

## 9. 道路の地震防災・減災対策

# 動的耐震照査法の信頼性向上に関する調査

## Study on reliability improvement of dynamic seismic verification method

(研究期間 令和3年度～令和5年度)

道路構造物研究部 道路地震防災研究室  
Road Structures Department  
Earthquake Disaster Management Division

室 長 上仙 靖  
Head JOSEN Yasushi

研 究 官 石井 洋輔  
Researcher ISHII Yosuke

This study verifies the standard parameters employed in the dynamic seismic verification method for highway bridges in order to improve the reliability of the method. Therefore, the vibration characteristics of entire bridge systems were calculated by using their observed behavior.

### 〔研究目的及び経緯〕

道路橋の耐震設計では、橋全体を構成する部材の耐荷性能を動的な解析で照査することが一般的である。道路橋示方書・同解説に示される動的耐震照査に用いる標準的な設定値は、不確実性を踏まえて安全余裕を考慮して設定しているものが存在し、設定値の説明性や照査手法の信頼性のさらなる向上が求められている。

国総研では、一つの橋に地震計を密に配置し、加速度を多点で観測することで全体系の振動を観測するシステムを東北～九州地方の24橋に設置している。橋全体系の挙動をきめ細やかに観測することで、固有振動数や減衰特性などの地震応答特性の分析が可能になる。

そこで本研究では、観測システムで観測された記録から橋の振動特性（固有周期、減衰特性）を直接的に評価し、観測記録より評価した振動特性について、耐震設計に用いる標準的な設定値と比較検証した。

R3～R5年度の検討では、振動観測を行っている14橋を対象に振動特性（固有周期、減衰特性）を算出し、既往の振動実験で得られている値と比較検証した。また、桁橋と比較して地震時の挙動が複雑な構造形式の橋に対し、観測記録より減衰特性を評価した。

### 〔研究内容〕

#### 1. 実測記録から求めた橋の振動特性

地震時、常時、そしてそれらの連続した観測記録を対象に対象橋の振動特性（固有周期、減衰特性）を算出した。観測記録より橋の振動特性を算出する方法は、システム同定手法を用いた。システム同定は、観測データの入力信号 $\{u_k\}$ と出力信号 $\{y_k\}$ から状態方程式と出力方程式を解き、観測記録から直接的に振動特性（固有周期、減衰特性）を推定する手法である。システム同定を橋の挙動観測に対応させた概念図を図-1に示す。

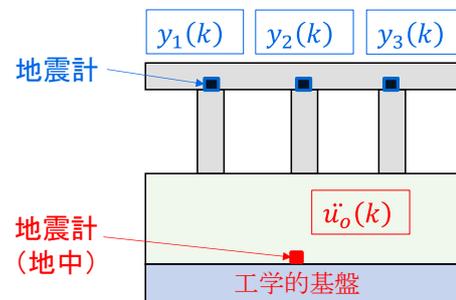


図-1 橋の観測点へのシステム同定の適用

本研究では、表-1に示す14橋にシステム同定手法を適用し、それぞれの橋の固有周期と減衰特性を算出した。また、算出した振動特性について、土木研究所が従前の振動実験で明らかにした橋の固有周期と減衰特性の関係と比較した。

#### 2. 解析モデルによる橋の振動特性の評価

本研究では、桁橋より比較的挙動が複雑と考えられる逆ランガー橋や曲線橋を対象に解析モデルを構築し、地震応答解析を用いて詳細に振動特性を検証した。システム同定で算出した振動特性について、設計モデルで適用されている振動特性と比較し、地震応答解析を用いて橋の応答に与える影響を検証した。なお、システム同定に用いた記録は、レベル1地震動より小さい加速度であり、比較対象の設計モデルは線形状態としてモデル化する場合のものを用いた。

### 〔研究成果〕

#### 1. 実測記録から求めた橋の振動特性

本稿では、地震時の記録を対象にしたシステム同定で得られた各橋の固有周期と減衰特性の関係を示す。前述した既往実験結果との比較を図-2に示す。システム同定で得られた固有周期と減衰定数の関係は、概ね固有周期0.2-1、減衰定数0.005-0.05の範囲

表-1 本研究の対象橋

	形式等	橋長 (m)	センサー 数	
			橋	地盤
1	4径間連続鋼鈹桁橋	152	13	1
2	ランプ橋	133	19	1
3	3径間合成箱桁橋	150	12	1
4	鋼逆ランガー橋	152	9	1
5	8径間鋼箱桁橋	470	9	1
6	15径間連続鋼鈹桁橋	439	9	1
7	16径間鋼桁橋	240	9	1
8	10径間PC箱桁橋	886	10	1
9	7径間箱桁橋	280	10	1
10	10径間PC桁橋	268	9	1
11	18径間連続鈹桁橋	575	55	4
12	7径間連続鋼非合成箱桁橋	443.65	17	3
13	7径間連続鋼非合成箱桁橋	443.65	18	3
14	9径間連続鋼床版2主鈹桁橋	515	31	4

