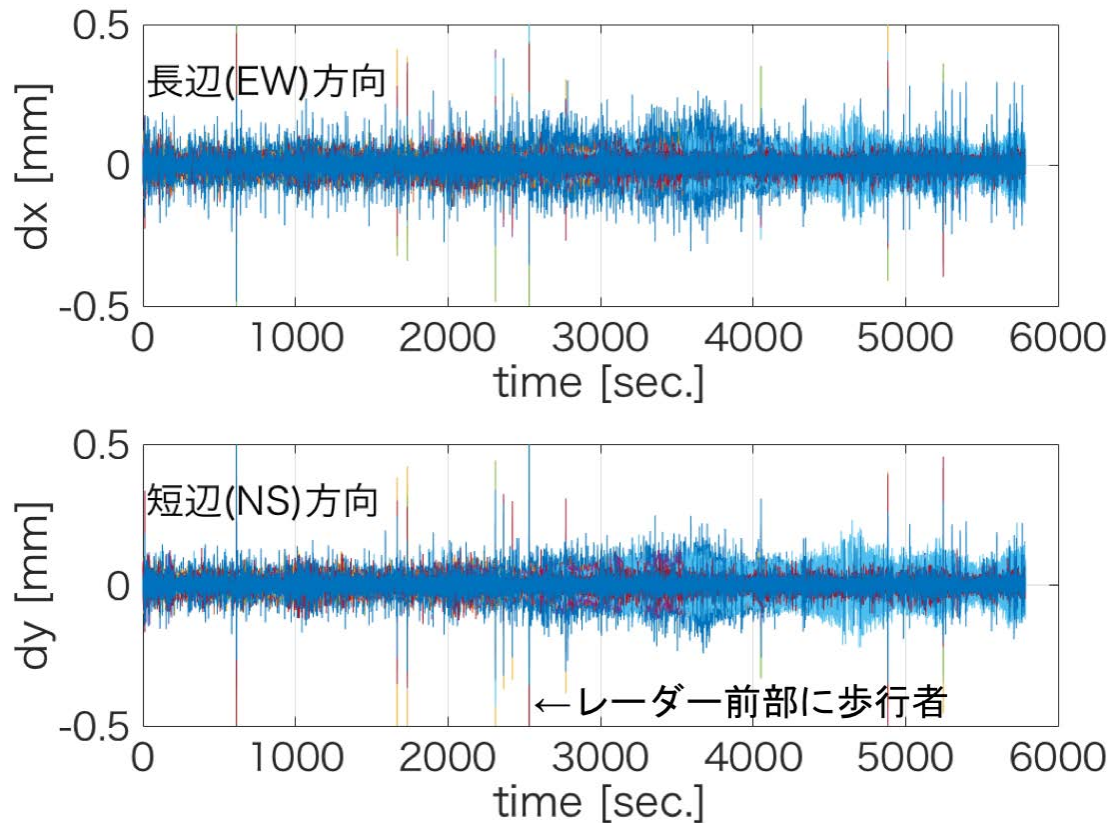


図 4.26 建物長辺方向および短辺方向の変位（スラントレンジ変位からの変換）

これらの建物短辺方向および長辺方向に変換した変位記録に対し，周波数解析を行った結果（フーリエ振幅スペクトル）を図 4.27，図 4.28 および図 4.29 に示す．いずれも建物並進方向およびねじれ方向の卓越周波数が確認できる．



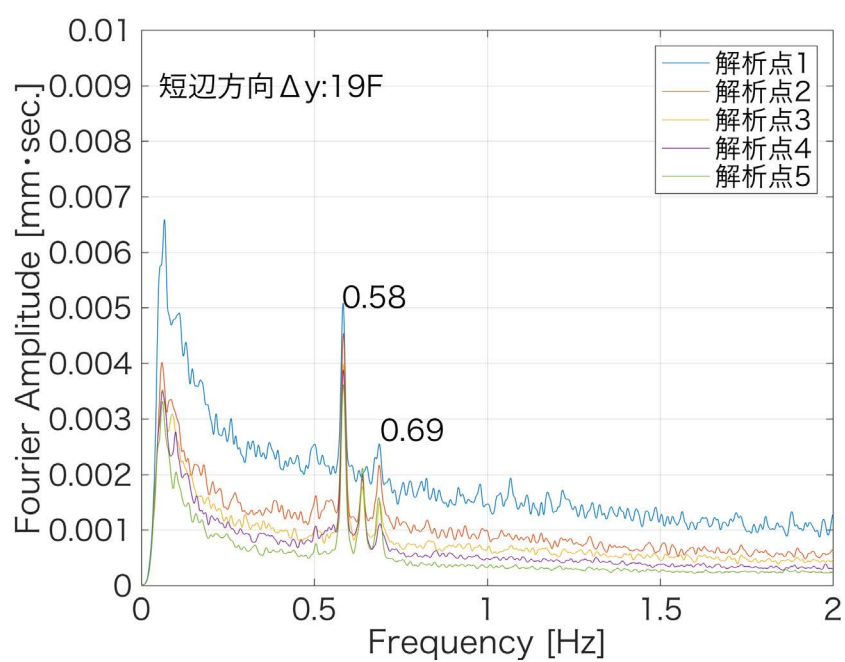
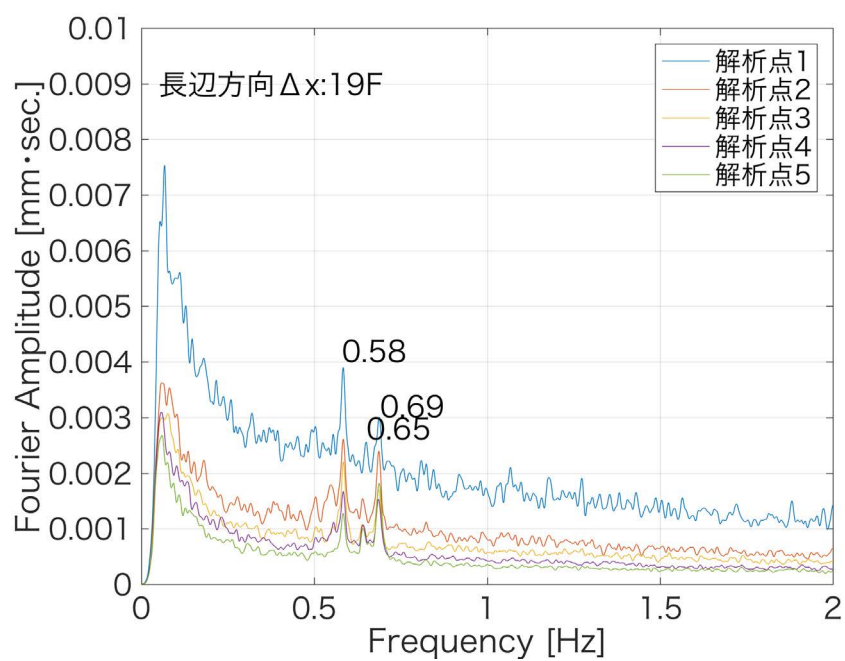


図 4.27 建物 19 階長辺 (x:東西) 方向および短辺 (y:南北) 方向の変位から求めたフーリエ振幅スペクトル

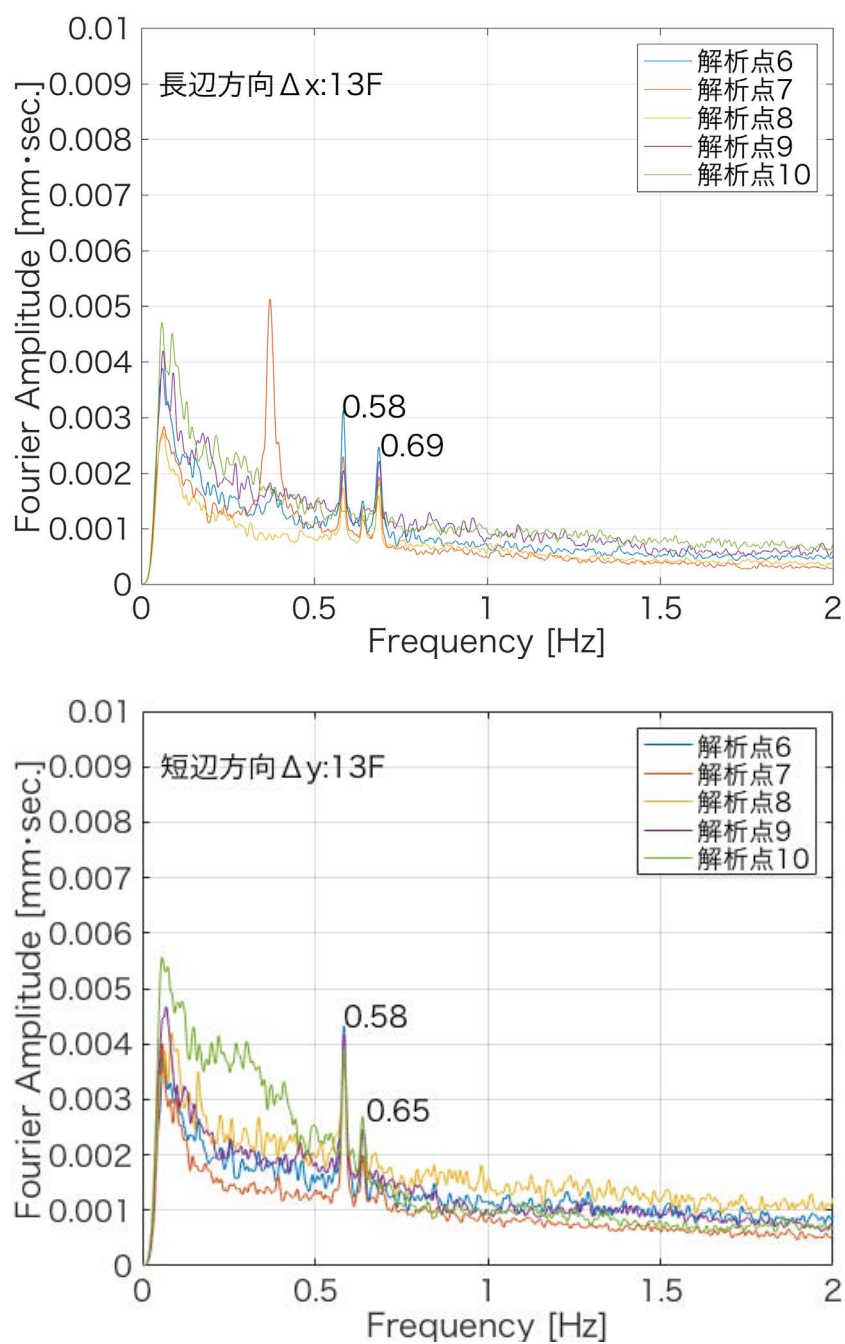


図 4.28 建物 13 階長辺 (x:東西) 方向および短辺 (y:南北) 方向の変位から求めたフーリエ振幅スペクトル



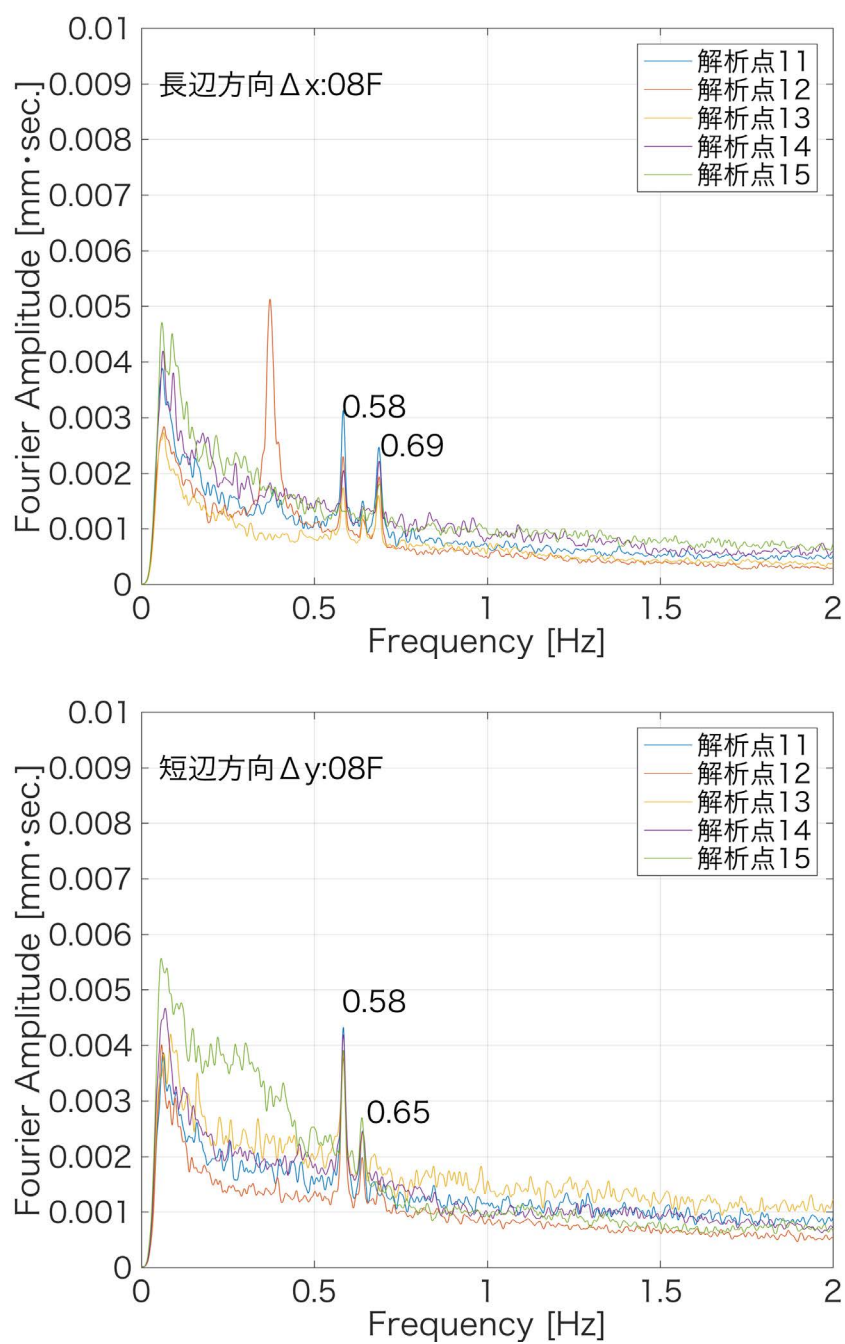
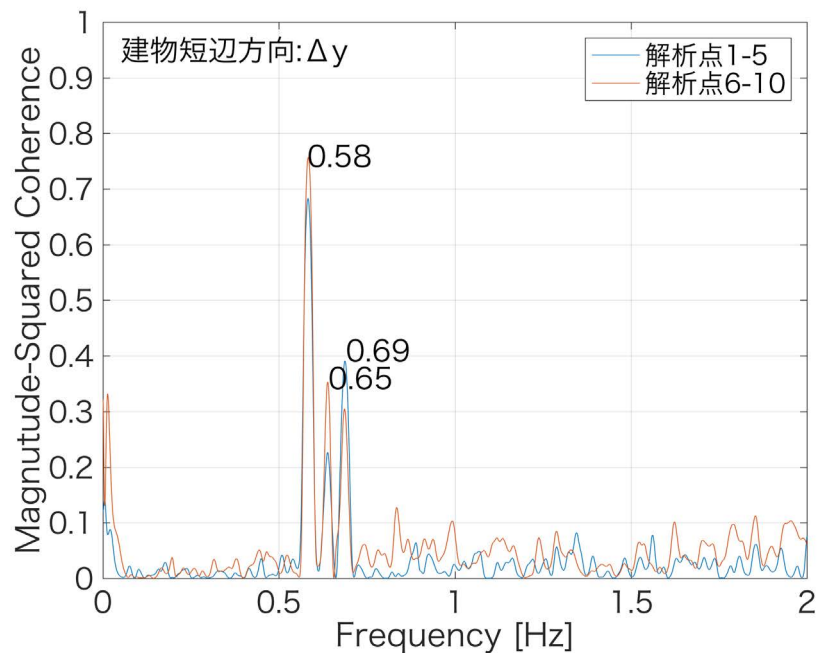


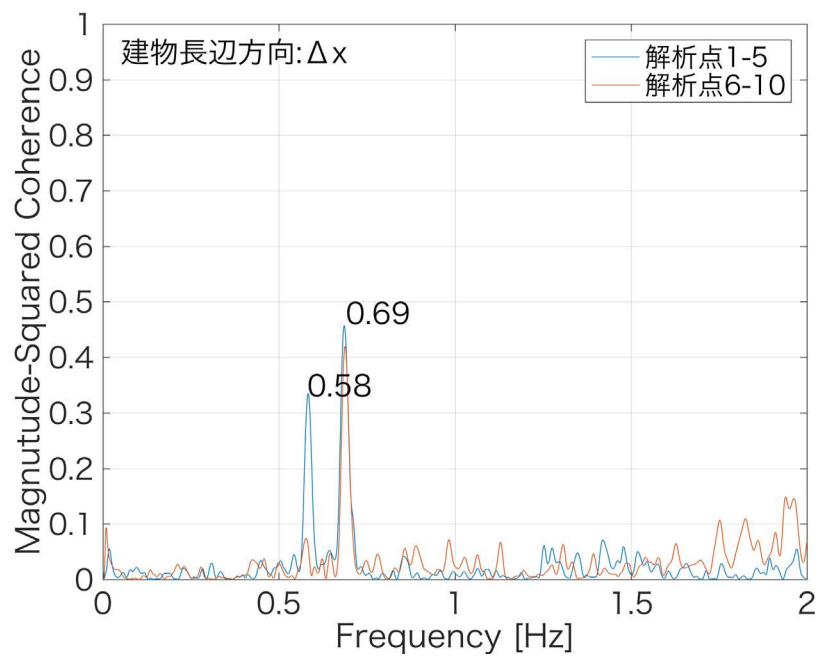
図 4.29 建物 8 階長辺 (x:東西) 方向および短辺 (y:南北) 方向の変位から求めたフーリエ振幅スペクトル

