

# 震後調査における新技術の活用 ～早期機能回復を目指して～

国立研究開発法人 土木研究所  
構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)  
上席研究員 大住 道生

1. 震後調査の実際と課題
2. 新技術に求められること
3. 事前の能力評価と新技術の活用事例

# 地震により被災した橋梁の例1:どこに損傷があるか？



答えは講演でお示しします



# 地震により被災した橋梁の例2: どこに損傷があるか？



答えは講演でお示しします

# 画像から損傷を見つけることが難しい理由

## 地震時損傷は多種多様

→地震は稀に生じ損傷形態も多様。そのためAI用の教師データ等も少ない。

加えて、損傷の発見の仕方にも近接目視点検と異なる難点が存在。

人による近接目視点検

変状を発見



画像を撮影

人が変状を発見し、  
画像として記録する。  
→比較的 確実



近接目視点検と順番が逆

画像を撮影



変状を発見

撮影した画像から変  
状を発見する必要

画像撮影技術による点検



調査結果の確実  
さをどのように  
保証するか？  
【課題】



# 追加で点群計測を行った事例

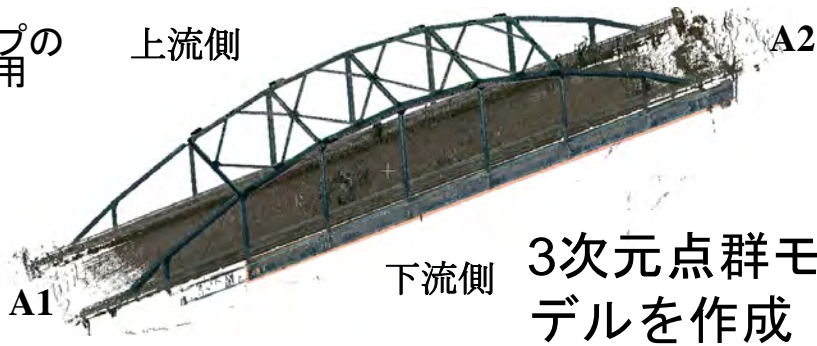
点群計測により上部構造の数ミリのゆがみを検出。

目視点検でもわからない変状は更に見つけるのが難しい。

※ ゆがみの原因が地震によるものか、施工時からゆがんでいたかは不明

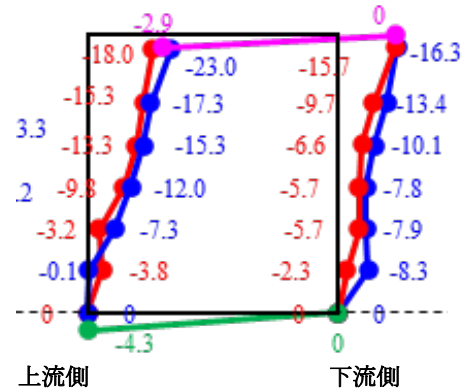
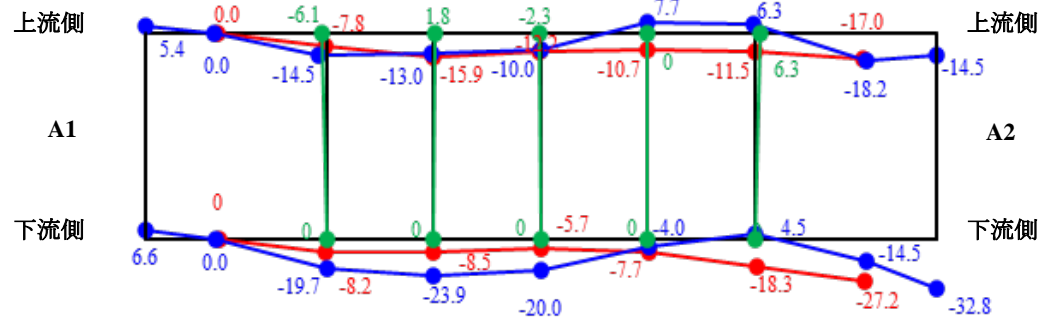


ハンディタイプのレーザーを使用



3次元点群モデルを作成

【凡例】  
● 上弦材内側面 ● 吊材下端 ● 橋門構(支材)