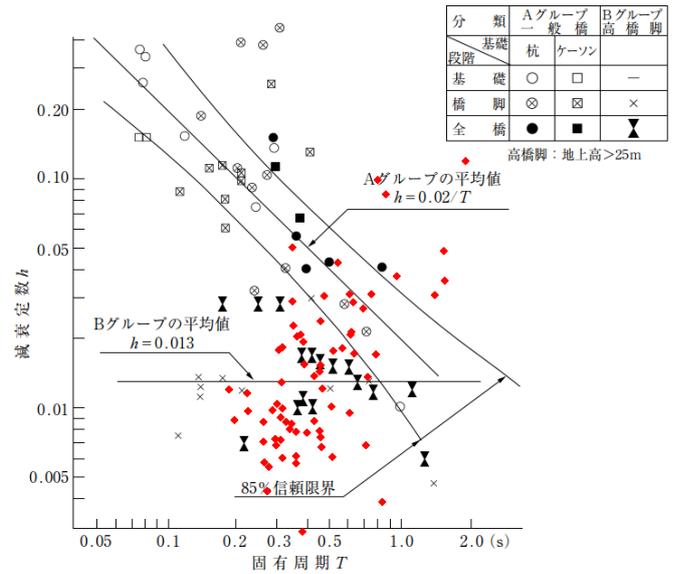


図-2 推定した固有周期と減衰特性の関係  
(土木研究所報告第139号の実験結果にひし形(◇)を加筆)

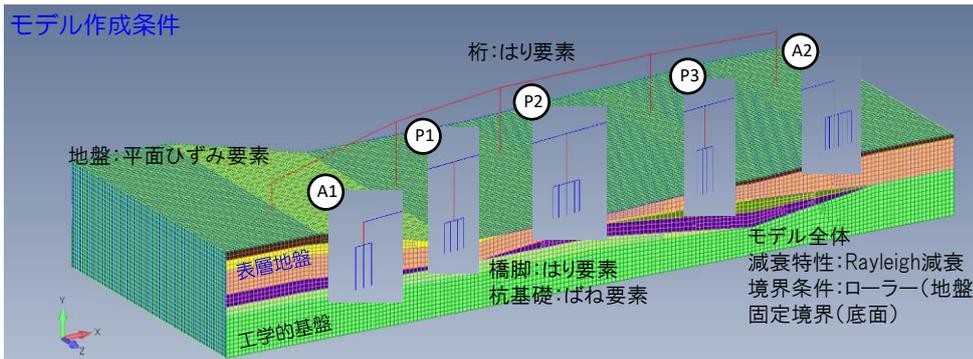


図-3 対象橋(曲線橋の解析モデル)

## 2. 解析モデルによる橋の振動特性の評価

本稿では代表して、図-3に示す曲線橋の検証結果を示す。システム同定で算出した固有周期と減衰定数を解析モデルに反映した場合と、設計基準に示される値を用いた場合に、解析で設定されるレーリー減衰の比較を図-4に示す。

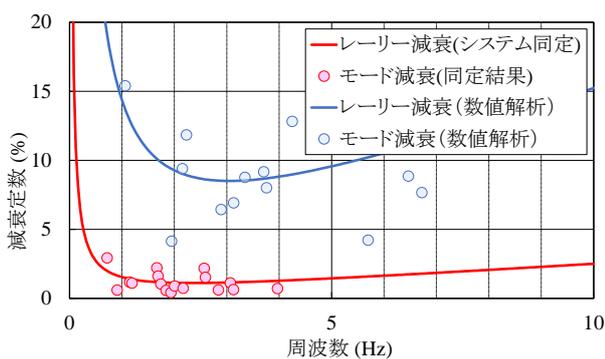


図-4 解析モデルに設定する減衰特性の比較

であり、既往実験結果のBグループ(全橋および橋脚単体)で得られている範囲と概ね整合していた。一方、一部既往実験結果と整合しない結果も得られており、今後、対象橋の構造形式や算出に用いた観測データの特性を踏まえ詳細に分析する予定である。

用いた場合に、解析で設定されるレーリー減衰の比較を図-4に示す。

図-4より、システム同定と固有値解析で算出されたそれぞれの固有周波数は概ね同様の帯域であった。一方、システム同定で算出された減衰定数は、設計モデルと比較して概ね5%小さく設定された。これは、システム同定で対象とした地震が微弱であり、部材間の振動伝達で生じる減衰など、地震時に想定されているような減衰が生じていない可能性があり、システム同定で算出された減衰特性が小さくなったと考えられる。今後は、大きい地震時の観測記録を用いて分析し、地震の大きさによる解析結果のばらつきを検証や既往の設定値との比較等を実施する。