前節と同様に，建物高層部の解析点 1 と解析点 5，および建物中層部の解析点 6 と解析点 10 の相互に振幅二乗コヒーレンスを求めた結果を図 4.30 に示す．建物短辺方向の変位から求めた値からは既往の並進およびねじれ方向の一次固有周波数とほぼ等しい 0.58[Hz]，0.65[Hz]，0.69[Hz] の卓越周波数が見られるが，建物長辺方向の変位から求めた値では 0.58[Hz]，0.69[Hz] の卓越周波数のみ確認できる．

さらに建物東西端の短辺方向および長辺方向の変位の差を求め，さらにその差分に対し周波数解析を行った結果を図 4.31 に示す．前章と同様に建物短辺方向および長辺方向のいずれにおいても回転（ねじれ）とみられる 0.69[Hz] の卓越周波数が確認できる．

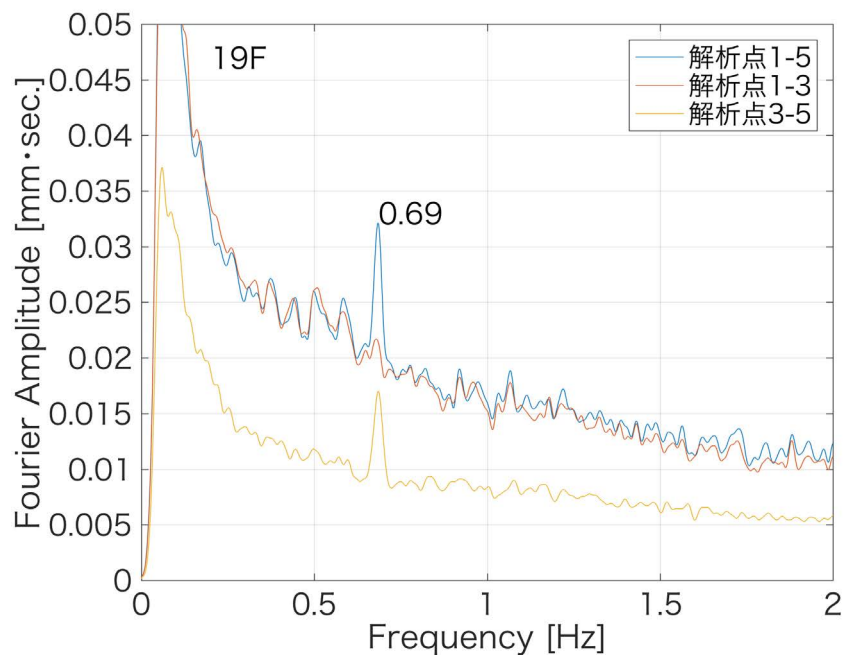


(a) 建物短辺方向 (y (南北) 方向)

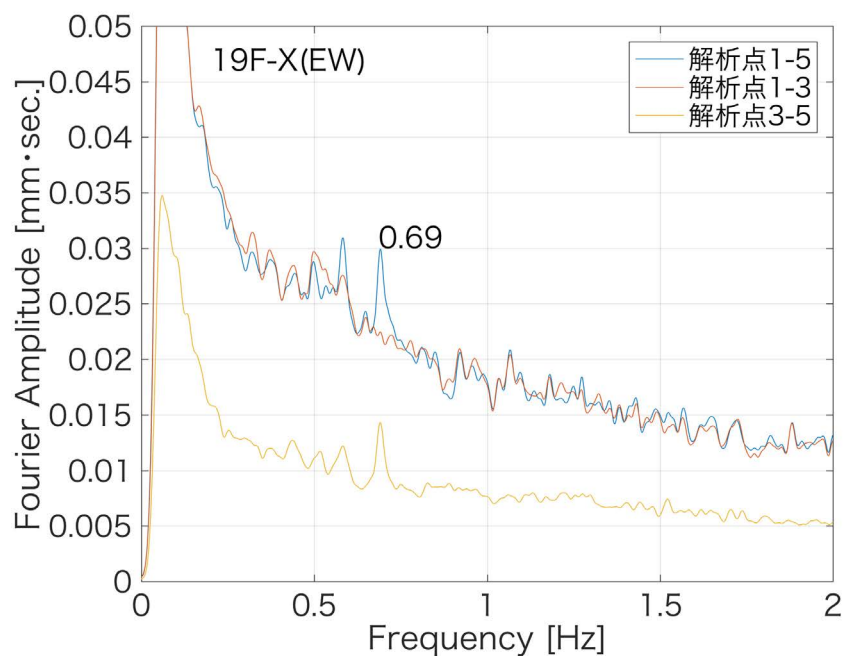


(b) 建物長辺方向 (x (東西) 方向)

図 4.30 建物東西端の変位記録と振幅二乗コヒーレンス



(a) 建物短辺方向 (y (南北) 方向)



(b) 建物長辺方向 (x (東西) 方向)

図 4.31 建物東西端の変位記録差分の周波数解析 (フーリエ振幅スペクトル)

また、建物中層部の解析点 6（13 階西端）の建物短辺方向（y 方向）の変位が最大および最小時の建物高層部および建物中層部の解析点の変位を抽出し、図 4.32 に示した。建物長辺方向、短辺方向の変位はいずれも一様で剛床に近い状態になっているが、必ずしも直線ではなく解析点ごとに細かな差がみられる。これは建物外壁仕上げの変形の影響も考えられる。

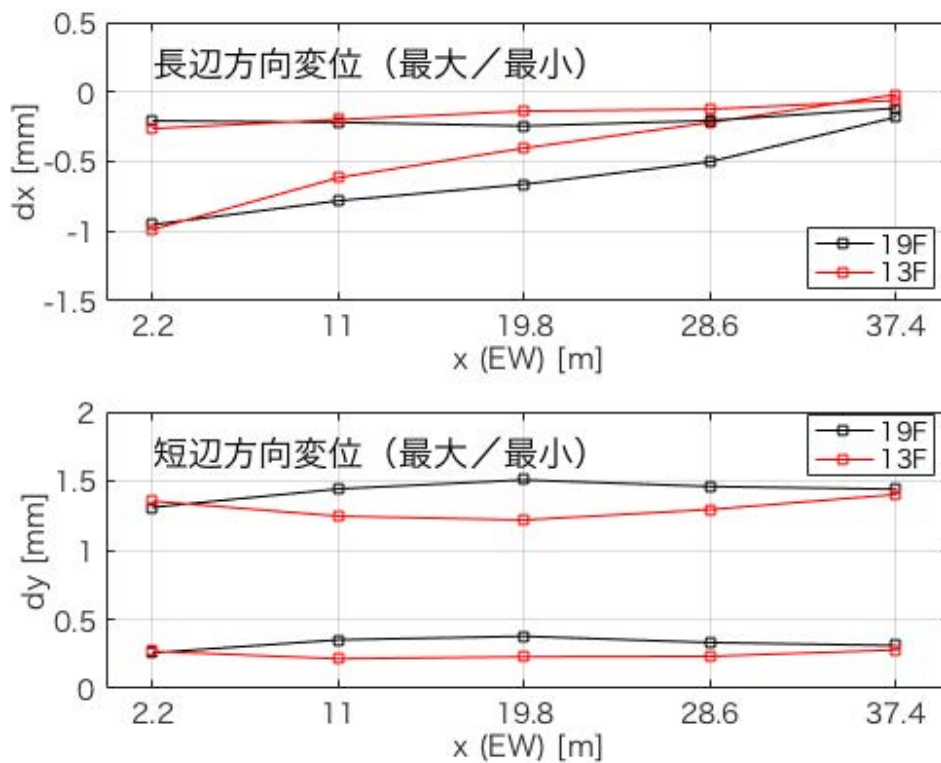


図 4.32 解析点 6 の変位最大最小時の建物長辺 (x) 方向と短辺 (y) 方向の変位

#### 4.3.6 散乱波強度と変位計測値に対する検討

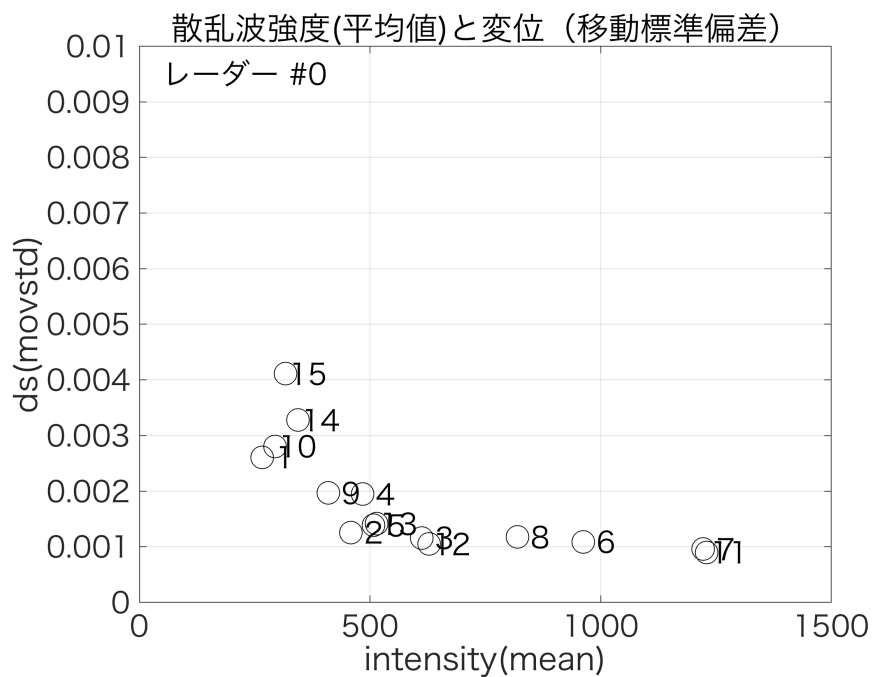
前節 4.2 で述べたレーダー 1 台を設置し計測を行った際に取得した計測データに含まれる散乱波の強度の平均値と、変位計測値のばらつき（移動標準偏差）の関係を図 4.33 に示す。建物低層部東側の解析点 13 から解析点 15 において、レーダー 1 台を設置し計測を行った際の計測値（変位）の振幅が他の解析点と比べ大きい傾向がみられたが、これらの解析点のいずれも散乱波の強度が他の解析点より低い傾向となっている。

なお、各々の解析点におけるレーダー送信波の入射角と散乱波強度の平均値を同じく図 4.33 b) に示すが、式 3.20 および図 3.19 で検討を行った入射角と散乱波強度には明らかな相関は見られない。

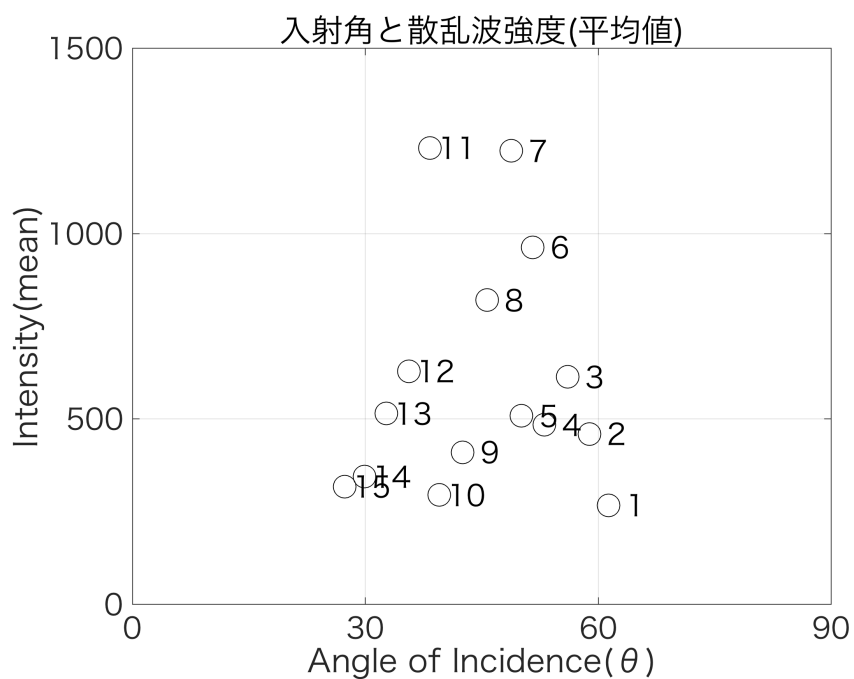
前節 4.3 で行った 2 台のレーダーを用いて同時に計測を行った際に得た計測データにおいても、図 4.34 から図 4.35 に示す通り、レーダー#1 においては上記と同様に建物低層部の解析点 13,14,15 の信号強度が低く、変位計測値のばらつきも大きい。これは、レーダー 1 台を用いた計測の場合と同様に、レーダーの電波が建物低層棟部に干渉して乱反射した結果、散乱波強度が低下し、変位計測値の誤差が増大した可能性がある。一方、レーダー#2 においては建物高層部の解析点 1 の計測値のばらつきが大きく、信号強度は他の解析点に比べ大幅に小さい。なお、入射角と散乱波強度（平均）の間の明確な相関は認められない。

散乱波強度の低下と計測精度の低下の関係は明らかではないが、上記のレーダー 1 台を設置した際の計測結果と、複数レーダーを設置した際の計測におけるレーダー#1 の計測結果で同様の傾向がみられ、レーダー#2 の計測結果では、散乱波強度の低下がみられる解析点では変位計測結果の変動幅が大きい傾向がある。

したがって、レーダーを用いて建物の面的振動計測を行う際には、計測範囲内に著しく散乱波の強度が低下している箇所がないか留意し、もし散乱波の低下が見られる場合は、レーダーの設置位置を変更するなどの対策を行うことにより、計測データを正常に取得することが可能となると考えられる。

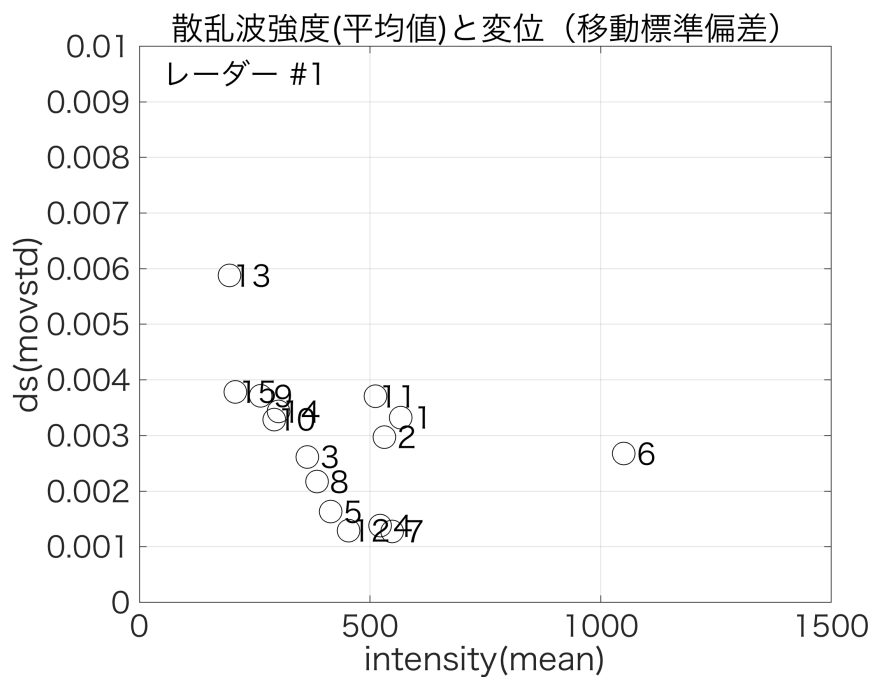


(a) 散乱波強度 (平均値) と計測値のばらつき (移動標準偏差)