単位mm



# 研究の背景と目的

大規模地震発生後の道路橋の震災復旧では以下の制約条件が顕在化する中で、**迅速な交通開放と確実な措置を両立することが社会的に要請**

- 1) **時間的制約**（例えば、人命救助の壁：72時間）
- 2) **機材や資材の制約**（例えば、橋梁点検車や足場が無い条件での点検、復旧のための資材の不足）
- 3) **人材の制約**（例えば、行政職員や点検技能者が十分に参集できない状況、技術者数の不足）
- 4) **ライフラインやインフラの途絶**（例えば、電気・通信・水等の供給の途絶、道路交通網の途絶）等

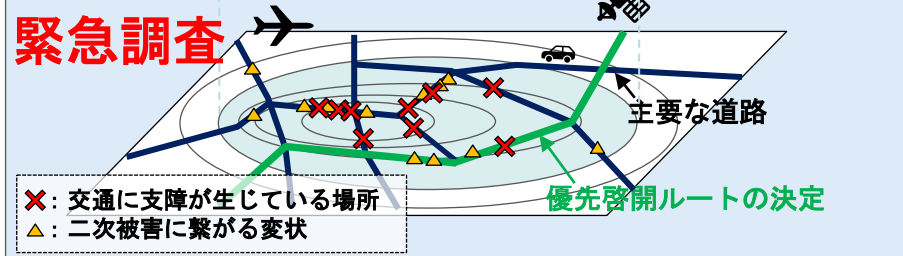
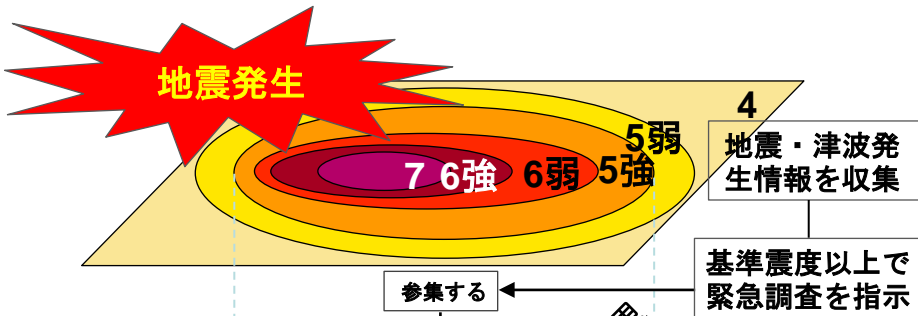
実際に熊本地震では震度6弱以上を観測した地域に**約15,700橋**の道路橋が存在<sup>1)</sup>