### 【成果の活用】

道路橋の技術基準に規定されている動的耐震照査の設定値に本検討結果を反映し、耐震設計の一層の合理化に貢献する。

# 道路リスクアセスメントの活用方策に関する調査

## Research on measures to utilise road risk assessment

(研究期間 令和5年度～令和7年度)

道路構造物研究部 道路地震防災研究室  
Road Structures Department  
Earthquake Disaster Management Division

室 長 上仙 靖  
Head JOSEN Yasushi  
研 究 官 乗川 純弥  
Researcher NORIKAWA Junya

Guidelines for Road Risk Assessment against Natural Disasters were tentatively compiled. In this research, we risk assessments were carried out and the results of the assessments were analysed which have suffered from past disasters.

### [研究目的及び経緯]

国土交通省では、発災後、1日以内の緊急車両の通行の確保、1週間以内の一般車両の通行の確保を目標に掲げ、災害に対して強靱な道路ネットワーク整備の加速化・深化を推進している。

国総研では、道路構造物の耐災害性能に着目した道路ネットワークのリスクを評価する手法に関する研究を行い、その成果として「道路リスクアセスメント要領(案)」(以降、「要領(案)」という。)の原案をとりまとめ、令和4年3月に第16回道路技術小委員会<sup>1)</sup>にて審議されたところである。

本研究では、道路網マネジメントにおけるリスク評価の有効な活用方法の検討を行うための基礎資料として、既往被災事例のデータ整理を行い、リスク評価手法に基づく、リスク評価を実施し、その評価結果の分析を行った。本稿ではそれらの成果について報告する。

### [研究内容]

大規模な被災・通行止めが発生した平成28年度～令和5年度の被災事例を対象に要領(案)に基づく道路のリスク区分(表-1)によるリスク評価を行った。また、その評価結果がリスクを捉えられているか分析を行った。本稿では、その中でも多くの道路構造物に被害が発生した主に平成28年(2016年)熊本地震(図-1)を対象に、リスク評価結果及び分析結果について報



図-1 熊本地震における斜面崩落

表-1 道路のリスクの区分

I	通行規制が生じない可能性が高いと認められる。
II	一時的に通行止めになる可能性があるが、一定期間内に一定の規制で通行できる可能性が高いと認められる。
III	通行止めとなる可能性が高いと認められる。

告する。

### [研究成果]

#### (1) 熊本地震時の被災道路とその代替路の比較

平成28年(2016年)熊本地震では、国道57号において大規模な斜面崩落が発生するなど多くの道路構造物が被害を受けて、約4年間にわたる長期通行止めが発生した。地震発生直後から、道路構造物が少なく地震での被害が限定的であった熊本県道339号(以下、「ミルクロード」という。)の緊急整備が行われ、復旧までの迂回路として活用された。この事例を用いて、地震動に対してリスク評価手法の検証を試みた。

道路区間のリスク評価結果を図-2、道路構造物区間のリスク評価結果を図-3に示す。図-2および図-3の評価結果について、リスクI(青色)は、通行規制が生じない可能性が高いこと、リスクII(黄色)は、一時的に通行止めになる可能性もあるが、一定期間内に一定の規制で通行できる可能性が高いこと、リスクIII(赤色)は、通行止めとなる可能性が高いことを示している。また、図-3について、道路区間の線上にあるものは橋梁区間とカルバート区間、線上にないものは切土盛土区間と自然斜面区間であることを示している。なお、ミルクロードに関しては、収集可能であった道路構造物のデータのみで評価しているため、一部の道路構造物によるリスク評価結果となっている。

リスク評価の結果、国道57号では通行障害を生じる可能性が高い(評価結果がリスクIIまたはリスクIII)と評価した道路構造物区間がミルクロードより多い結果となった。