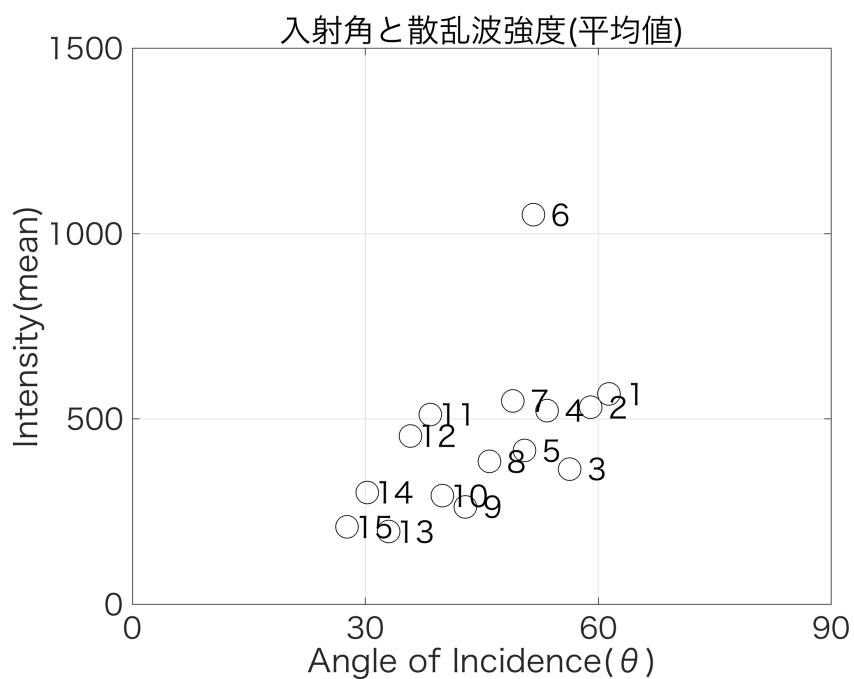


(b) レーダー電波の入射角と散乱波強度 (平均値)

図 4.33 レーダー 1 台を用いた計測時における散乱波強度



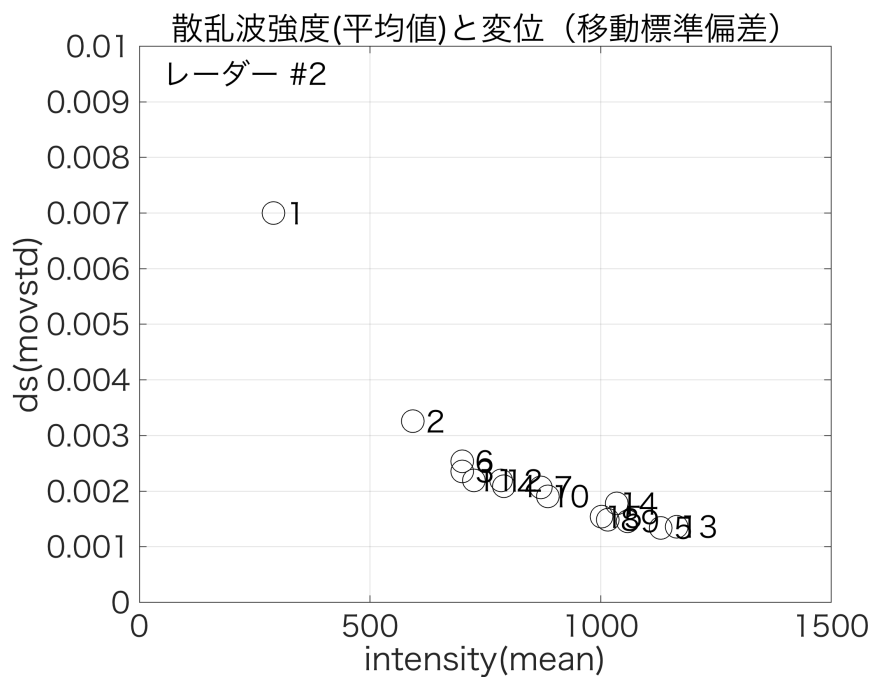
(a) 散乱波強度 (平均値) と計測値のばらつき (移動標準偏差)



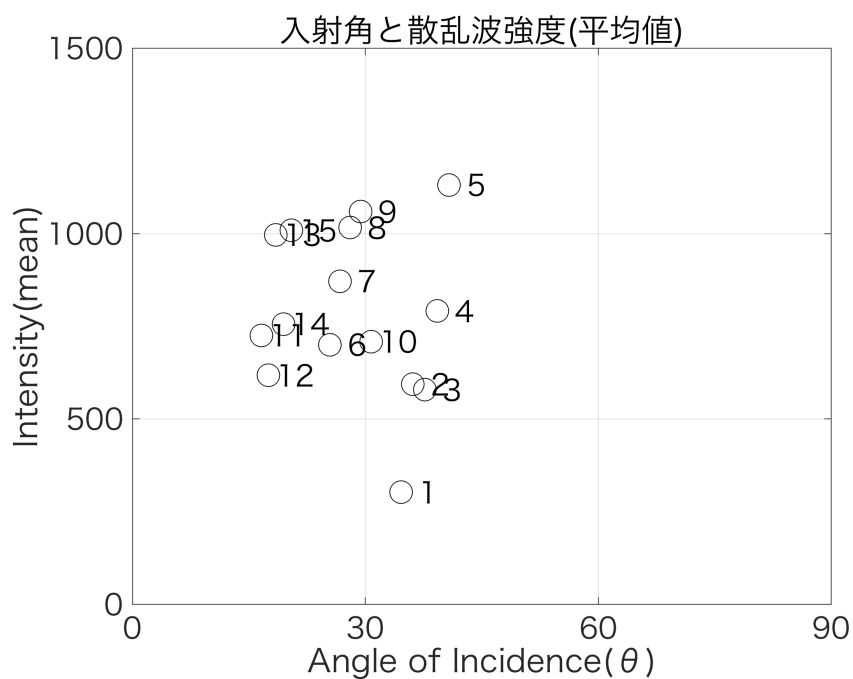
(b) レーダー電波の入射角と散乱波強度 (平均値)

図 4.34 レーダー#1 の散乱波強度





(a) 散乱波強度 (平均値) と計測値のばらつき (移動標準偏差)



(b) レーダー電波の入射角と散乱波強度 (平均値)

図 4.35 レーダー#2 の散乱波強度

## 4.4 まとめ

第4章では、レーダーを用いた面的振動計測における信号処理法およびデータの分析・解析法を実証するために、実際に高層建物の外部から面的振動計測を行ない、一連の信号処理および分析を行った。

- 建物の外部からレーダーを用いた面的振動計測を行い、建物壁面ほぼ全域のデータを一括取得することができた。これらの面的計測データから解析点を抽出して周波数解析を行った結果、既往の計測とほぼ同等の結果が得られた。
  - － ほぼ全ての解析点において、既往の計測成果と同等の  $0.58\sim0.60[\text{Hz}]$  および約  $0.65[\text{Hz}]$  の並進卓越振動を捉えた。
  - － 建物東端と西端の解析点の変位記録の差を求め、さらにこの差に周波数解析を行ったところ、約  $0.69[\text{Hz}]$  の卓越振動を捉えた。これはねじれ方向の固有振動と考えられる。
- 複数のレーダーを用いて同時に建物外部から計測を行い、双方のレーダーを同期させた面的振動計測を実現した。
  - － 双方のレーダーの変位計測値を、各々のレーダー電波の入射角および方位角を用いて建物短辺方向および長辺方向の成分に換算し、周波数解析を行ったところ、概ね全ての解析点において、建物短辺方向および建物長辺方向およびねじれ方向の固有振動数に相当する卓越振動を各々のフーリエ振幅スペクトルから抽出することができた。

一連の計測を通じて、建物低層部の解析点など一部に計測値の誤差が大きい結果が認められた。これらの解析点はいずれも散乱波強度が他の解析点と比べ大きく低下していた。散乱波の強度の低下と計測精度に関連は現時点で不明であるが、面的な変位分布計測を行う際には、これらの解析点を除外し別の解析点を用いるなどの対応を行うことにより、対象建物の面的な振動性状を取得できると思われる。

以上より、本論文で提案したレーダーを用いた面的振動計測法は、建築構造物の振動性状を捉えるために有効な手法であると考えられる。



## 第 5 章

## 結論

---



## 5.1 本論文の結論

以下に本研究で得られた知見を，章ごとにまとめる．

第1章ではまず，本研究の背景として建築土木構造物の計測におけるセンサの多点化・高密度化を動きを述べ，構造物の様々な挙動に対する計測や評価に関する既往の研究と課題を整理した．さらに本研究で示す空間連続計測の特徴と意義を本研究の主題で記した挙動評価に関する考えとともに述べた．

さらに本研究の目的と範囲を示し，本研究の内容を述べる研究論文の構成を示した．

第2章では，線状のセンサを計測対象に配することにより，ひずみと温度の一括計測を行うことが可能な光ファイバ分布計測技術の概要を示し，建築・土木構造物に対して適用する際の課題を併せて整理した．

通信用途に開発が進められてきた光ファイバを構造物内，特にコンクリート構造物に埋設して計測を行う際には，光ファイバをセンサ素子として用いるための保護被覆を施す必要があると考え，その製作と，基本特性試験結果を示し，さらに設置後のセンサ寿命推定法について述べた．

さらに上記の光ファイバセンサを，実際のPC斜張橋の主桁張り出し工事開始直後から敷設を開始して施工時計測を行うことで，センサおよび計測機器の施工性や，運用性，および耐久性など，構造物に対する適用性を検証した．また，橋の完成後，供用中も引き続き，維持管理のための計測を長期にわたり行った結果，計測データに表れる計測値の変化が，構造物の挙動に因るものか，あるいはセンサあるいは計測機器の異常に起因するものかを判断するためには，後方散乱光の強度の変化が重要な指標となることを指摘した．

第3章では，電波を用いた計測法であるレーダー技術と，現在開発が進められつつある，電波を用いて面的な一括計測を可能とするイメージングレーダー技術の概要を述べ，あわせて構造物に対する面的計測に向けたイメージングレーダーの適用性と課題を整理した．特にレーダーの観測視野である投影座標系と，構造物の座標（直交座標）との違いを述べ，その相互の座標変換が必要となることを示した．

あわせてイメージングレーダーの実用成果の一つである人工衛星搭載型合成開口レーダーの観測データを用いた構造物の変状把握を行いその課題を述べた．

次にレーダーを用いて構造物の面的振動計測を行う際、レーダーの観測視野である投影座標系と、構造物の座標（直交座標）との変換法として、構造物表面の複数の計測点の直交座標と、その各々の計測点に対するレーダーからの投影座標との間の対応関係の統計処理が有効であることを提示した。

加えて、構造物の挙動をより精緻に捉えるために、複数のレーダーを同時に用いた計測が有用であることを、複数のレーダーから得た計測値を用いる変換式から示した。

第4章では、第3章の検討を踏まえて、実際の高層建物に対して、高速に計測を行うことができる高速イメージングレーダーを用いて面的振動計測を行い、その計測データの分析評価を通じて、同計測の適用性の検証を行った。

その結果、計測対象建物の長辺方向、短辺方向およびねじれ方向の1次固有振動数の推定を、レーダー1台を設置して計測を行った計測値の分析から把握することができ、既往の研究との概ねの一致を認めることができた。

また、計測対象建物の水平方向の振動を精緻に捉えるために、2台のレーダーを用いた同時計測を行い、双方の計測データに対して座標変換等の分析を行った結果、一部の計測データにばらつきがある解析点を除く概ね全ての解析点の計測データから卓越振動を抽出することができ、さらに建物長辺方向および短辺方向の卓越振動が識別できた。

以上、本研究では、簡便かつ効率的に建築・土木構造物の全体的な挙動の評価を行う手法として、光波を用いた光ファイバによる線的連続計測法、および電波を用いたレーダー技術による面的連続計測法、すなわち電磁波を用いた一連の空間連続計測法を提案し、その有効性を実証した。同時に、これらの計測を通じて得られる散乱波の強度と位相の双方に着目した計測データの分析・評価法も提示した。

本研究の成果は、今後の構造モニタリングの新たな手法として活用できると考えられる。

## 5.2 本研究の展開と今後の展望

本研究を通じて得られた成果は、今後以下のような展開が可能と思われる。

まず、光波を用いた線的計測，すなわち光ファイバ分布計測は，計測対象構造物ごとにセンサの設置計画，すなわち光ファイバセンサの配線計画の設計や計測機器の運用方法についての個別検討をしつつ，センサを設置した後においても長期にわたり連続計測を行うことで，その計測値の精度評価と計測装置の自己診断を含めた運用が可能になると思われる。

また，光ファイバの長期耐久性が本研究の検討により概ね明らかになり，さらに光ファイバが材料的に安定したガラス製であり材料劣化などに起因する長期変動がほぼ皆無である特性を利用すると，ひとたび構造物にセンサを敷設した後には，随時計測装置を取り外すことが可能となるため，一式の計測装置で複数の構造物に対して逐次計測を行う点検検査装置としての運用も可能になると思われる。

つぎに電波を用いた面的振動計測，すなわち高速イメージングレーダーによる計測は，本研究で検証を行った高層建物の面的振動計測といった適用の他に，ドームなどの大空間構造物の振動特性の把握や，高層建物の面的振動計測を逐次行うことにより，地震被災前後の計測値の変化から構造特性の変化を見いだす適用も考えられる。

また，本研究では単一の高層建物を対象に計測を行ったが，レーダー視野内に含まれる複数の構造物の振動特性を一括して把握する適用もあり得る。

加えて，従来から振動特性の把握がセンサを用いた計測においても困難な複雑な形状の高層建物においても，本手法が有用である可能性がある。

さらに，レーダーを用いる面的振動計測は，建物内部にアクセスすることなく外部から比較的簡便に計測を行い，そのデータを用いて対象建物の振動評価を行うことが可能となるため，地震被災後の迅速な建物診断においても本手法が今後活用できる可能性がある。



なお本研究で行った一連の計測では，ほぼ無風状態の計測であり変位振幅も小さかったことから，今後同様の計測を繰り返し実施し記録を分析することにより，構造物の固有値解析を含んだ挙動評価をより精緻に行うことができる可能性がある．

レーダーを用いる計測は今後，計測装置の性能向上が進み計測精度が向上すると見込めるが，さらに計測装置と計測対象の間の様々な外乱，たとえば荒天時などへの対応が今後課題となる．

光波，電波を用いた線的，面的いずれの計測においても計測データは莫大な量であり，これらのデータから構造物の挙動評価や変状の抽出を行うためには，現代の情報通信技術（ICT 技術）あるいは機械学習，AI などといった人工知能技術を活用することで構造物の挙動評価を行う効率的なシステムが構築できると考えられる．

以上を今後の研究に向けた展望としたい．

## 謝辞

本研究論文は、著者が千葉工業大学工学専攻工学研究科および清水建設株式会社にて行った電磁波を用いた空間連続的計測に基づく構造物の挙動評価に関する研究をまとめたものです。

研究論文をまとめるにあたり、千葉工業大学工学部建築都市環境学科教授 田村和夫博士においては、大学院博士後期課程在学中のみならず、二十年以上の長きにわたり折々いただいていたご助言や激励、さらに著者の雑駁な報告などにも常に真摯に応じていただきました。これら終始にわたる懇切なご指導無くしては本研究のまとめには至りませんでした。心よりお礼を申し上げます。

また、千葉工業大学 山田丈富博士、中野克彦博士、鈴木誠博士、内海秀幸博士におかれましては、研究論文のまとめにあたり適切なご指摘、ご意見をいただきました。ありがとうございました。

清水建設株式会社技術研究所 野澤剛二郎博士、田中博一博士には、本研究論文のまとめまで継続したご理解、ご支援をいただきました。また、同僚各位のご理解に対しても、深く感謝を申し上げます。

著者が清水建設株式会社に入社した後ほどなく、当時まだ黎明期であった光ファイバをセンサ素子として用いる計測の可能性を示唆していただき、共に建築構造物への適用に至るまで親身にご指導いただいた慶應義塾大学 三田彰博士、元東京大学 保立和夫博士、東京大学 武田展雄博士、元清水建設株式会社 柴慶治博士、日本女子大学 石川隆重博士には、改めて本研究の端緒となる重要なきっかけを示していただきましたことに謝意を示します。また、研究論文で示した光ファイバ分布計測に着目し、実際の橋りょうに対する建設中の計測から完成後の長期モニタリングに至るまで終始ご支援をいただき、さらには橋りょう建設現場への長期出張をご許可いただいた清水建設株式会社 若原敏裕博士、熊谷仁志博士、稲田裕博士には、時折の深夜に至る討論も含め感謝申し上げます。また、橋りょう完成後の供用期間中の計測に深いご理解とご支援をいただいたベトナム交通運輸大学 Nguyen Viet Trung 博士、Nguyen Thi Tuyet Trinh 博士に対しても心より謝意を表します。

電波を用いた面的計測の可能性を有する装置として、高速イメージングレーダーを紹介していただいた東京都中小企業振興公社 松村尊氏には、長きにわたり様々なヒントをいただき、著者の知見を深めるきっかけを折々与えてくださいました。また、レーダーの特徴や衛星 SAR の解析手法や課題など、レーダー計測の初歩からご教示いただいた（一財）リモート・センシング技術センター 古田竜一博士のご指導無くしては、著者がレーダー技術を建築構造物に適用し、研究論文としてまとめるには至りませんでした。また、実際の建築構造物に対するレーダー計測では、複数の計測装置の使用と計測、さらに計測後のデータ解析において多大なご協力とご教示をいただいたアルウェットテクノロジー株式会社 能美仁氏、白井郁夫氏、能美陽氏に改めてお礼を申し上げます。また、衛星 SAR およびレーダー技術の今後の可能性について、株式会社大崎総合研究所 佐藤俊明博士より、度あるごとに真摯なコメント、ご助言をいただきました。ありがとうございました。

今後は本研究論文でまとめた知見を活かし、構造物のセンシング、挙動評価、モニタリングに向けた研究開発をさらに進めていきたいと考えております。

最後に、著者を常に応援し続けてくれた妻、岩城はるひ博士に心から感謝します。

平成 30 年 3 月

岩城 英朗

# 本研究を構成する論文

1. 岩城 英朗, 田村 和夫: 長大 PC 斜張橋の長期モニタリングに向けた分布型光ファイバセンサの適用に関する研究, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.585-594, 2016. (第 2 章に関連)
2. 岩城 英朗, 鳴海 智宏, 横島 喬: C-band 衛星 SAR による平成 28 年熊本地震における変状解析と構造物監視に向けた検討, 土木学会論文集 A1, Vol.73, No.4, pp.I-1018-I-1023, 2017. (第 3 章に関連)
3. 岩城 英朗, 田村 和夫, 能美 仁: 高層建築物の空間連続的振動特性評価へのレーダー技術適用に関する考察, 構造工学論文集, Vol. 64B. (第 3 章, 第 4 章に関連) (投稿中)



# 関連論文

## (第2章)

### (論文)

1. 岩城 英朗, 柴 慶治, 武田 展雄: FBG 型光ファイバセンサを用いた構造ヘルスモニタリングシステム, 応用力学論文集 Vol. 6, 2003.
2. 岩城 英朗, 岡田 敬一, 白石 理人, 柴 慶治, 三田 彰, 武田 展雄: 制震・免震建築構造物へのヘルスモニタリングシステムの適用, 構造物の安全性と信頼性 Vol. 5, 2003.
3. オン スンレーン ショーン, 熊谷 仁志, 岩城 英朗, 保立 和夫: 相関制御を用いた光ファイバブリルアン歪分布センサによるコンクリートのひび割れ検出, 信学技報 OPE2001-151, 2003.