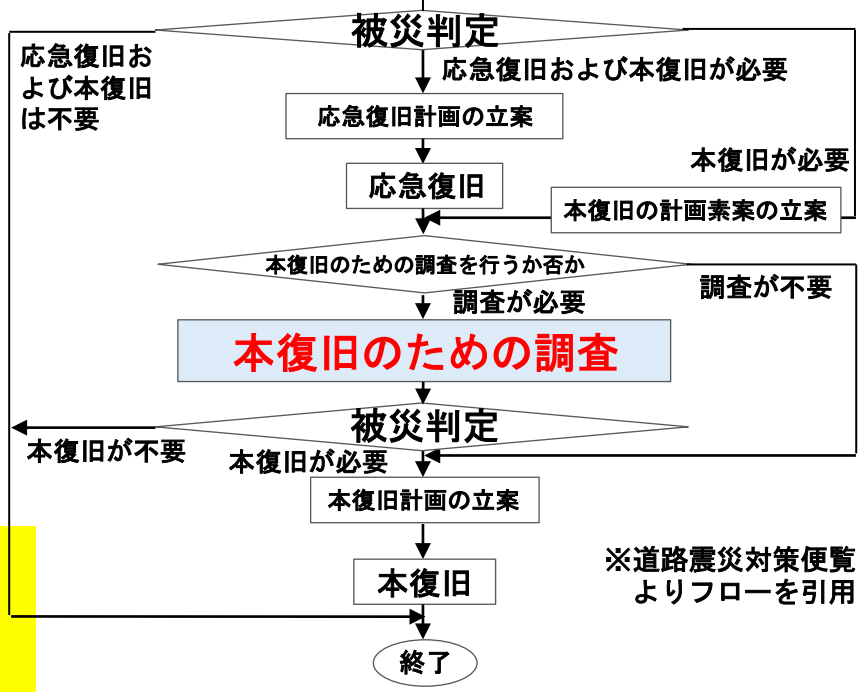
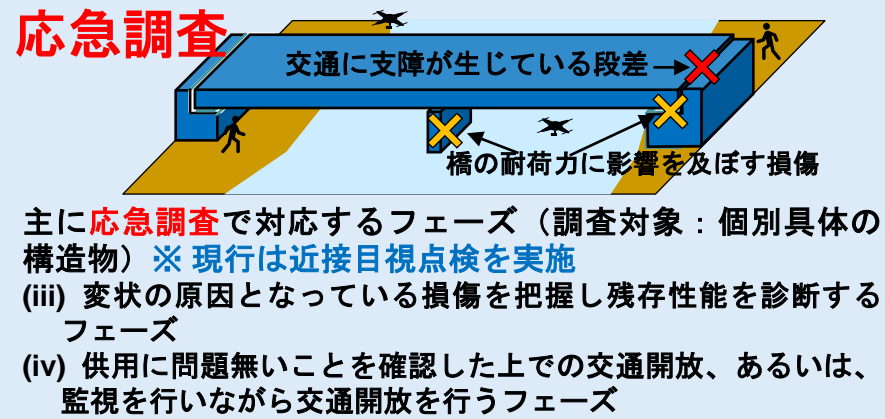
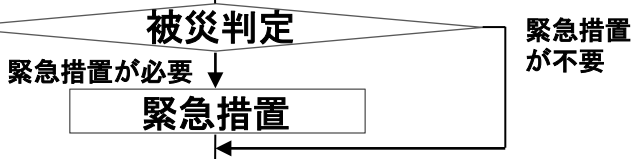
膨大な数の道路橋に対して、復旧を迅速に確実に行うことができる方策が必要  
今回は**震後調査に新技術を活用**し、それを実現するための研究を紹介

# 震災復旧の流れ

※道路管理者によって多少の違いがある



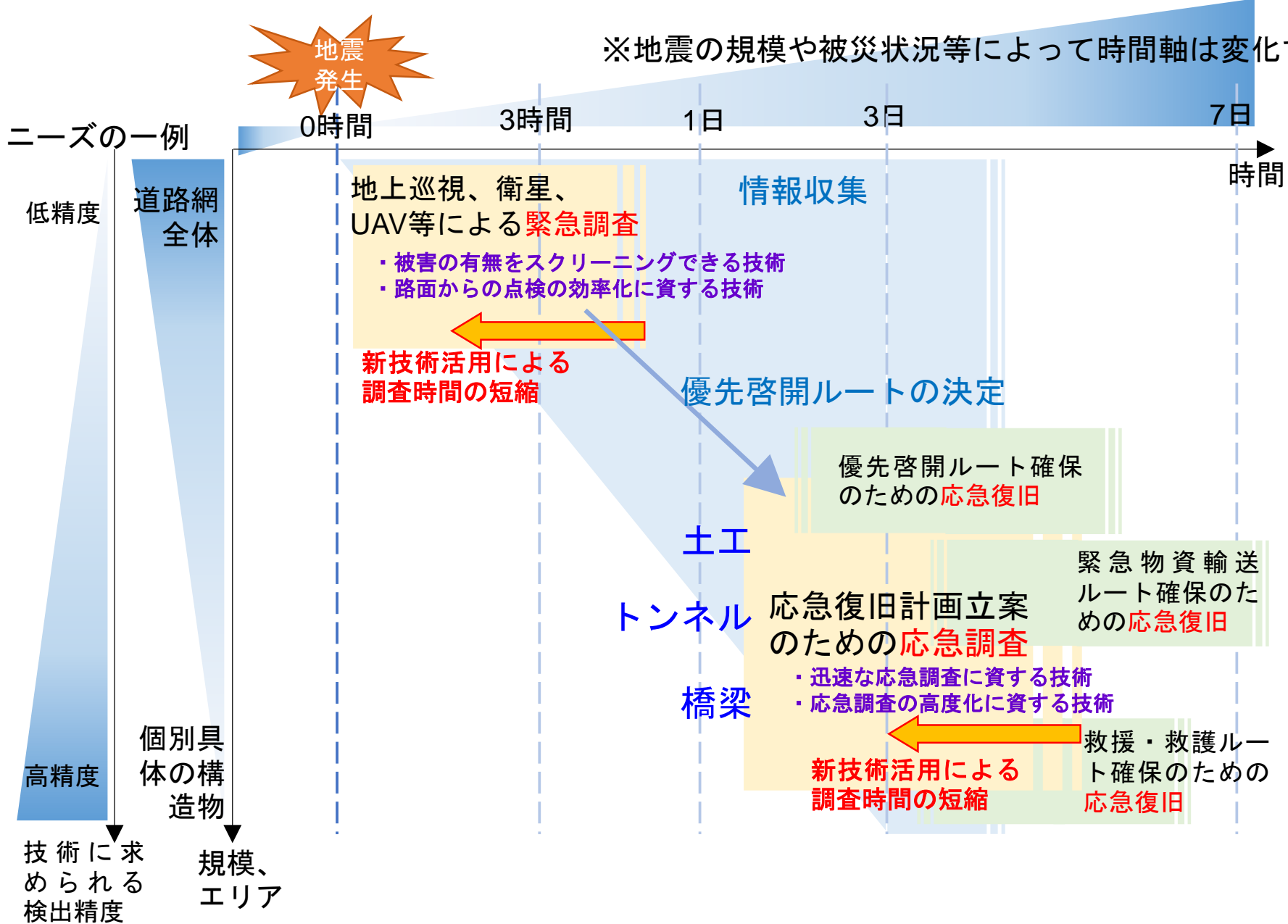
主に**緊急調査**で対応するフェーズ（調査対象：道路網）  
 ※ 現行は車上からの目視や徒歩移動による目視点検を実施  
 (i) 道路網の寸断や、段差や線形不良により通行に支障が生じている可能性がある場所を把握するフェーズ  
 (ii) 二次被害に繋がる変状を把握するフェーズ