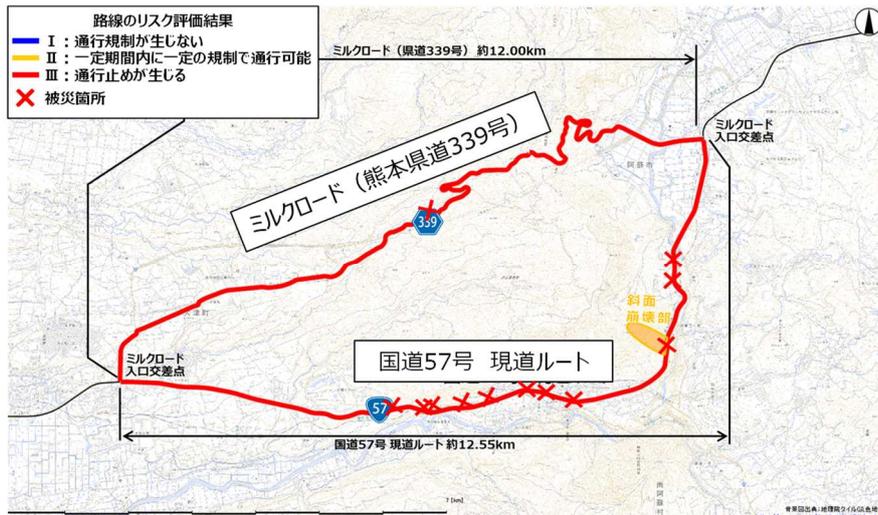


図-2 道路区間のリスク評価結果

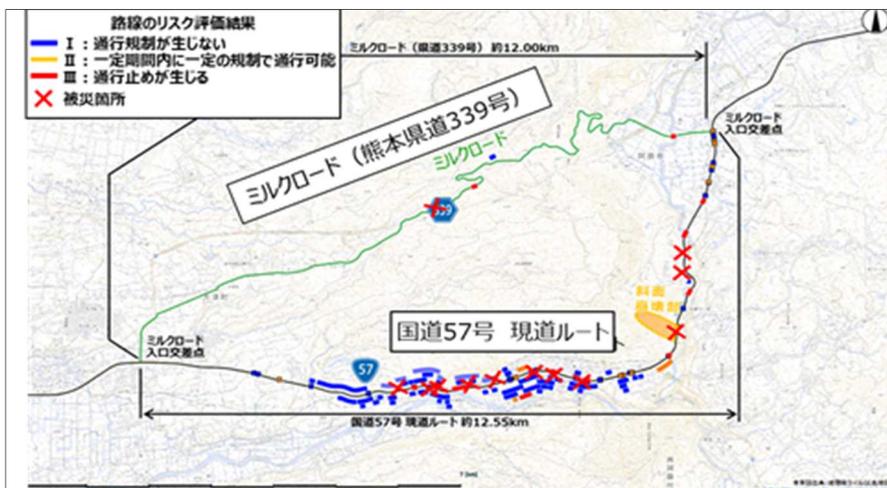


図-3 道路構造物区間のリスク評価結果

ミルクロードは、国道57号より道路構造物が少なく、土工部に険しい地形がない区間が多い特徴があるため、地震後に通行に支障が生じるような大きな被害が道路構造物になかったのに対して、国道57号では大規模な斜面崩落により道路構造物が被害を受け、長期通行止めが発生した。

## (2) リスク評価結果の分析

(1) のリスク評価結果について道路構造物ごとに分析した結果を報告する。

国道57号現道ルートにおける橋梁について、平成8年(1996年)以前の道路橋示方書が適用されているものはリスクⅢと評価しており、実際に被害があった橋梁はこれらの一部であった。評価結果と整合しているわけではないが、平成8年(1996年)以前の道路橋示方書が適用されている橋梁に該当するものをリスクⅢと評価していること、かつ、その中の一部しか被害を受けていないことから、平成8年(1996年)以降の道路橋示方書が適応されている橋梁のリスク評価と耐災

害性能については相対的に評価できているといえる。

一方、盛土や切土については、リスクⅡと評価している区間では被害を受けていないものがあり、リスクⅠと評価している区間で被害が生じているものもある。設計条件に着目した評価結果と実際の被害の有無の対比を個々の構造物に着目して行う場合、被災リスクの適切な評価には不確定性が残る。

このように、個々の構造物に対する被災リスクの評価には限界があるが、今後、構造物のデータを充実させることにより、路線同士のリスクの相対的な比較はある程度可能になると考えている。

## (3) まとめ

本研究では、道路構造物の耐災害性能に着目して要領(案)を用いて、熊本地震を対象にリスク評価の試行結果について報告した。

本分析により、要領(案)に基づくリスク評価は、個々の道路構造物に対して、実際に生じる一つ一つの被災を捉えるもので

はないが、路線単位での比較を行った場合、各道路ネットワークがどの程度リスクを有しているのかの相対的な差を確認できており、路線単位での耐災害性能の傾向をあぶり出す有力な参考情報となり得るものであると考えられる。

## [成果の活用]

本研究の成果は、今後の要領(案)の改定や道路リスクマネジメントに関する施策に関する基礎資料として活用していく予定である。

## [参考文献]

- 1) 国土交通省ウェブサイト、社会資本整備審議会道路分科会第16回道路技術小委員会資料、  
[https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01\\_sg\\_000600.html](https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000600.html)

## 地震時の道路施設変状の即時把握に関する調査

Study on technology for immediate detection of road facility damage by earthquakes

(研究期間 令和4年度～令和5年度)

道路構造物研究部 道路地震防災研究室  
Road Structures Department  
Earthquake Disaster Management Division

室 長 上仙 靖  
Head JOSEN Yasushi  
主任研究官 長屋 和宏  
Senior Researcher NAGAYA Kazuhiro

Various sensors and wireless communication devices are becoming smaller, less costly, and less power consuming due to advances in technology. The purpose of this research is to realize simple and inexpensive detection of road deformation that occurs in the event of a disaster. We organized the road surface deformation detection technology, etc., made a prototype of the road surface deformation detection system, and conducted an operation test.