### (雑誌等)

1. 岩城 英朗: 建築・土木分野におけるファイバブラッググレーティング (FBG) センサの応用, レーザー研究 Vol. 33 No. 9, 2005.
2. 熊谷 仁志, 岩城 英朗, S. L. Ong, 保立 和夫: 高分解能分布型光ファイバセンサによるひびわれ検知, コンクリート工学 Vol. 41, No. 7, 2003.
3. 岩城 英朗, 稲田 裕, 若原 敏裕: 長大橋モニタリングシステムの開発と適用例, プ

レストレストコンクリート Vol. 50 No. 2, 2008.

4. 岩城 英朗: 光ファイバセンサを用いた建設構造物のモニタリング, 応用物理 Vol. 80 No. 3, 2011.
5. 岩城 英朗: 建設分野における光ファイバセンサの適用, 計測と制御 Vol. 51 No. 3, 2012.
6. 岩城 英朗: 構造物を見守る光ファイバーセンサー, OplusE, Vol.35, No.5, 2013.

## (国内会議等)

### (招待講演)

1. 岩城 英朗: 環境建築とヘルスモニタリング, 第 21 回環境振動シンポジウム, 2003.
2. 岩城 英朗: 建設分野に於ける光ファイバセンシングの現状と未来, 第 32 回光波センシング技術研究会, 2003.
3. 岩城 英朗: 構造ヘルスモニタリングシステムを支える光ファイバセンサ技術, 第 47 回自動制御連合講演会, 2004.
4. 岩城 英朗: 長大橋構造ヘルスモニタリングシステムの開発, 計測自動制御学会中部支部光波応用技術研究会, 2009.
5. 岩城 英朗: 社会基盤への光センシングの適用例, フォトニックセンシング最前線, 2013.

(一般講演)

1. 岩城 英朗, 山川 裕司, 三田 彰: ブラッグ格子型光ファイバセンサの知的構造物への適用検討, 日本建築学会大会, 1999.
2. 岩城 英朗, 山川 裕司, 三田 彰: 光ファイバセンサを用いた建築構造用ヘルスマニタリングシステム, 第 1 回知的材料・構造システムシンポジウム, 1999.
3. 岩城 英朗, 山川 裕司, 三田 彰: FBG 変位センサの履歴型制振架構への適用検討, 日本建築学会大会, 2000.
4. 岩城 英朗, 山川 裕司, 柴 慶治: FBG センサを用いた建築構造用ヘルスマニタリングシステム, 第 2 回知的材料・構造システムシンポジウム, 2000.
5. 岩城 英朗, 山川 裕司, 柴 慶治: スマート建築構造物に対する FBG センサを用いたヘルスマニタリングシステム, 第 50 回理論応用力学講演会, 2001.
6. 岩城 英朗, 柴 慶治, 武田 展雄: スマート建築構造物に対する FBG センサを用いた構造ヘルスマニタリングシステム, 第 51 回理論応用力学講演会, 2002.
7. 岩城 英朗, 柴 慶治: 社会基盤構造物への構造ヘルスマニタリングシステム, 第 3 回知的材料・構造システムシンポジウム, 2002.
8. 岩城 英朗, 岡田 敬一, 柴 慶治: FBG 型光ファイバセンサを用いた建築構造ヘルスマニタリングシステム, 日本建築学会大会, 2002.
9. 岩城 英朗, 柴 慶治, 武田 展雄: 制振建物に対する FBG 型光ファイバセンサを用いた構造ヘルスマニタリングシステム, パッシブ制振構造シンポジウム 2002, 2002.
10. 岡田 敬一, 白石 理人, 岩城 英朗, 柴 慶治: 構造モニタリングシステムを導入した免震建物の振動特性評価, 日本建築学会大会, 2003.



11. 岩城 英朗, 武田 展雄: FBG 型光ファイバセンサを用いた局所変形の検出手法の検討, 土木学会第 58 回年次学術講演会, 2003.
12. 川崎 信幸, 八木 賢二, 森田 和章, 香月 史朗, 岩城 英朗, 柴 慶治: メタライズドファイバブラッググレーティングを用いたセンサの開発, 電子情報通信学会総合大会, 2004.
13. 岩城 英朗: FBG センサによる建築構造ヘルスマモニタリング, 第 47 回光波センシング技術研究会, 2011.
14. 福喜多 輝, 三田 彰, 岩城 英朗, 山川 裕司, 菅野 元衛, 橋場 圭一: RC 構造物への光ファイバ適用可能性の検討, 日本建築学会大会, 1995.
15. 岩城 英朗, 三田 彰, 福喜多 輝, 橋場 圭一: 大規模構造物への光ファイバ適用可能性の検討, 土木学会第 50 回年次学術講演会, 1995.
16. S. L. Ong, H. Kumagai, H. Iwaki, K. Hotate: Crack detection in concrete using BOCDA based fiber optic distributed strain sensor, 電子情報通信学会大会, 2003.
17. 岩城 英朗: 構造ヘルスマモニタリングに適した光ファイバの検討, 日本建築学会大会, 2003.
18. 岩城 英朗, 岡田 敬一: 高分解能光ファイバ分布ひずみセンサ (PPP-BOTDA) によるガス導管ひずみ計測への適用試験, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 2005.
19. 岩城 英朗: 光ファイバ分布ひずみセンサを用いた斜張橋モニタリング, 第 37 回光波センシング技術研究会, 2006.
20. 中谷 篤史, 奥野 哲夫, 若林 成樹, 岩城 英朗: 光ファイバーセンサー (PPP-BOTDA 方式) によるコンクリートのひび割れ測定の実験的検討, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 2006.

21. 稲田 裕, 岩城 英朗: 高分解能光ファイバ分布ひずみ計測システム (PPP-BOTDA) を用いた RC 構造部材の損傷検知手法に関する検討 (その 1) 計測システムと試験結果, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 2006.
22. 岩城 英朗, 稲田 裕: 高分解能光ファイバ分布ひずみ計測システム (PPP-BOTDA) を用いた RC 構造部材の損傷検知手法に関する検討 (その 2) ひび割れ発生位置・幅の検知性能評価, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 2006.
23. 岩城 英朗, 稲田 裕, 若原 敏裕: 光ファイバ分布ひずみセンサ (B-OTDR) を用いた長大斜張橋施工時モニタリング, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 2007.
24. 岩城 英朗, 稲田 裕, 若原 敏裕: 光ファイバ分布センサを用いた長大斜張橋モニタリング, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008.
25. 岩城 英朗: 光ファイバ分布センサを用いた長大斜張橋モニタリング (計測精度および安定性・耐久性の検証), 土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009.
26. 岩城 英朗: 光ファイバ分布センサを用いた長大斜張橋モニタリング (長期モニタリングにおける温度校正と安定性・耐久性の検討), 土木学会第 66 回年次学術講演会, 2011.

## (国際会議)

1. H. Yamakawa, H. Iwaki, A. Mita, N. Takeda: Health monitoring of steel structures using Fiber Bragg Grating sensors, 2nd international workshop on Structural Health Monitoring, 1999.
2. A. Mita, H. Iwaki: Performance-based design and health monitoring system, Proc. of 3rd US-Japan workshop on nonlinear system identification and structural health monitoring, 2000.

3. H. Iwaki, H. Yamakawa, A. Mita: FBG-based displacement and strain sensors for health monitoring of smart structures, Proc. of 5th conference on Motion and Vibration Control , 2000.
4. H. Iwaki, H. Yamakawa, A. Mita: Health monitoring system using FBG-based sensors for a 12-story building with column dampers, smart structures and materials, 2001, pp. 471-478.
5. H. Iwaki, H. Yamakawa, K. Shiba, A. Mita: Structural health monitoring system using FBG-based sensors for a damage tolerant building, 3rd international workshop on Structural Health Monitoring, 2001.
6. H. Iwaki, K. Shiba, N. Takeda: Structural health monitoring system using FBG-based sensors for a damage tolerant building, Smart Structures and Materials 2003, 2003, pp.392-399.
7. K. Shiba, H. Kumagai, K. Watanabe, H. Iwaki: Application technologies for OTDR and FBG sensors to civil infrastructures, 16th international conference on optical fiber sensors, 2003.
8. K. Okada, M. Shiraishi, H. Iwaki, K. Shiba: Internet-Based Structural Response Monitoring System, International Workshop on Advanced Sensors, Structural Health Monitoring and Smart Structures, 2003.
9. H. Iwaki: Long span cable stayed bridge monitoring using distributed optical fiber sensing system, 18th international conference on optical fiber sensors, 2006.
10. H. Iwaki: Long span cable-stayed bridge monitoring system using distributed optical fiber strain sensor, 2nd Asia-Pacific workshop on structural health monitoring, 2006.

## (第3章)

### (国内会議等)

#### (一般講演)

1. 岩城 英朗, 鳴海 智宏, 横島 喬: C-band 衛星 SAR による熊本地震変化状態解析と構造物監視に向けた検討, 土木学会第 36 回地震工学研究発表会, 2016.
2. 岩城 英朗: C-band 衛星 SAR を用いた構造物監視に向けた試み, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017.
3. 岩城 英朗, 鳴海 智宏, 横島 喬: C-band 衛星 SAR による熊本地域の地表監視, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017.

## (第4章)

### (国内会議等)

#### (一般講演)

1. 岩城 英朗, 田村 和夫, 白井 郁夫, 能美 陽, 能美 仁: レーダー技術を活用した高層建物の面的振動特性評価, 地震工学会大会, 2017.

### (国際会議)

1. H. Iwaki, H. Nohmi, A. Nohmi, I. Shirai, K. Tamura: , Vibration Monitoring of a Tall Building applying DBF based imaging Radar, "VirA", Smart Structures + Nondestructive Evaluation, 2018. (submitted)



## 付録 A

# 衛星 SAR の観測データを用いた 差分干渉解析

本章は、第 3 章で論じた人工衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）の観測データを用いた差分干渉解析を、平成 28 年熊本地震前後の熊本地域における観測データを用いて実施する経過を示し、さらにその結果を用いた地表変状の解析や構造物の変化を捉える検討を行った結果を示す。

なお、衛星 SAR の観測データを用いた既往の研究は、2014 年 11 月に発生した長野県北部地震前後の衛星 SAR の観測データを用いて地表面の面的な変位を求め、現地の被災状況との比較を行った中埜ら [62] の研究や、2001 年 3 月に Hintze Ribeiro centennial 橋（ポルトガル）で発生した主桁崩落事故に対し、崩落以前の衛星 SAR の観測データから、崩落の予兆となる異常な変位を捉えた Sousa ら [63] の研究などを挙げることができる。

## A.1 衛星 SAR の概要と観測データ利用における課題

人工衛星搭載型合成開口レーダー（衛星 SAR）は、図 A.1 に示すように、地球を約 800km 上空で周回しながら地表の観測を合成開口レーダーを用いて行う地球観測衛星であり、その観測には表 A.1 に示す電波（波長帯）を用いている。観測対象に対する透過性や散乱強度は用いる波長帯により異なり、X-band などの短い波長帯を用いる衛星 SAR が、L-band などの長い波長帯を用いる衛星 SAR に比べ、観測対象の変状に対して精緻な計測が行われると考えられている [44]。

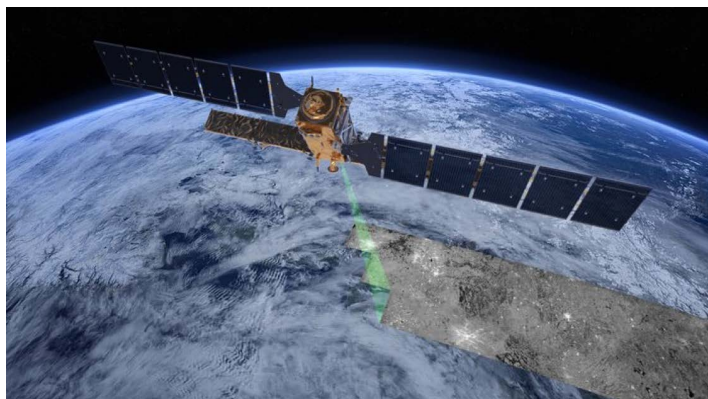


図 A.1 衛星 SAR による地球観測（ESA HP より引用）

表 A.1 衛星 SAR で主に用いられている電波（波長帯）

名称	波長	主な人工衛星
P-band	65cm	(米)AIRSAR(航空機搭載型 SAR)
L-band	23cm	(日)ALOS/ALOS-2
S-band	10cm	(露)Almaz-1
C-band	5cm	(加)RADARSAT,(欧)Sentinel-1
X-band	2cm	(欧)TerraSAR-X, COSMO-SkyMed
K-band	1.2cm	非公開(軍事用)

表 A.2 に宇宙航空研究開発機構（JAXA）が打ち上げ，運用を行っている陸域観測技術衛星「だいち 2 号」（ALOS-2）と，欧州宇宙機構（ESA）が運用を行っている衛星 SAR「センチネル-1」（Sentinel-1）の諸元と運用状況を示す。

表 A.2 主な衛星 SAR の諸元と運用

名称	ALOS-2	Sentinel-1 (Sentinel-1A <sup>*1</sup> )
運用機関	JAXA	ESA
軌道投入	2014 年	2014 年
波長帯	L-band	C-band
観測幅	50km <sup>*2</sup>	250km <sup>*3</sup>
グラウンドレンジ分解能	3m	20m
アジマス分解能	3m	5m
衛星高度	628 km	693km
ビーム入射角	8-70°	29.1-46°
軌道	極軌道	極軌道
回帰	14 日	12 日

これまでの衛星 SAR は、観測を行う予定の地域および観測日時といった観測計画や、これまでに観測を行った地域や日時などの記録（アーカイブ）は原則的に非公開であったため、利用者はある地域や構造物に対して衛星 SAR の観測データを用いた分析、解析が可能かどうかといった事前検討を行うことすら困難であった。また、後述の差分干渉解析など、観測データを用いた様々な解析を行うためのソフトウェアは概ね有償かつ高額であるため、限られたユーザーの使用に留まっていた。

しかし、表 A.2 に示した Sentinel-1 は、同衛星の運用開始直後から欧州宇宙機構 (ESA) コペルニクス計画のポータルサイト [47] から無料でアーカイブの検索と観測データの取得が可能となり、さらに取得したデータを処理し、差分干渉 SAR 解析等を行うためのソフトウェア (ESA SNAP)[64] や技術資料、さらに、同ソフトウェアが備える解析機能以外の様々な解析等を行う外部ソフトウェアの入手方法や設定についても同サイト経由で参照することができる。