### 〔研究目的及び経緯〕

頻発化・激甚化する災害に対し、二次災害の防止や災害復旧業務への早期着手を一層推進するため、災害の発生時刻等に依らず、施設の被害状況等を迅速に把握することが求められている。

国総研では、被害状況把握の迅速化を進めるため、無人航空機や衛星、センサ等を活用した道路施設被害の把握に関する調査、実証実験を道路管理者と連携して実施してきている。

本調査では、技術進展により各種センサ及び無線通信機器が小型化、低コスト化、省電力化されていることを踏まえ、災害発生時の道路面に生じる変状の検知を簡便かつ安価に実現することを目的とする。

### 〔研究内容〕

#### (1) 路面変状検知システムの実環境での検証

災害発生時の路面に生じる変状検知を非接触で簡便かつ安価に実現することを目的として、令和4年度に試作し、機器の評価等を行った道路路面変状検知システムを6機制作し、国総研構内の3地点の屋外環境に2機ずつ設置し、60日間程度観測を行い、連続して安定的に観測が行えることの検証、屋外環境での計測の課題抽出等を行った。

#### (2) 道路等に生じた変状の検知手法のとりまとめ

災害により路面等に生じた変状や災害発生後に生じた不安定な状況等の検知・監視を簡便かつ安価に実現する「道路等に生じた変状の検知手法」としてとりま

とめた。とりまとめにあたっては、路面変状検知システムのセンサ部及び伝送部の仕様としての検知可能な対象物、検知のレンジ、分解能等のスペックに加え、適用条件、課題や留意事項、実環境への機器の設置・観測としての通行車両の影響などを踏まえた課題や留意事項等について整理した。

### 〔研究成果〕

#### (1) 路面変状検知システムの実環境での検証

##### 1) 検知システムの製作

実環境での検証用に制作した路面変状検知システム(6機)は、図-1に示すように、屋外の観測地点に設置する「無線センサ」と、屋内に設置する「IoTゲートウェイ」(伝送中継機器)から構成され、無線センサとIoTゲートウェイ間は、LPWA通信(PrivateLoRa)、IoTゲートウェイからはLTEを通じてクラウドサーバにアップを行い、WEBを介して結果を閲覧する構成とした。

##### 2) 路面変状検知システムの設置

制作した路面変状検知システムの無線センサは、2機ずつ国総研構内の3地点に設置した。設置に当たっては、地震災害時に変状の発生が懸念される箇所として、通行車両の影響や気象状況の影響の評価を行えるように箇所の選定を行った。また、IoTゲートウェイとの通信安定性についても配慮して設置箇所を選定した。その結果、センサ1,2は、交通量が多く通行車両の影響評価が行える地点、センサ3,4は、橋台と盛土の境界部での段差発生が懸念される地点、センサ5,6は、橋台と盛土の境界部の段差発生が懸念されるとともに日照変化等が大きいことから気象影響評価が行える地点、に設置した。なお、センサ1,2及びセンサ5,6の設置箇所では、車両の影響評価の検証用にカメラを設置した。

設置にあたっては、既存の照明柱などに添架し、センサ設置のために大がかりな工事等を必要とせず設置する際の留意点等の整理を行った。

##### 3) センサ計測値の特性整理

本システムでは、計測及び無線通信にかかる消費電力を抑制する観点から、センサの計測及び伝送は、1分周期で行うものとした。ただし、現地計測記録からは、特定の時間帯等にそのばらつきが大きくなる現象が見

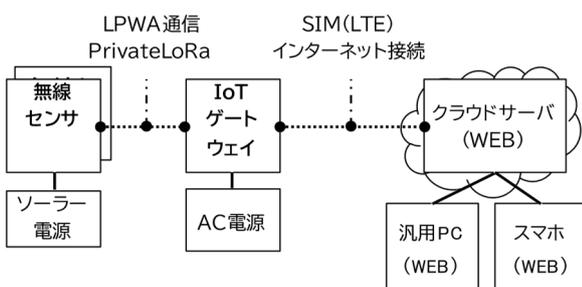


図-1 路面変状検知システムの構成



図-2 路面変状検知システム(無線センサ)の設置状況

による平均値により評価を行うものとした。

4) 通行車両の影響評価  
 道路面への距離計測による変状検知では、車両が通行した際に車両までの距離を計測する可能性があるため、通行車両の影響を除外する必要がある。センサ計測値より著しく小さな値が計測されている時刻の検証用カメラ映像を確認し、通行車両の影響を把握した。この結果、通行車両の影響を受けた観測値は、車両の形状や大きさ、走行位置(横断位置、進行方向位置)によって幅があることから、センサ設置時には、通行車両の影響を明確に判断できるような方向等を考慮して設置