<sup>\*1</sup> 現在運用している Sentinel-1 衛星 2 基のうちの 1 基

<sup>\*2</sup> 高分解能モードの場合

<sup>\*3</sup> IW (Interferometric Wide Swath) モードの場合



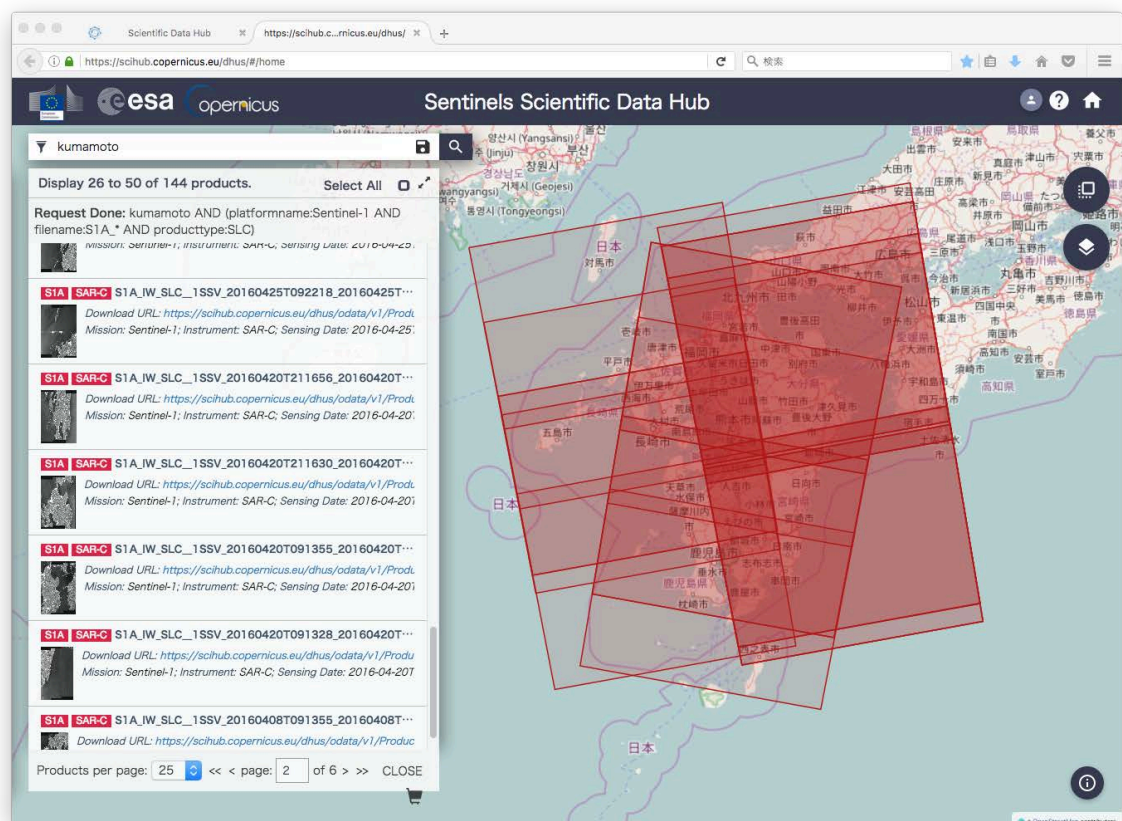


図 A.2 C-band 衛星 SAR 観測データの取得

## A.2 衛星 SAR データの取得

表 A.2 に示すように Sentinel-1 の回帰周期（地球を周回する衛星が元の位置に戻るまでの周期）は 12 日であり，その 1 周期の間に Sentinel-1 は地球を 175 周回する．熊本地域に対しては，その 175 周回の間に通常 3 回の観測を行っており，これらの観測のうち，差分干渉処理に用いる平成 28 年熊本地震前後の観測データを，表 A.3 に示す通り 34 式（34 シーン）取得した．なおこれらの観測データは，Sentinel-1 が地球を周回する 156 番目の軌道（path156）で取得したものであり，図 A.3 に示すように南極から北極に向かって移動する北向き（ASCENDING）軌道のデータである．なお，表 A.2 で示した「だいち 2 号」（ALOS-2）では，表 A.3 の期間で熊本地域において 23 回の観測を行っているが，そのほとんどが地震発生後に実施されたものである．

表 A.3 取得した観測データ一覧

No.	観測日	ファイル名
①	2015/05/08	S1A_IW_SLC__1SDV_20150508T091345_20150508T091412_005828_0077F8_DAE1.zip
②	2015/06/01	S1A_IW_SLC__1SSV_20150601T091346_20150601T091413_006178_0080B4_97EA.zip
③	2015/06/25	S1A_IW_SLC__1SSV_20150625T091348_20150625T091415_006528_008ACC_C5E4.zip
④	2015/07/19	S1A_IW_SLC__1SSV_20150719T091348_20150719T091415_006878_00948A_602E.zip
⑤	2015/08/12	S1A_IW_SLC__1SSV_20150812T091350_20150812T091417_007228_009E36_A68A.zip
⑥	2015/09/29	S1A_IW_SLC__1SSV_20150929T091351_20150929T091418_007928_00B12D_AFOA.zip
⑦	2015/10/23	S1A_IW_SLC__1SSV_20151023T091351_20151023T091418_008278_00BAA4_005E.zip
⑧	2015/11/16	S1A_IW_SLC__1SSV_20151116T091346_20151116T091413_008628_00C40E_89CF.zip
⑨	2016/01/03	S1A_IW_SLC__1SSV_20160103T091355_20160103T091430_009328_00D7B8_BE94.zip
⑩	2016/01/27	S1B_IW_SLC__1SDV_20170127T091321_20170127T091356_004032_006F76_3770.zip
⑪	2016/02/20	S1A_IW_SLC__1SSV_20160220T091354_20160220T091429_010028_00EC0E_05A8.zip
⑫	2016/04/08	S1A_IW_SLC__1SSV_20160408T091355_20160408T091430_010728_01001F_83EB.zip
⑬	2016/04/20	S1A_IW_SLC__1SSV_20160420T091355_20160408T091423_010903_010569_F9CE.zip
⑭	2016/05/02	S1A_IW_SLC__1SSV_20160502T091356_20160502T091431_011078_010AEF_565E.zip
⑮	2016/05/14	S1A_IW_SLC__1SSV_20160514T091400_20160514T091427_011253_011079_65D2.zip
⑯	2016/06/07	S1A_IW_SLC__1SSV_20160607T091401_20160607T091429_011603_011BC3_D3BD.zip
⑰	2016/07/01	S1A_IW_SLC__1SSV_20160701T091402_20160701T091430_011953_0126D3_5FFC.zip
⑱	2016/07/13	S1A_IW_SLC__1SSV_20160713T091403_20160713T091438_012128_012C90_94B8.zip
⑲	2016/08/06	S1A_IW_SLC__1SSV_20160806T091404_20160806T091440_012478_013818_11AB.zip
⑳	2016/08/30	S1A_IW_SLC__1SSV_20160830T091405_20160830T091441_012828_0143C1_1C87.zip
㉑	2016/09/23	S1A_IW_SLC__1SSV_20160923T091406_20160923T091442_013178_014F37_2BFD.zip
㉒	2016/10/17	S1A_IW_SLC__1SSV_20161017T091406_20161017T091442_013528_015A4F_2441.zip
㉓	2016/11/10	S1A_IW_SLC__1SSV_20161110T091406_20161110T091441_013878_016538_6DDD.zip
㉔	2016/11/16	S1B_IW_SLC__1SDV_20161116T091324_20161116T091359_002982_005113_DA08.zip
㉕	2016/11/28	S1B_IW_SLC__1SDV_20161128T091324_20161128T091359_003157_0055EF_A553.zip
㉖	2016/12/10	S1B_IW_SLC__1SDV_20161210T091323_20161210T091359_003332_005B03_B38A.zip
㉗	2016/12/22	S1B_IW_SLC__1SDV_20161222T091323_20161222T091358_003507_005FF0_E0DC.zip
㉘	2017/01/03	S1B_IW_SLC__1SDV_20170103T091321_20170103T091357_003682_00651E_2824.zip
㉙	2017/01/15	S1B_IW_SLC__1SDV_20170115T091321_20170115T091356_003857_006A33_6A35.zip
㉚	2017/01/27	S1B_IW_SLC__1SDV_20170127T091321_20170127T091356_004032_006F76_3770.zip
㉛	2017/02/08	S1B_IW_SLC__1SDV_20170208T091321_20170208T091356_004207_0074A4_E501.zip
㉜	2017/02/20	S1B_IW_SLC__1SDV_20170220T091320_20170220T091356_004382_0079EC_17F2.zip
㉝	2017/03/04	S1B_IW_SLC__1SDV_20170304T091320_20170304T091356_004557_007F0C_FDDF.zip
㉞	2017/03/16	S1B_IW_SLC__1SDV_20170316T091321_20170316T091356_004732_008436_BFB5.zip



図 A.3 Sentinel-1 衛星の観測域（熊本地域）

これらのファイルは、

- S1A: Sentinel-1 衛星（Sentinel-1A 衛星）の観測データ
- S1B: Sentinel-1 衛星（Sentinel-1B 衛星）の観測データ
- IW: 観測モード（IW (Interferometric Wide Swath) モード）
- SLC: Single Look Complex データ

であることを示している。

なお、差分干渉解析の成果は表 A.4 に示す国土地理院が設置運用 [?] している熊本地域における電子基準点の日々の変動値（F3 データ）を東西方向および上下方向に換算した経過と比較することとした。

表 A.4 衛星 SAR 解析成果と比較する電子基準点

名称	経度	緯度
長陽	130.9962E	32.8707N
熊本	130.7647E	32.8421N
千丁	130.6455E	32.5464N
矢部 A	130.9871E	32.6751N

## A.3 衛星 SAR 観測データを用いた差分干渉解析

### A.3.1 差分干渉解析の概要

衛星 SAR の観測データから、観測対象の変位や観測対象範囲にある構造物の変化を捉えるためには、図 A.4 で示すように異なる 2 回以上のタイミングで観測したデータの差分を求める差分干渉解析（DInSAR 解析）を行う。

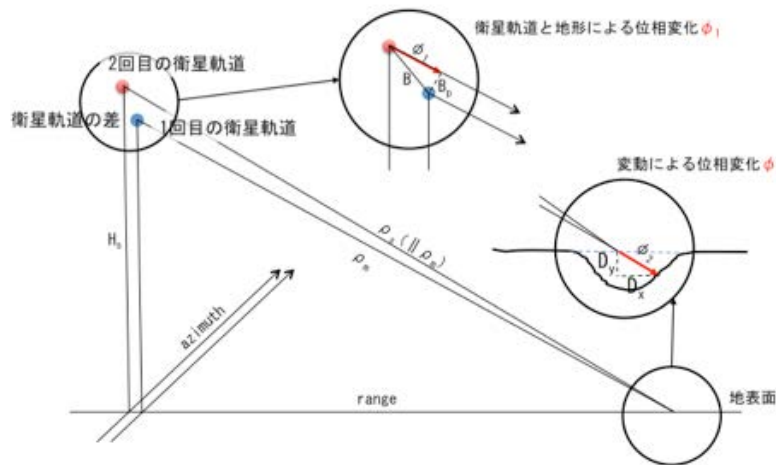


図 A.4 差分干渉解析の概要

複数の衛星 SAR の観測データから差分干渉解析を行う際は、各データを取得した際の衛星の軌道（すなわち位置）の差に留意する必要がある。Sentinel-1 衛星は比較的精緻に軌道制御を行っており、各観測データを取得した際の軌道も記録されているが、他の衛星 SAR においてはその限りではなく、観測データを取得した際の衛星軌道

記録に頼らずに各データの地表面における位置合わせを行う必要がある。差分干渉解析のフローを図 A.5 に示す。

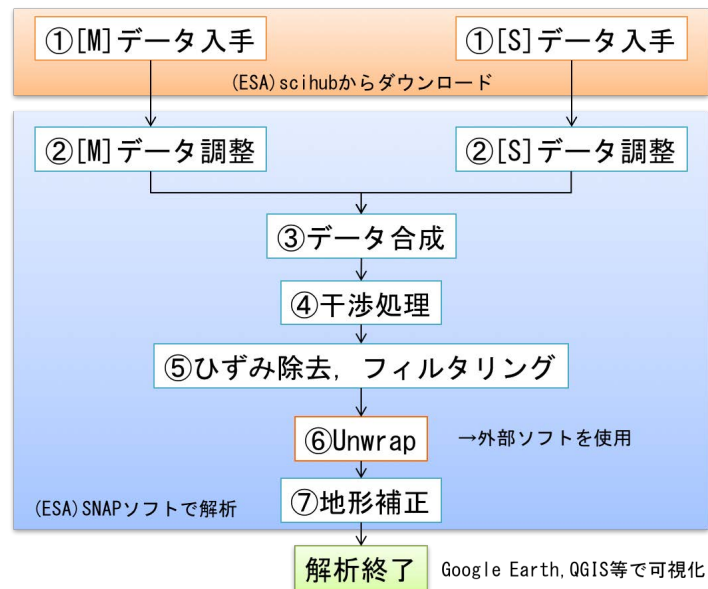


図 A.5 衛星 SAR の差分干渉解析の実行フロー

### A.3.2 衛星 SAR 観測データの読み込みとデータ調整

図 A.6 は、表 A.3 に示した熊本地震発生前のデータ（データ⑫）を、解析ソフトウェア SNAP に読み込んだ状態であり、衛星の進行方向に沿って南北方向が逆転した複数の帯状の画像となっている。また、本データの観測モード（IW）では、図 A.6 に示すとおり観測幅 250km を 3 つのデータに分割保存している。



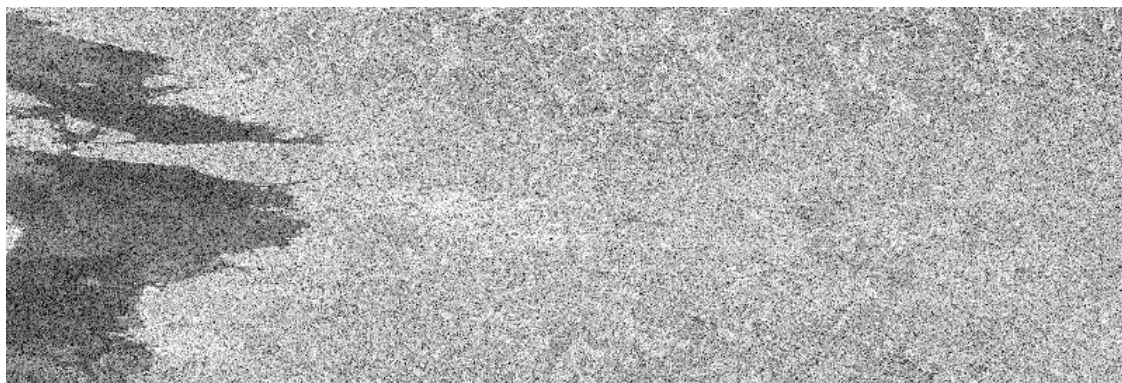
図 A.6 Sentinel-1 衛星の観測データ（熊本地域）

差分干渉解析を行うためには，以下の準備を観測時期が異なるデータ（例えば表 A.3 に示すデータ⑫，データ⑬）の双方に対して行う必要がある．

1. 衛星 SAR の入射角の違いから生じる散乱波強度の補正（キャリブレーション）
2. 衛星軌道制御情報の読み込み
3. 解析対象範囲の切取り（スプリット・マージ，デバースト，サブセット）

これらの準備を行った結果は図 A.7 に示す通りとなる．





(a) データ⑫ (2016/04/08)



(b) データ⑬ (2016/04/20)

図 A.7 データ調整を行った後の熊本地域の衛星 SAR 観測データ（散乱波強度画像）

### A.3.3 干渉処理

図 A.7 のデータに対し双方の衛星軌道情報（観測レーダーの位置情報）を基準として、データ合成（位置合わせ：コレジストレーション）を行った後、干渉処理（インターフェロメトリ）を行う。

なお、衛星軌道情報に頼らずに観測データの合成（位置合わせ）を行うためには、松岡ら [65] の研究で示されている手法，すなわち差分干渉解析を行う衛星 SAR の各観測データにおいて，散乱波の強度が比較的高い点（たとえば図 A.7 における白色で示されている点）を複数抽出し解析点とし，双方の観測データの間で，解析点の距離差が最小となるように各々の画像に対し回転，移動，拡大縮小などの操作（アフィン変換）を行う方法がある。

干渉処理を行った結果は図 A.8 に示すように校正する画素（ピクセル）の縦横比が

異なり，地形情報などが反映されていないため，画像の縦横比をそろえるマルチルッキング処理，さらに干渉処理の際に生じるノイズを除去するフィルタ処理等を行い，観測対象地域の地形（標高）を反映させる．