られたため、観測値に影響を及ぼしていると思われる気象状況のデータ(降水量c、視程、相対湿度、蒸気圧、露点温度、日射量、気温、風速、現地気圧)との相関について分析を行った。その結果、降水量が多く視程距離が短い時間帯ではばらつきが大きくなることが明らかとなった(図-3)。これらを踏まえ、10分間の計測値

する必要があることが明らかとなった。  
 (2) 道路等に生じた変状の検知手法のとりまとめ  
 (1)の検討及び評価結果等は表-1の形で「災害による路面変状等の検知システム 導入ガイドライン」としてとりまとめた。

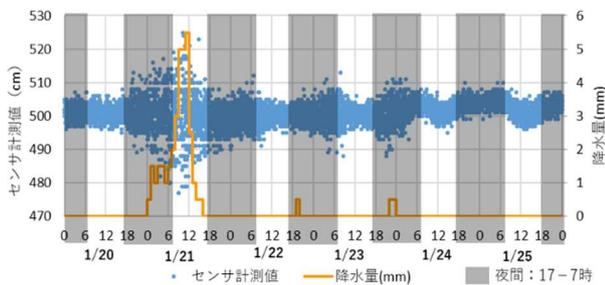


図-3 計測値と降水量データの関係(センサ1)

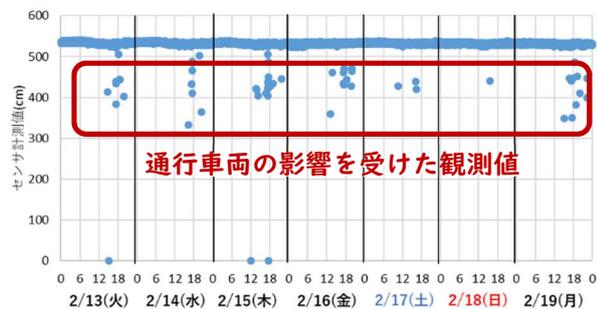


図-4 通行車両の影響評価

表-1 ガイドラインの構成

項目	内容
1.総則	目的、ガイドラインの適用範囲、ガイドラインの構成、用語の定義
2.対象とする路面変状	本ガイドラインで対象とする路面変状の大きさ等について
3.センサ・伝送技術の選定	機器の小型化、低コスト化、省電力化されていることを踏まえ、センサ・伝送技術に求める要件と選定方法
4.路面変状等の検知システム	システム全体構成、システムを構成する無線センサ部、ソーラー電源部、伝送中継器について
5.計測箇所の選定	災害により路面変状の検知を目的とした計測箇所の選定方法
6.設置方法の検討	システムを構成する継器の設置にあたって検討するべき事項
7.機器の設置・調整	システムを構成する継器の設置・調整方法
8.計測・運用	センサ計測値の特性を考慮した計測データの活用方法や、計測データを用いた路面変状(段差)の検知方法

【成果の活用】

本調査で検証した路面の変状覚知手法については、今後、実道路での試験観測を通じ、地震発生時の道路の異常検知手法として活用されることが期待される。

# リモートセンシング技術を活用した 災害時の道路状況把握に関する調査

Study on road disaster investigation utilizing remote sensing technologies

(研究期間 令和4年度～令和7年度)

道路構造物研究部 道路地震防災研究室

Road Structures Department Earthquake Disaster Management Division

室長	上仙 靖	主任研究官	梅原 剛
Head	JOSEN Yasushi	Senior Researcher	UMEBARA Takeshi
交流研究員	徳武 祐斗		
Guest Research Engineer	TOKUTAKE Yuto		

When a large-scale disaster occurs, the damage is enormous, the distribution is wide, and it may take a lot of time to grasp the damage situation. Therefore, for the purpose of quickly grasping the damage situation of road facilities due to earthquakes, heavy rain disasters, etc., an efficient method of grasping the damage situation using remote sensing technology is studied.

## 〔研究目的及び経緯〕

地震や豪雨等による大規模災害が発生すると、被災が甚大となり分布が広範囲にわたる場合や夜間に発生した場合など、被災状況の把握に多大な時間を要することがある。そこで、地震や豪雨災害等による道路施設の被災状況の迅速な把握を目的として、現在用いられているリモートセンシング技術を活用した災害時の調査方法の検討を行っている。

昨年度は、リモートセンシング技術のなかでも悪天候時や昼夜間でも活用可能な SAR 衛星に着目し、熊本地震の SAR 衛星 (ALOS-2 : 分解能 3m の L バンド衛星) データを用いて、一般的な解析手法である一時期強度解析、二時期強度差分析を適用し、道路被災状況調査への活用可能性を調査した。その結果、前処理として実施しているフィルタリング処理の際に、分解能が低下し判読性能の低下を招くことが課題としてあげられ、土砂崩壊等の大規模な被災事象把握以外は困難であった。そこで本年度は判読性能に影響を及ぼすと考えられるノイズ低減処理方法について検討を実施した。

## 〔研究内容〕

SAR 衛星は、電波の一種であるマイクロ波を発射し、地表で反射したマイクロ波をとらえ、地表の形状や性質に関する画像情報を取得するものであることから、多くのノイズが含まれる特性があり、解析時には、図-1 に示すようにノイズ低減のためのフィルタリング処理を実施している。一般的には、複数の画素を平均化してノイズ低減を図るマルチルックと呼ばれる手法 (図-2) が用いられているが、路面亀裂のような比較的小規模な道路被災事象が捉えられない。そこで本検

討では、熊本地震前後の SAR 衛星データを用いて、フィルタ処理方法を変化させ、一時期強度解析、二時期強度差分析を実施し、熊本地震の実際の被災箇所と比較することにより、判読の可否について整理し

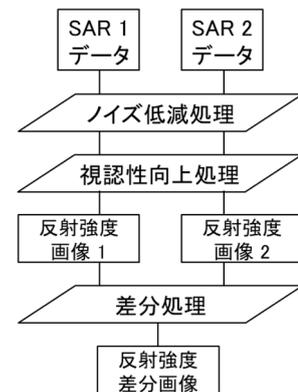


図-1 二時期強度差分析フロー

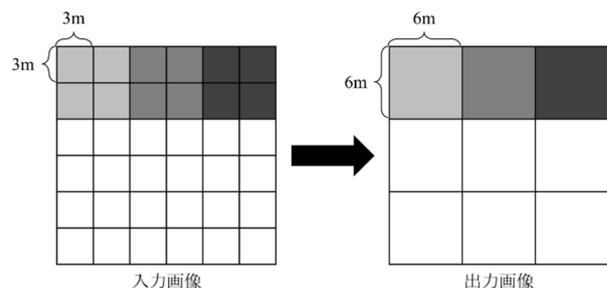


図-2 マルチルックの概念図

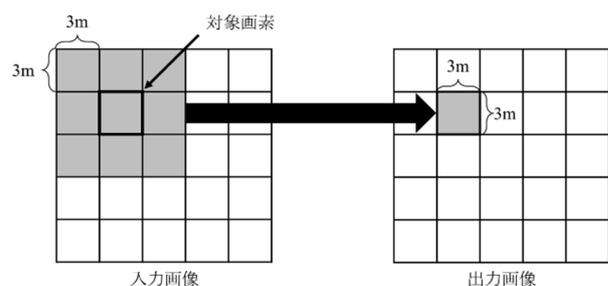


図-3 分解能の低下を伴わないフィルタの概念図

た。強度解析の際に用いるノイズ低減のためのフィルタ処理は、2×2画素のマルチルック(図-2)と分解能の低下を伴わない3×3画素の畳み込みフィルタ(図-3)の2ケースを実施した。なお、畳み込み処理は、対象画素とその周囲の画素値に重み付け係数をかけて合計し、新たな画素値として置き換えるものである。

またその上で、視認性向上のためのMedianフィルタ(対象画素の値をウィンドウ内の中央値とする処理)、Leeフィルタ(対象画素の値をウィンドウ内の平均値とする処理)の2ケースを実施した。

**[研究成果]**

熊本地震前後のSAR衛星データを用いて、フィルタリング処理方法を変え、強度解析を実施した。一例として、二時期反射強度解析で判読できた土砂崩壊箇所に関し、フィルタリング処理方法を変化させた解析結果を図-4に示す。なお、二時期強度差分解析では、本震前後で変化がない場合は白または黒色を示し、本震後に強度が弱くなった場合は赤色、本震後に強度が強くなった場合は水色を示す。図中の矢印が土砂崩壊箇所を示している。

一般に路面からの反射強度は弱く、二時期強度差分画像では黒く表示されるが、土砂崩壊に伴い形状が複雑に変化したことで、反射強度が強くなり水色で表示されたことがわかる。またフィルタ処理なしのケース