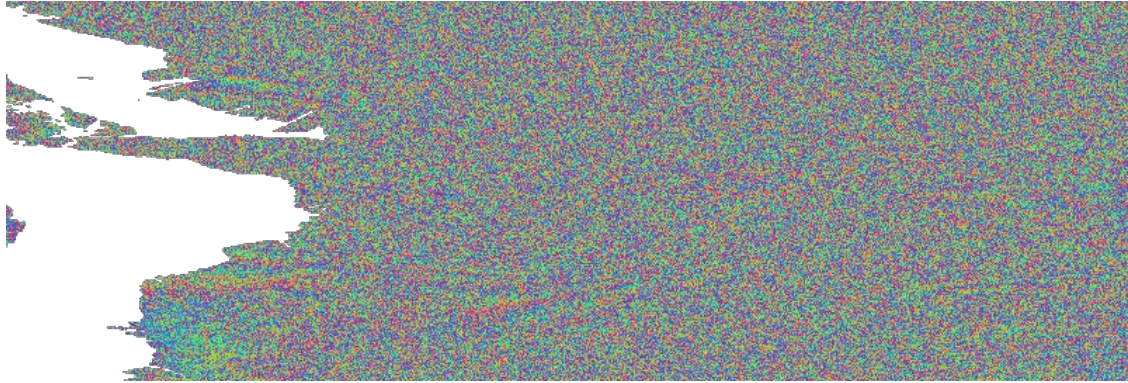


図 A.8 熊本地域の衛星 SAR 観測データ（差分干渉解析：位相差）

以上の処理を行った結果，熊本地震（本震）発生前後の衛星 SAR 観測データを用いた差分干渉解析は図 A.9 に示すことができる．



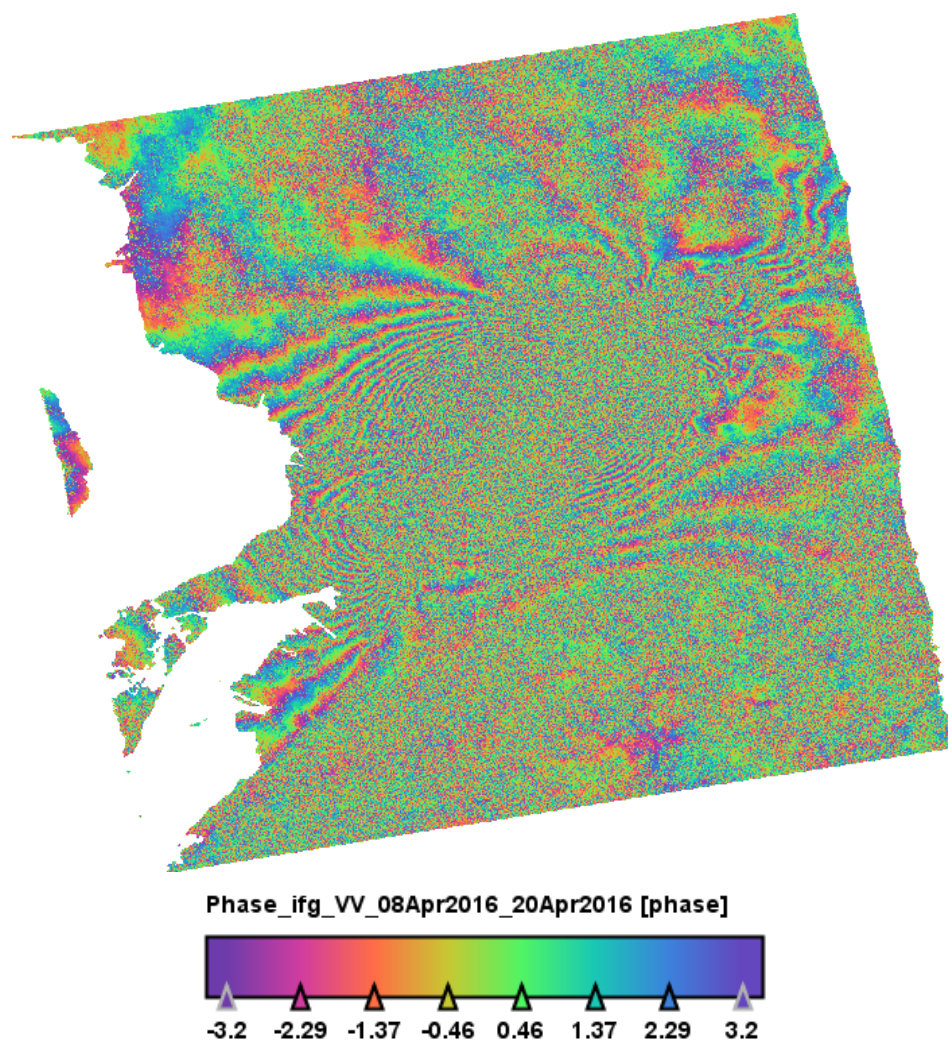


図 A.9 熊本地域における衛星 SAR の差分干渉解析結果

図 A.9 中の等高線状の縞は、2つの衛星 SAR の観測データの散乱波位相の差分が、衛星 SAR で送信する電波の波長（C-band 帯：約 6[cm]）で折り畳まれた値であり、国土地理院が熊本地震本震直後に公開した ALOS-2 の観測データを用いた差分干渉解析結果と傾向はほぼ等しい。縞模様の向きにほぼ直交する方向に位置する 2 カ所の国土地理院が運用する電子基準点「熊本」および「矢部 A」の間の位相差を図 A.10 に示す。

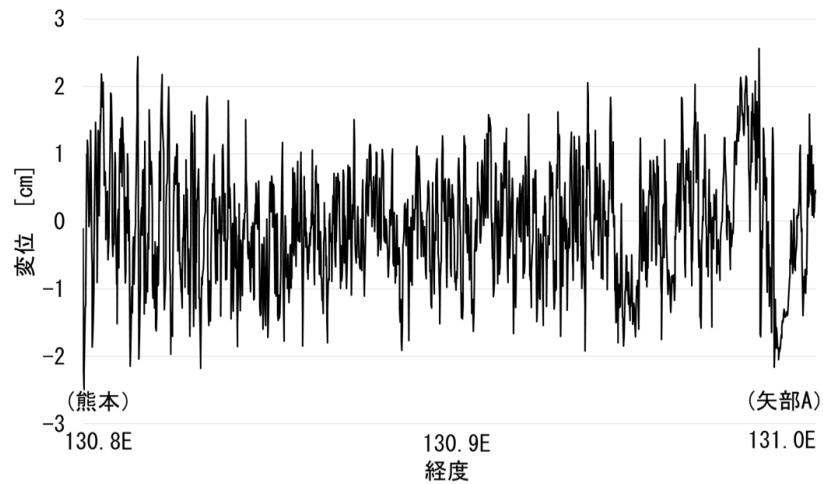


図 A.10 熊本地域における衛星 SAR の差分干渉解析結果（電子基準点「熊本」～「矢部 A」間の位相差）

### A.3.4 アンラップ処理

図 A.9 に示す位相差（衛星 SAR の使用波長に折り畳まれた変位）から、実際の地表変位を推定するためには、Ghiglia ら [66] が示すアンラップ処理を行う必要がある。アンラップ処理を行うソフトウェア `snaphu` は、ESA のポータルサイト経由で参照しダウンロードすることができ、同ソフトウェアをインストールした後、SNAP からデータおよび設定をエクスポートして実行する [67][68][69][70]。

図 A.11 に、図 A.9 の結果に対しアンラップ処理を行った結果を示し、併せて図 A.10 と同様に電子基準点「熊本」から「矢部 A」の間の変位を図 A.12 に示す。図 A.11 上の布田川断層帯北部の熊本空港周辺地域において、最大 1.3m の変位が認められ、それらは既往の研究成果（国土地理院など）と概ね等しいが、熊本地域における他の電子基準点の示す変位とは大きな差がある。

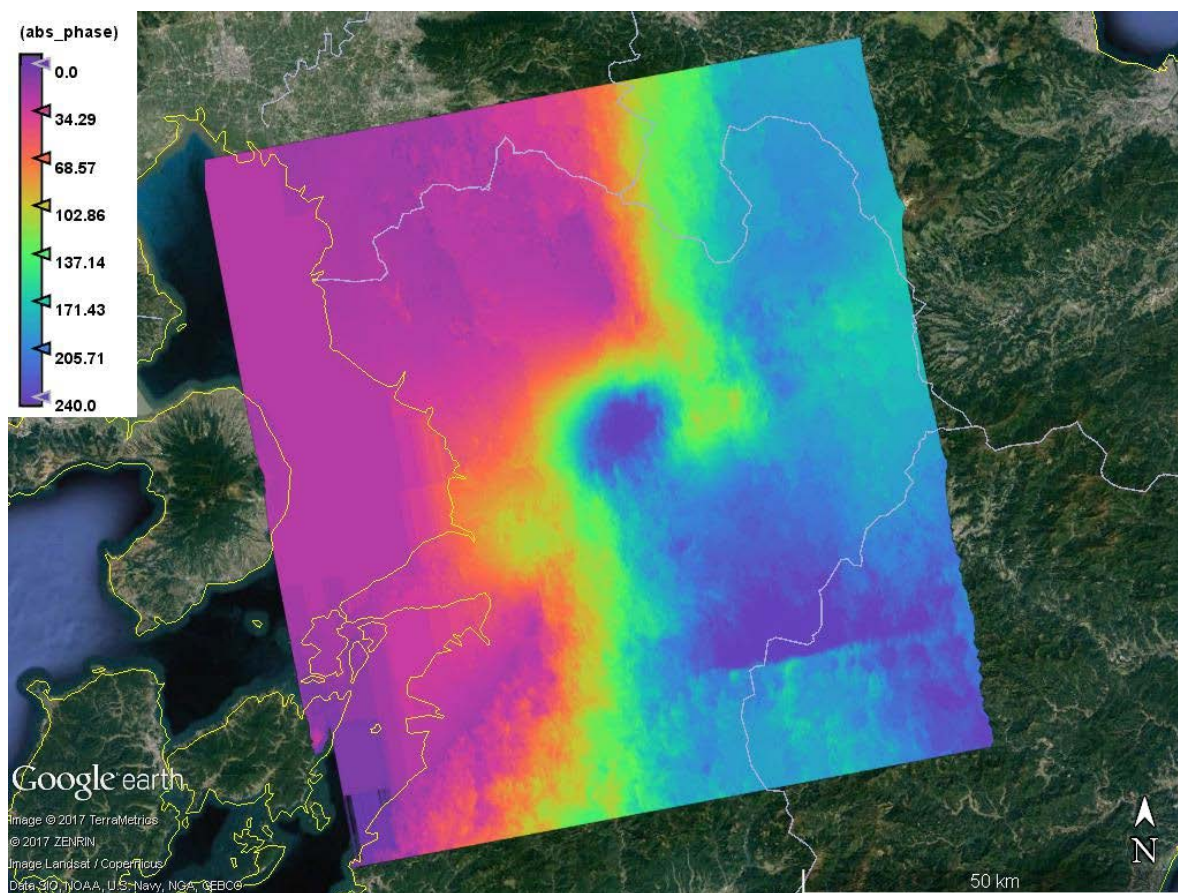


図 A.11 熊本地域における衛星 SAR の差分干渉解析・アンラップ処理結果  
(Google Earth 上に貼り付け)

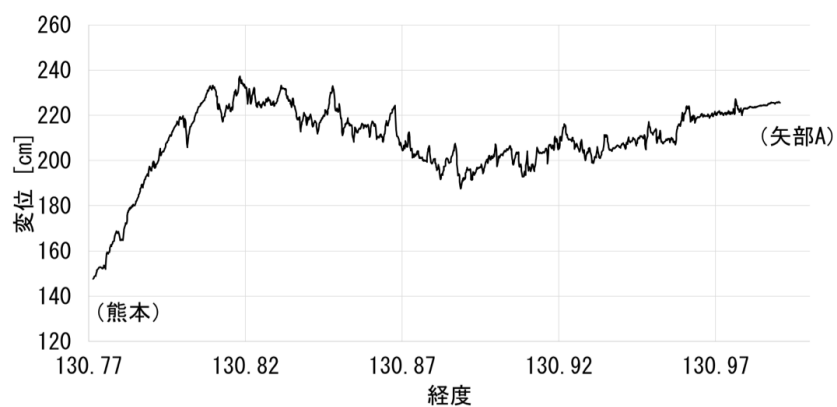


図 A.12 熊本地域における衛星 SAR の差分干渉解析・アンラップ処理結果（電子基準点「熊本」～「矢部 A」間の変位

## A.4 差分干渉解析結果の検討

表 A.3 に示した他の観測データに対して同様に差分解析干渉解析を行い、結果を図 A.13 に例示する。表 A.3 の各々の観測データの差分干渉解析結果で求めた位相差から、表 A.4 に示した熊本地域の電子基準点近傍における変位を抽出し、さらに衛星電波の入射角を用いて東西方向および上下方向の変位を求めた。電子基準点の日々の変動量（F3 データ）に対しても同様に東西方向と上下方向の変位を求め、図 A.14、図 A.15、図 A.16 に示す通り比較した。各々の変位の基準日は、表 A.3 に示すデータ①（2015 年 5 月 8 日）とし、衛星 SAR の成果においては、前項に示すとおり地震後の大きな変位の推定結果と地震後の実地観測等で得られた地表の変位との間の差が大きことからデータ⑬（2016 年 4 月 20 日）時点での電子基準点の変動値を改めて基準とした。

この結果、電子基準点「城南」「熊本」においては、上下方向および東西方向のいずれも電子基準点の変位の推移と、衛星 SAR 解析結果の推移はいずれも同様の傾向でその差は地震前後の約 2 年間にわたりほぼ 10cm 以内となっている。電子基準点「千丁」においては、電子基準点の計測値において特に上下方向のばらつきが大きい。これは電子基準点「千丁」の設置位置が水田に囲まれており、水田への引水などに伴う地盤の高さ変動が大きいためである。これらは衛星 SAR の解析結果との相関が良いとは必ずしも言えないが、双方の差は上記 2 点と同様に 10cm 以内にとどまっている。



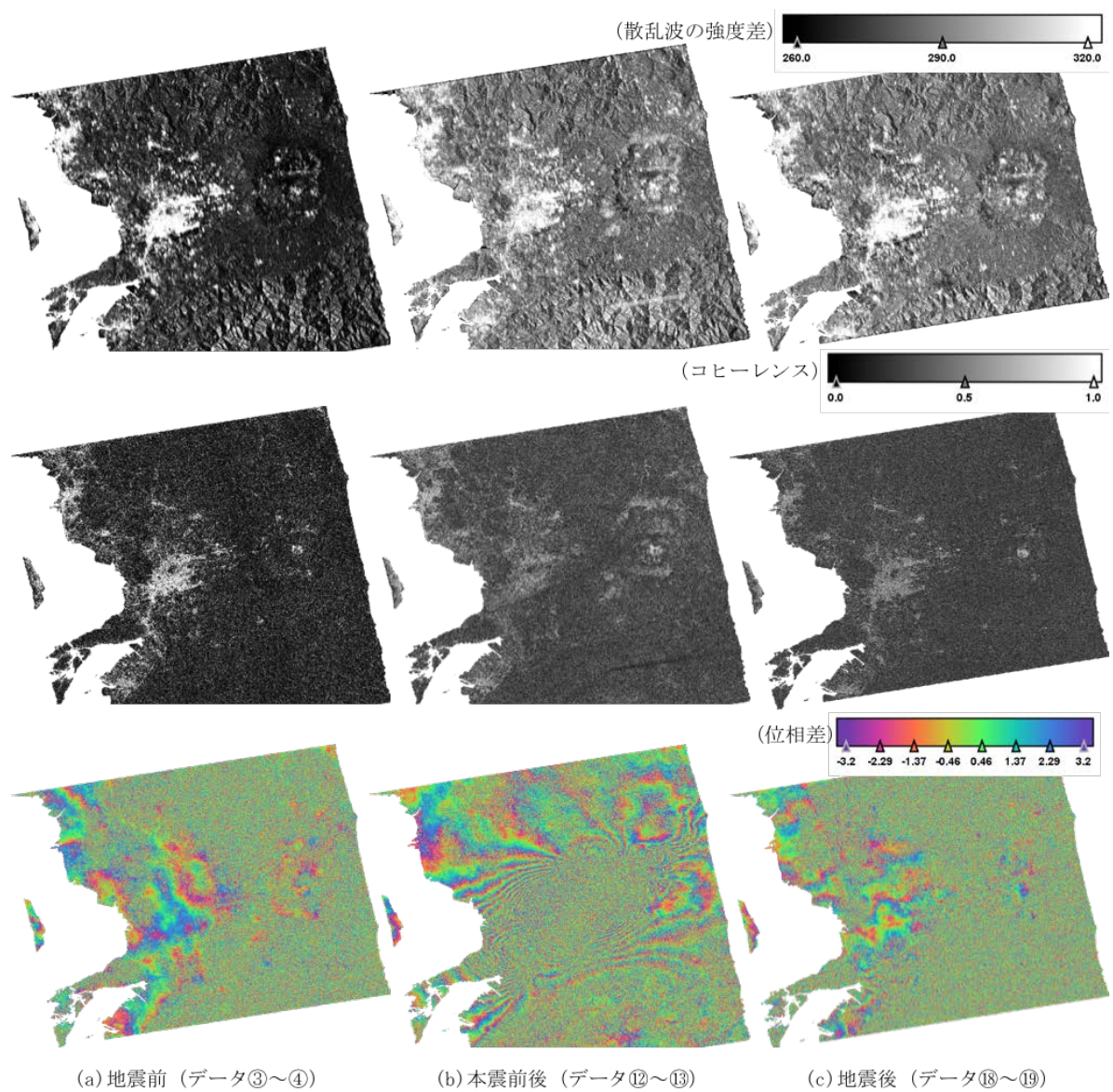


図 A.13 熊本地域における衛星 SAR の差分干渉解析結果

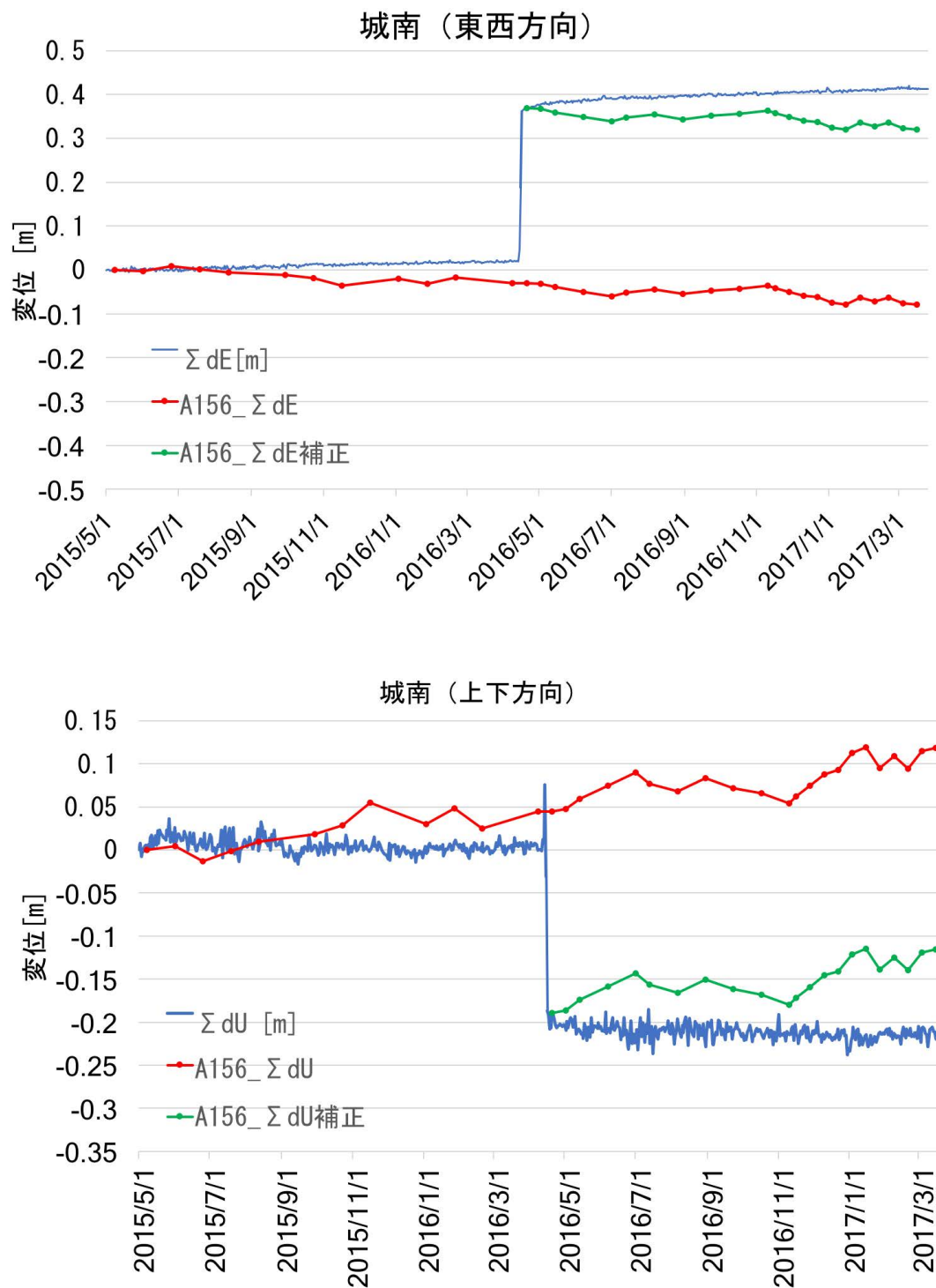


図 A.14 熊本地域における衛星 SAR の差分干渉解析結果と電子基準点「城南」との比較

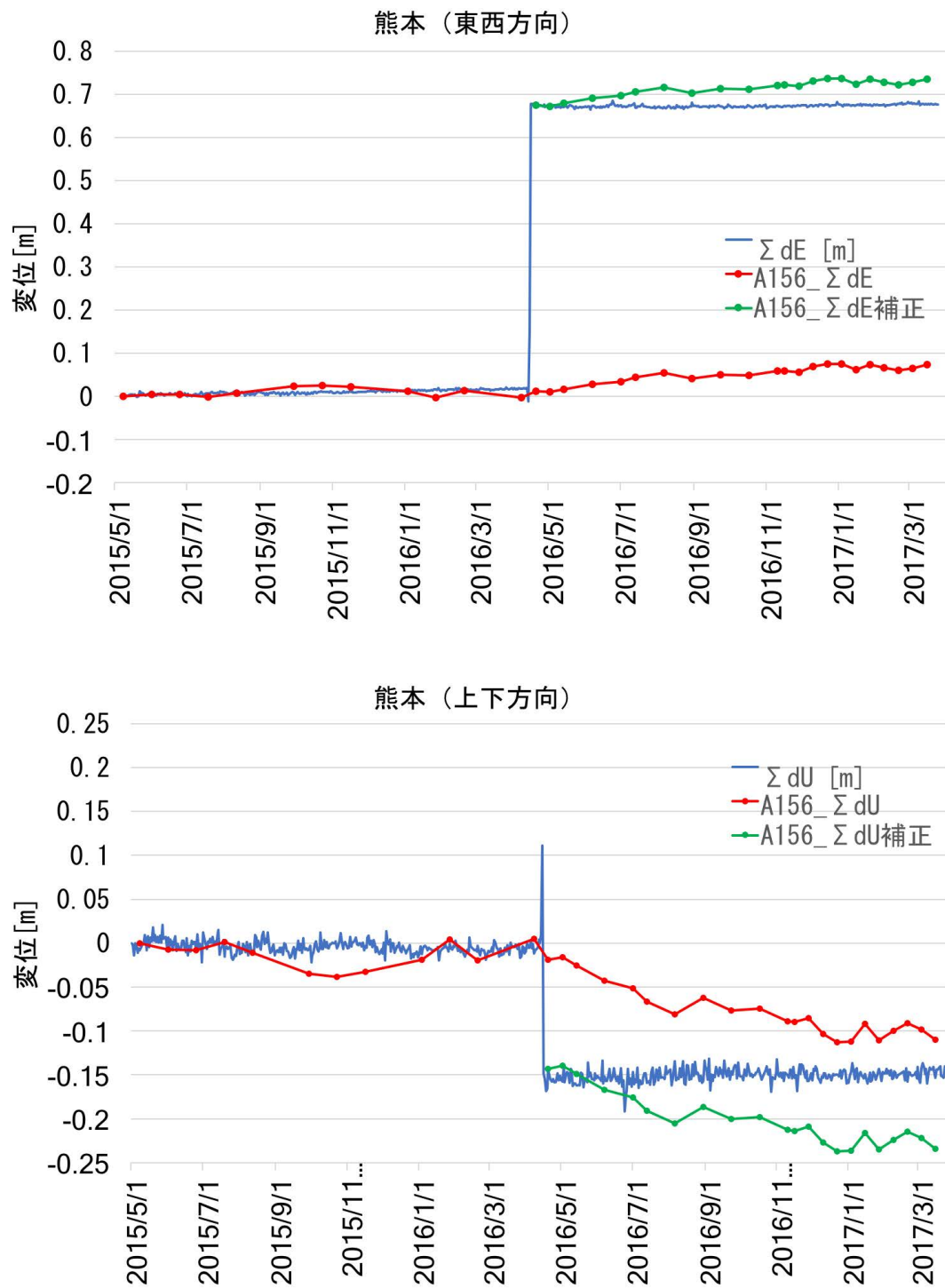


図 A.15 熊本地域における衛星 SAR の差分干渉解析結果と電子基準点「熊本」との比較

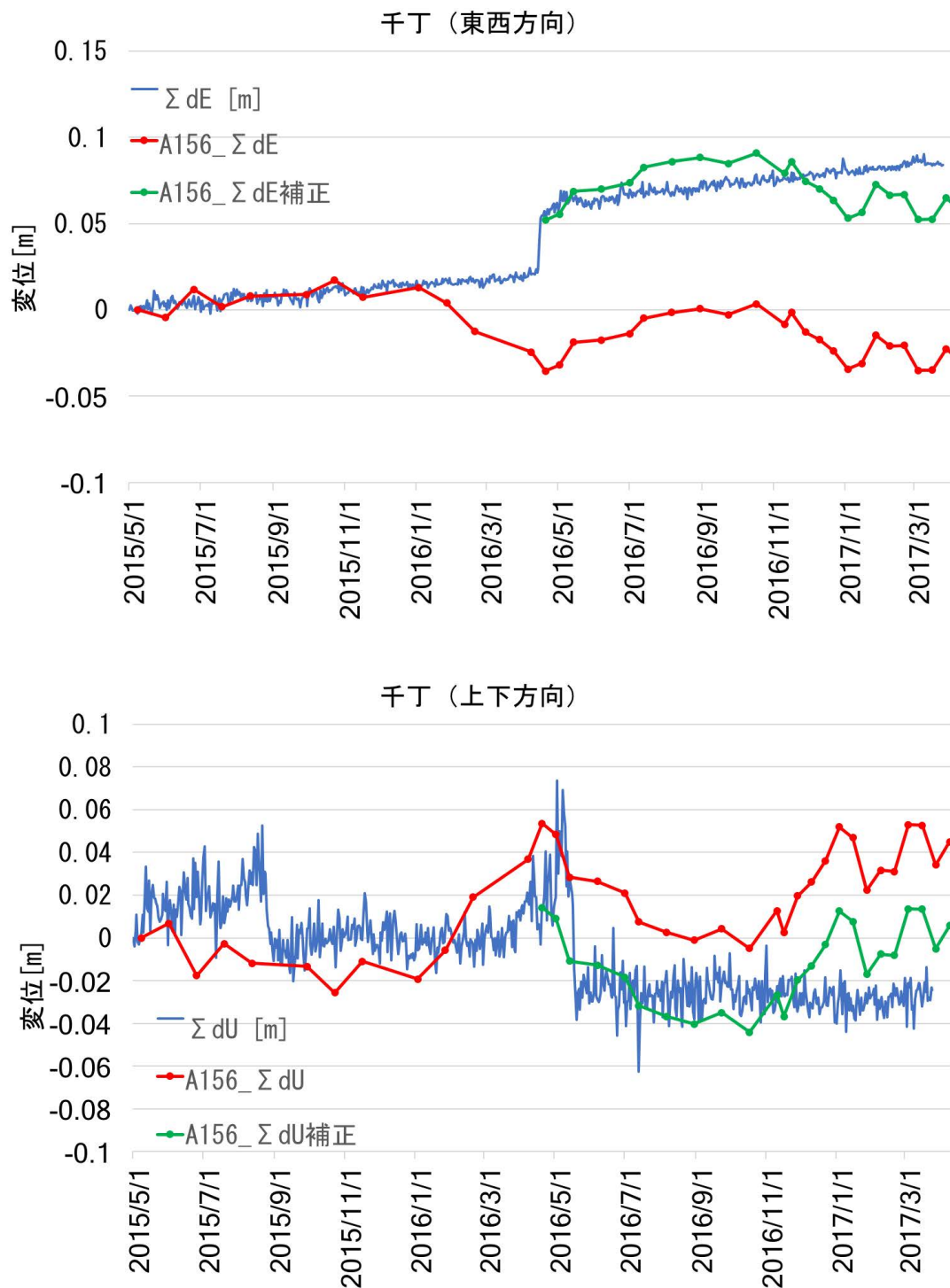


図 A.16 熊本地域における衛星 SAR の差分干渉解析結果と電子基準点「千丁」との比較





## 付録 B

# レーダー設置位置の推定

### B.1 3つの球の交点

第3章で示した通り，レーダー視野における座標から構造物の位置を示す直交座標に変換するためには，式 B.1 に示す三元連立方程式（異なる中心と半径を持つ三つの球の交点を求める公式）の解を用いて，レーダーが設置された位置の座標  $(x_0, y_0, z_0)$  を推定する必要がある．

$$\begin{aligned}(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 &= (S_i)^2 \\(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2 &= (S_j)^2 \\(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 + (z_k - z_0)^2 &= (S_k)^2\end{aligned}\tag{B.1}$$

ここで，

- $(x_i, y_i, z_i)$  : 解析点（1 回目）を表す直交座標
- $(x_j, y_j, z_j)$  : 解析点（2 回目）を表す直交座標
- $(x_k, y_k, z_k)$  : 解析点（3 回目）を表す直交座標
- $S_i$  : 解析点（1 回目）とレーダー設置位置の間のスラントレンジ距離
- $S_j$  : 解析点（2 回目）とレーダー設置位置の間のスラントレンジ距離
- $S_k$  : 解析点（3 回目）とレーダー設置位置の間のスラントレンジ距離
- $(x_0, y_0, z_0)$  : レーダー設置位置（未知数）

式 B.1 は未知数が 3 個の 3 式であるから，Mathematica[71] や Matlab (Symbolic Math Toolbox) [72] などの数式処ソフトウェアを用いて解くことができる．しかし，

それらのソフトウェアを用いた場合、解を示す項数が莫大となり煩雑となるため、本研究では Ichikawa が示す解法 [73] を参考に以下の手順で求める。

式 B.1 の第 2 式、第 3 式から第 1 式を引いて整理すると式 B.2 に示す通りとなる。

$$\begin{aligned}(x_j - x_i)x_0 + (y_j - y_i)y_0 + (z_j - z_i)z_0 &= -\frac{(A_j - A_i)}{2} \\ (x_k - x_i)x_0 + (y_k - y_i)y_0 + (z_k - z_i)z_0 &= -\frac{(A_k - A_i)}{2}\end{aligned}\tag{B.2}$$

ここで、

$$\begin{aligned}A_i &= S_i^2 - x_i^2 - y_i^2 - z_i^2 \\ A_j &= S_j^2 - x_j^2 - y_j^2 - z_j^2 \\ A_k &= S_k^2 - x_k^2 - y_k^2 - z_k^2\end{aligned}$$

と定義し、さらに、

$$\begin{aligned}x_{ji} &= x_j - x_i \\ x_{ki} &= x_k - x_i \\ y_{ji} &= y_j - y_i \\ y_{ki} &= y_k - y_i \\ z_{ji} &= z_j - z_i \\ z_{ki} &= z_k - z_i \\ A_{ji} &= -\frac{(A_j - A_i)}{2} \\ A_{ki} &= -\frac{(A_k - A_i)}{2}\end{aligned}$$

とおくと、式 B.2 は式 B.3 の通り示すことができる。

$$\begin{aligned}x_{ji}x_0 + y_{ji}y_0 + z_{ji}z_0 &= A_{ji} \\ x_{ki}x_0 + y_{ki}y_0 + z_{ki}z_0 &= A_{ki}\end{aligned}\tag{B.3}$$

さらに式 B.3 を  $x_0, y_0$  で整理すると式 B.4 のように示される。

$$\begin{aligned}x_0 &= B_0 + B_1z \\ y_0 &= C_0 + C_1z\end{aligned}\tag{B.4}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
D &= x_{ji}y_{ki} - x_{ki}y_{ji} \\
B_0 &= \frac{A_{ji}y_{ki} - A_{ki}y_{ji}}{D} \\
B_1 &= \frac{y_{ji}z_{ki} - y_{ki}z_{ji}}{D} \\
C_0 &= \frac{A_{ki}z_{ji} - A_{ji}z_{ki}}{D} \\
C_1 &= \frac{z_{ki}z_{ii} - z_{ji}z_{ki}}{D}
\end{aligned} \tag{B.5}$$

式 B.4 を式 B.1 の第 1 式に代入して  $z_0$  で整理すると式 B.6 に示す 2 次方程式となる.

$$Ez_0^2 + 2Fz_0 + G = 0 \tag{B.6}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
E &= B_1^2 + C_1^2 + 1 \\
F &= B_1(B_0 - x_i) + C_1(C_0 - y_i) - z_i \\
G &= (B_0 - x_i)^2 + (C_0 - y_i)^2 + z_i^2 - S_i^2
\end{aligned}$$

式 B.6 の 2 次方程式を解くと,  $z_0$  は式 B.7 に示す通り得られる.

$$z_0 = \frac{-F \pm \sqrt{F^2 - EG}}{E} \tag{B.7}$$

式 B.7 の結果を式 B.4 に代入すると  $x_0, y_0$  を得ることができる.

なお, 式 B.5 で定義した  $D$  は, それぞれの解析点  $(x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j), (x_k, y_k, z_k)$  を通る平面の法線ベクトルの  $z$  成分であり,  $D = 0$  の場合  $x, y$  を  $z$  の式として表すことができない.