と処理を施したケースを比較すると、フィルタ処理を実施することでSAR特有のスペckルノイズ(斑点状のノイズ)が低減され、判読精度の向上が見込まれるものの、本検討で適用したフィルタの種類による判読結果の違いは確認できなかった。これはSAR画像データが最小単位である画素(ピクセル)から構成され、ピクセルに格納された数値によって可視化処理がなされ1枚の画像として表現されるものであることから、フィルタ処理を実施してもスペckルノイズが完全に除去されず、被災規模が小さい事象についてはノイズ等との区別ができなかったものと考えられる。

今回の結果からフィルタ処理は必要不可欠といえるものの、フィルタ処理を施しても既存衛星ALOS-2データでは、数百m程度の土砂災害の状況を把握することが限界で、道路亀裂や段差等の道路被災事象の把握は困難であることがわかった。今後は活用が期待されている分解能0.5mのXバンド小型衛星画像に対する畳み込みフィルタの有効性評価についても検討していく予定である。

**[成果の活用]**

本成果を用いて衛星画像を用いた道路被災状況調査の活用が可能な被災事象・規模を整理するとともに、各被災事象に対する最適な解析手法を整理し、標準仕様(案)として取りまとめる予定である。

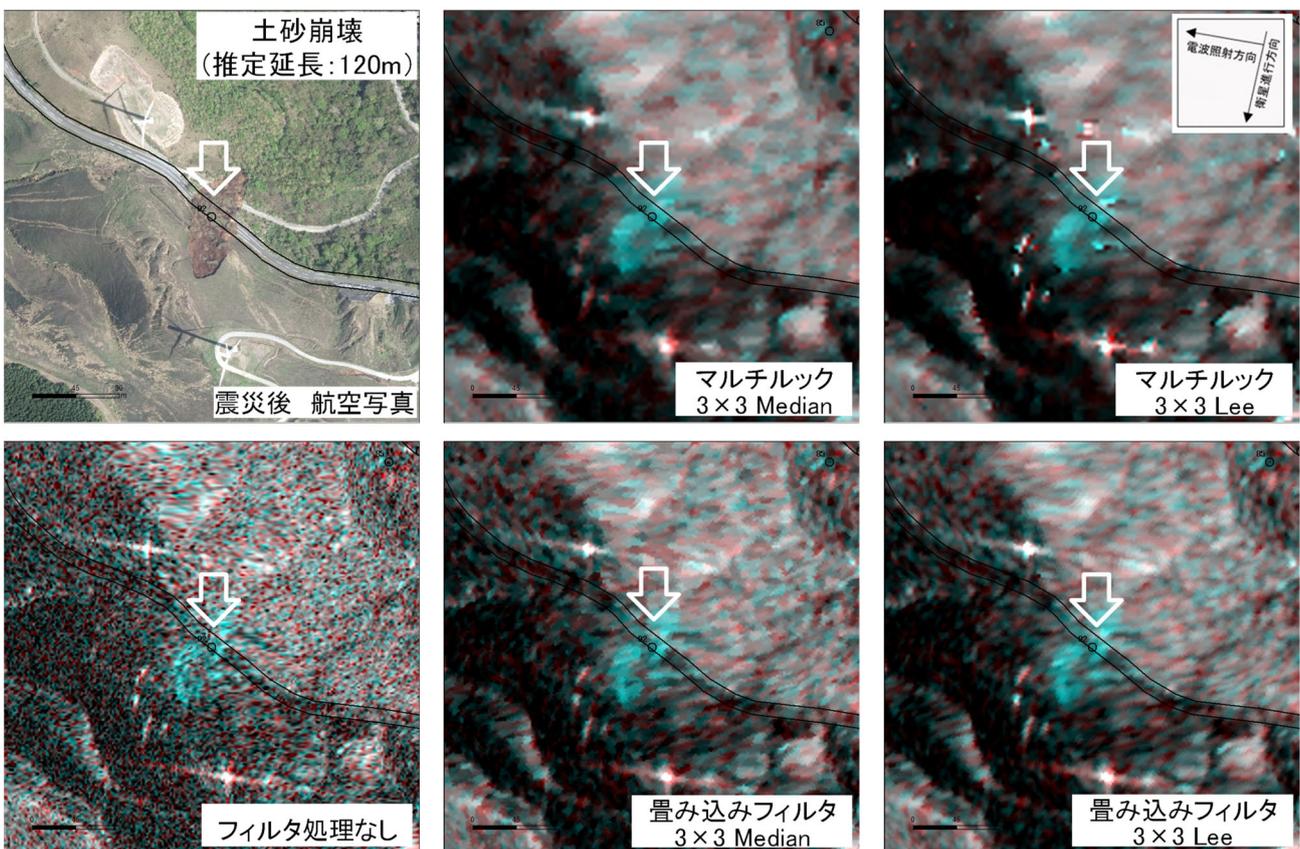


図-4 フィルタリング性能の比較(二時期強度差分解析の一例)