そこで  $D = 0$  の場合は,  $(x_i, y_i, z_i), (x_j, y_j, z_j), (x_k, y_k, z_k)$  を通る平面の法線ベクトルの  $x$  成分  $D_x$  および  $y$  成分  $D_y$  を式 B.8 のように求め,

$$\begin{aligned}
D_x &= y_{ji}z_{ki} - y_{ki}z_{ji} \\
D_y &= x_{ji}z_{ki} - x_{ki}z_{ji}
\end{aligned} \tag{B.8}$$

$D_x$  および  $D_y$  の結果から,

$$\begin{aligned} D_x \neq 0 \text{ のとき} & : x \rightarrow y, y \rightarrow z, z \rightarrow x \\ D_y \neq 0 \text{ のとき} & : x \rightarrow z, y \rightarrow x, z \rightarrow y \end{aligned}$$

のように各軸の切替え（変換）を行い，式 B.2 から式 B.7 の手順で  $(x_0, y_0, z_0)$  を求めた後に再度元の軸に変換することで交点を得ることができる．（ $D, D_x, D_y$  のいずれも 0 の場合は 3 つの球からの交点は得られない．）

## B.2 2 つの円の交点

レーダー設置位置を推定するためには，レーダー計測で得た計測値を用いる方法以外に，レーザー測距計などを用いて計測対象の複数の点に対して測距を行い，その結果から設置位置を推定する方法も考えられる．

レーザー測距計の計測値を用いた推定では，計測対象構造物とレーダーの設置位置高さに差が無いと仮定することにより，2 カ所の計測値（距離）を求め，その対象座標から，異なる中心と半径を持つ二つの円の交点を求める公式を用いて求める．

すなわち，式 B.9 で二円の半径を求め，式 B.10 に示す二元連立方程式を解く．なお，式 B.10 の解は，前章と同様に Ichikawa が示す解法 [73] を参考に以下の手順で行う．

$$\begin{aligned} S_i^2 - z_i^2 &= R_i^2 \\ S_i^2 - z_j^2 &= R_j^2 \end{aligned} \tag{B.9}$$

$$\begin{aligned} (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 &= (R_i)^2 \\ (x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 &= (R_j)^2 \end{aligned} \tag{B.10}$$

ここで，

- $(x_i, y_i, z_i)$  : 計測点 (1 つ目) の直交座標  
 $(x_j, y_j, z_j)$  : 計測点 (2 つ目) の直交座標  
 $S_i$  : 計測点 (1 つ目) とレーダー設置位置の間のスラントレンジ距離  
 $S_j$  : 計測点 (2 つ目) とレーダー設置位置の間のスラントレンジ距離  
 $R_i$  : 計測点 (1 つ目) のレーダー設置位置面 ( $z = 0$ ) の投影座標と  
レーダー設置位置の間の距離  
 $R_j$  : 計測点 (2 つ目) とレーダー設置位置面 ( $z = 0$ ) の投影座標と  
レーダー設置位置の間の距離  
 $(x_0, y_0, 0)$  : レーダー設置位置 (未知数)

式 B.10 の第 2 式から第 1 式を引いて整理すると式 B.11 に示す通りとなる.

$$(x_j - x_i)x_0 + (y_j - y_i)y_0 = -\frac{(A_j - A_i)}{2} \quad (\text{B.11})$$

ここで,

$$\begin{aligned}
A_i &= R_i^2 - x_i^2 - y_i^2 \\
A_j &= R_j^2 - x_j^2 - y_j^2
\end{aligned}$$

と定義し, さらに,

$$\begin{aligned}
x_{ji} &= x_j - x_i \\
y_{ji} &= y_j - y_i \\
A_{ji} &= -\frac{(A_j - A_i)}{2}
\end{aligned}$$

とおくと, 式 B.11 は式 B.12 の通り示すことができる.

$$x_{ji}x_0 + y_{ji}y_0 = A_{ji} \quad (\text{B.12})$$

さらに式 B.12 を  $x_0$  で整理すると式 B.13 のように示される.

$$x_0 = B_0 + B_1y_0 \quad (\text{B.13})$$

ここで,

$$\begin{aligned} B_0 &= \frac{A_{ji}}{x_{ji}} \\ B_1 &= \frac{-y_{ji}}{x_{ji}} \end{aligned}$$

式 B.13 を式 B.10 の第 1 式に代入して  $y_0$  で整理すると式 B.14 に示す 2 次方程式となる.

$$Ey_0^2 + 2Fy_0 + G = 0 \quad (\text{B.14})$$

ここで,

$$\begin{aligned} E &= B_1^2 + 1 \\ F &= B_1(B_0 - x_i) - y_i \\ G &= (B_0 - x_i)^2 + y_i^2 - R_i^2 \end{aligned}$$

式 B.14 の 2 次方程式を解くと,  $y_0$  は式 B.15 に示す通り得られる.

$$y_0 = \frac{-F \pm \sqrt{F^2 - EG}}{E} \quad (\text{B.15})$$

式 B.15 の結果を式 B.13 に代入すると  $x_0$  を得ることができる.

## 参考文献

- [1] 高橋賞, 河井正安. ひずみゲージによるひずみ測定入門:歴史から測定まで. 大成社, 2005.
- [2] 上村欣一, 西田勲夫. 熱電半導体とその応用. 日刊工業新聞社, pp. 13–37, 1988.
- [3] 宮野秋彦, 小林定教. 熱電対による表面温度測定について. 日本建築学会論文報告集, Vol. 253, pp. 81–89, 1977.
- [4] 安藤芳之, 倉本健次. 航空電子の加速度計製品群と使われている技術について. 航空電子技報, No. 33, pp. 1–9, 2010.
- [5] 白石理人, 森井雄史, 岡田敬一, 杉本浩一, 佐藤俊明, 倉田真宏, 飛田潤. 多点高密度配置した振動センサと部分構造の出力誤差による局所損傷検出. 日本建築学会構造系論文集, Vol. 82, No. 736, pp. 801–811, 2017.
- [6] Billie F Spencer, Manuel E Ruiz-Sandoval, and Narito Kurata. Smart sensing technology: opportunities and challenges. *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 11, No. 4, pp. 349–368, 2004.
- [7] Jerome P Lynch, Yang Wang, Kenneth J Loh, Jin-Hak Yi, and Chung-Bang Yun. Performance monitoring of the geumdang bridge using a dense network of high-resolution wireless sensors. *Smart Materials and Structures*, Vol. 15, No. 6, p. 1561, 2006.
- [8] T Nagayama, BF Spencer, and Jennifer A Rice. Autonomous decentralized structural health monitoring using smart sensors. *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 16, No. 7-8, pp. 842–859, 2009.
- [9] 岡田敬一, 片岡俊一. 2ヶ所に設置したセンサによる地震記録を用いた建物全層応答推定手法の適用. 日本地震工学会論文集, Vol. 16, No. 3, pp. 3\_94–3\_113, 2016.
- [10] 岡田敬一, 森井雄史, 白石理人. 少数センサによる建物全層の地震応答推定手法の大型震動台実験データを用いた検証. 日本建築学会技術報告集, Vol. 23, No. 53,



pp. 77–82, 2017.

- [11] 森井雄史, 岡田敬一, 白石理人, 杉本浩一, 寺田岳彦, 佐藤俊明, 飛田潤. 地震直後における建物健全性評価のための限られた階の加速度記録に基づく建物全層応答推定手法. 日本建築学会構造系論文集, Vol. 81, No. 730, pp. 2045–2055, 2016.
- [12] 栗栖藍子, 欄木龍大, 日比野浩, 坂本成弘, 長島一郎. 常時微動の部分移動測定による建物振動性状の評価. 日本建築学会技術報告集, Vol. 23, No. 54, pp. 441–446, 2017.
- [13] 杉本浩一, 岡田敬一, 白石理人, 森井雄史. 多点移動常時微動計測と伝達関数再構築による高層建物の振動特性評価. 清水建設研究報告, Vol. 91, pp. 37–44, 2014.
- [14] 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 依田秀則. レーザー常時微動計測手法の構築と構造物の損傷検出への応用. 土木学会論文集, Vol. 2001, No. 689, pp. 183–199, 2001.
- [15] 久保田慶太, 宮下剛. レーザードップラーとトータルステーションを用いた非接触かつ遠隔的なケーブル計測システムの開発. 土木学会大会年次学術講演会, pp. 8–9, 2006.
- [16] 久保田慶太, 宮下剛. レーザードップラー速度計とトータルステーションを用いた超遠隔自動振動計測システムの構築. 土木学会大会年次学術講演会, pp. 19–20, 2007.
- [17] 宮下剛, 藤野陽三. レーザードップラー速度計を用いた三次元多点振動計測システムの開発. 土木学会論文集A, Vol. 63, No. 4, pp. 561–575, 2007.
- [18] 上半文昭, 村田修, 斎藤秀樹. 岩盤斜面評価用非接触振動計測システムに関する基礎的検討 (特集鉄道力学). 鉄道総研報告, Vol. 24, No. 4, pp. 5–10, 2010.
- [19] 大越孝敬, 西原浩, 岡本勝就. 光ファイバセンサ. 1986.
- [20] C. D. Butter and G. B. Hocker. Fiber optics strain gauge. *Applied Optics*, Vol. 17, No. 18, p. 2867, 1978.
- [21] DR Huston, PL Fuhr, and JG Beliveau. Bridge monitoring with fiber optic sensors. In *US-Japan Bridge Engineering Symposium*, 1992.
- [22] 三田彰, 片岡俊一. ヘルスモニタリング用FBG加速度センサおよび圧力センサの特性評価. 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 第2000巻, pp. 771–772. 一般社団法人日本建築学会, 2000.
- [23] 長井望, 三田彰. 構造ヘルスモニタリングに適したFBG加速度センサの高感度化に関する研究. 日本建築学会大会学術講演会梗概集, 第2001巻, pp. 213–214. 一般社団法人日本建築学会, 2001.
- [24] 岩城英朗. Fbg変位センサの履歴型制振架構への適用検討. Vol. 2000, , 2000.

- [25] 岩城英朗, 三田彰, 福喜多輝, 橋場圭一. 大規模構造物への光ファイバセンサ適用可能性の検討. 土木学会年次学術講演会, pp. 118–119, 1995.
- [26] Tsuneo Horiguchi, Toshio Kurashima, and Mitsuhiro Tateda. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers. *Photonics Technology Letters*, Vol. I, No. 8928256, pp. 107–108, 1989.
- [27] Govind P Agrawal. *Nonlinear fiber optics*. Academic press, 2007.
- [28] Toshio Kurashima and Tsuneo Horiguchi. Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques. In *Proc. of ECOC*, pp. 149–150, 1998.
- [29] Toshio Kurashima, Tsuneo Horiguchi, Hisashi Izumita, Shin-ichi Furukawa, and Yahei Koyamada. Brillouin optical-fiber time domain reflectometry. *IEICE transactions on communications*, Vol. 76, No. 4, pp. 382–390, 1993.
- [30] 内山晴義, 坂入良幸, 野崎威志. 新検波方式を用いた光ファイバ歪み分布測定器の製品化. Ando 技報, Vol. 72, pp. 53–61, 2002.
- [31] 熊谷仁志, 三田彰, 岡公隆, 大野博重. コンクリート構造物用光ファイバセンサの開発と実証. コンクリート工学, Vol. 38, No. 7, pp. 17–21, 2000.
- [32] 岩城 英朗. 構造ヘルスマモニタリングに適した光ファイバの検討. 日本建築学会大会学術講演会梗概集, Vol. 2003, pp. 1005–1006, 2003.
- [33] Masahiro Komachiya, Rintarou Minamitani, Takayuki Fumino, Tatsunori Sakaguchi, and Shizuhisa Watanabe. Proof-Testing and Probabilistic Lifetime Estimation of Glass Fibers for Sensor Applications. *Applied Optics*, Vol. 38, No. 13, p. 2767, may 1999.
- [34] 満永豊. スクリーニング試験による光ファイバ強度保証法. 電子通信学会論文誌 B, Vol. 66, No. 7, pp. p829–836, 1983.
- [35] 三田彰, 長井望. 構造ヘルスマモニタリング用の FBG 加速度センサの最適設計と寿命推定. 日本建築学会技術報告集, No. 14, pp. 79–82, 2001.
- [36] 中村智樹, 土田一輝, 大野浩. 工事報告バイチャイ橋建設工事–世界遺産に架ける世界最長の 1 面吊り PC 斜張橋. プレストレストコンクリート, Vol. 49, No. 1, pp. 11–19, 2007.
- [37] 岩城英朗, 稲田裕, 若原敏裕. 長大橋モニタリングシステムの開発と適用例 (特集 維持管理とアセットマネジメント). プレストレストコンクリート, Vol. 50, No. 2, pp. 79–84, 2008.
- [38] 吉田孝. 改訂レーダ技術. 電子情報通信学会 (コロナ社), 1996.

- [39] 関根松夫. レーダ信号処理技術. 電子情報通信学会, 1991.
- [40] 山口芳雄. レーダポーラリメトリの基礎と応用: 偏波を用いたレーダリモートセンシング. 電子情報通信学会, 2007.
- [41] Fawwaz T Ulaby and M Craig Dobson. Handbook of radar scattering statistics for terrain (artech house remote sensing library). *Norwood, MA, USA: Artech House*, 1989.
- [42] 菊間信良. アレーアンテナによる適応信号処理, 1998.
- [43] 畚野信義. 合成開口レーダ. 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 1, No. 1, pp. 49–93, 1981.
- [44] 大内和夫. リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎. 東京電機大学出版局, 2009.
- [45] Didier Massonnet, Marc Rossi, César Carmona, Frédéric Adragna, Gilles Peltzer, Kurt Feigl, and Thierry Rabaute. The displacement field of the landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, Vol. 364, No. 6433, p. 138, 1993.
- [46] Didier Massonnet and Kurt L Feigl. Radar interferometry and its application to changes in the earth’s surface. *Reviews of geophysics*, Vol. 36, No. 4, pp. 441–500, 1998.
- [47] 欧州宇宙機構 (ESA). Copernicus open access hub. <https://scihub.copernicus.eu/>.
- [48] 国土交通省国土地理院. 電子基準点とは. [http://terras.gsi.go.jp/geo\\_info/gps-based\\_control\\_station.html](http://terras.gsi.go.jp/geo_info/gps-based_control_station.html).
- [49] 国土交通省国土地理院. 電子基準点データ提供サービス. <http://terras.gsi.go.jp/>.
- [50] Piero Boccardo, Vittorio Gentile, Fabio Giulio Tonolo, Domenico Grandoni, and Magdalena Vassileva. Multitemporal sar coherence analysis: Lava flow monitoring case study. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International*, pp. 2699–2702. IEEE, 2015.
- [51] 米田雅子. 熊本地震・一周年報告会. 学術の動向, Vol. 22, No. 5, pp. 5\_82–5\_84, 2017.
- [52] 能美仁. 干渉型振動観測装置、振動観測プログラムおよび振動観測方法, 2016. WO Patent App. PCT/JP2014/005,066.
- [53] 能美 仁, 坂井 滋和, 松本 泰尚, 蘇 迪, 長山 智則, 白井 郁夫, 九十歩修. 振動・微小変位可視化レーダー VirA の開発. 日本リモートセンシング学会第 61 回学術講演

- 会, 2016.
- [54] 能美仁, 白井郁夫. 検査機器 振動可視化レーダー. 検査技術, Vol. 22, No. 9, pp. 49–51, 2017.
  - [55] Graham M Brooker. Understanding millimetre wave fmcw radars. In *1st International Conference on Sensing Technology*, pp. 152–157, 2005.
  - [56] DW Bliss and KW Forsythe. Multiple-input multiple-output (mimo) radar and imaging: degrees of freedom and resolution. In *Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on*, Vol. 1, pp. 54–59. IEEE, 2003.
  - [57] Alfonso Farina. Antenna-based signal processing techniques for radar systems(book). *Norwood, MA: Artech House, 1992.*, 1992.
  - [58] 山田 高史, 鈴木 亨, 川島 学. 粘性制震壁を有する高層鉄骨造建物の振動特性評価 : (その 1) 計測概要と常時微動計測結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 第 2012 巻, pp. 1103–1104. 一般社団法人日本建築学会, 2012.
  - [59] 鈴木 亨, 川島 学, 山田 高史. 粘性制震壁を有する高層鉄骨造建物の振動特性評価 : (その 2) 計測結果. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 第 2012 巻, pp. 1105–1106. 一般社団法人日本建築学会, 2012.
  - [60] 川島 学, 鈴木 亨, 山田 高史. 粘性制震壁を有する高層鉄骨造建物の振動特性評価 : (その 3) 振動特性評価と設計値との比較. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 第 2012 巻, pp. 1107–1108. 一般社団法人日本建築学会, 2012.
  - [61] 藤原智, 飛田幹男, 村上亮. 干渉 sar による水蒸気情報の重要性. 気象研究ノート GPS 気象学, 第 192 巻, pp. 192–212, 1998.
  - [62] 中埜貴元, 飛田幹男, 中島秀敏, 神谷泉. 干渉 sar で捉えた 2014 年 11 月 22 日長野県北部を震源とする地震に伴う地表変位. 活断層研究, Vol. 2015, No. 43, pp. 69–82, 2015.
  - [63] JJ Sousa and L Bastos. Multi-temporal sar interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 13, No. 3, p. 659, 2013.
  - [64] 欧州宇宙機構 (ESA). step: science toolbox exploitation platform. <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>.
  - [65] 松岡 昌志, 山崎 文雄. 人工衛星 SAR 強度画像による建物被害地域の検出手法. 日本建築学会構造系論文集, Vol. 67, No. 551, pp. 53–60, 2002.
  - [66] Dennis C Ghiglia and Mark D Pritt. *Two-dimensional phase unwrapping: theory*,

- algorithms, and software*, Vol. 4. Wiley New York, 1998.
- [67] Curtis W Chen and Howard A Zebker. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *JOSA A*, Vol. 17, No. 3, pp. 401–414, 2000.
  - [68] Curtis W Chen and Howard A Zebker. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *JOSA A*, Vol. 18, No. 2, pp. 338–351, 2001.
  - [69] Curtis W Chen and Howard A Zebker. Phase unwrapping for large sar interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 8, pp. 1709–1719, 2002.
  - [70] Stanford Radar Interferometry Research Group. Snaphu: Statistical-cost, network-flow algorithm for phase unwrapping. <http://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>.
  - [71] Wolfram Research. Wolfram mathematica. <http://www.wolfram.com/mathematica/>.
  - [72] Mathworks Inc. Matlab 技術計算言語. <http://jp.mathworks.com/products/matlab/>.
  - [73] K. Ichikawa. <http://www.enjoy.ne.jp/~k-ichikawa/index.html>.