※道路震災対策便覧よりフローを引用

迅速な点検を行い、通行機能（走行性と耐荷力）を確認し、それが確保されている、または措置が必要であることを判断する必要。或いは判断のための情報が不足していればそのための追加調査も必要。

# フェーズ毎のニーズの変化のイメージ



# 震災復旧の要点①: 措置に必要な情報

**これらの判断に必要な情報は何か？**

フェーズによって異なる

**地震発生**

**緊急調査**

**緊急措置**

**応急調査**

**応急復旧**

【取り得る措置の例】  
 通行の禁止または制限、  
 被害の拡大防止措置

【取り得る措置の例】  
 通行止め，応急的な交通機能の確保（待受け，仮受け，補強等），二次被害防止，仮橋や応急組立橋，段差解消，監視など



**通行止め**



**段差解消**



**応急組立橋**



**仮受け（被害の拡大防止）**



**待受け**



**地震発生**

**措置に必要な情報 = 調査で収集するべき情報**

人材・資材・機材に限られる中でどのような調査が可能か？

**緊急調査**

- 【従来の調査方法の例】
- ・ 往路点検（**パトロールカー車内からの遠望目視**）
- ・ 復路点検（異常が確認された現場を**徒歩移動による目視**）



**緊急措置**

**応急調査**

- 【従来の調査方法の例】
- 近接目視が望ましいが大規模地震時には足場の確保が困難な現場も多く、取り得る手段が他に無い場合は**地上からの目視**が行われる場合もある**



**応急復旧**



道路震災対策便覧より引用

**道路橋には、迅速な交通開放と安全性の両立が必要**

→ 震後調査にも迅速さと確実さの両立が必要

## ● 調査の迅速さ

例えば、**橋梁点検車**や**足場が無い状況での迅速な点検**

例えば、**道路網が途絶した状況での迅速な点検**

例えば、**電気や通信が途絶した状況での迅速な点検**

## ● 調査の確実さ

例えば、**致命的な損傷・二次被害につながる損傷を見逃さない確実な点検**

例えば、**人材の不足、道路網の途絶、電気や通信が途絶した状況等における確実な点検**

本資料では、令和6年能登半島地震での様々な新技術の**活用事例**を紹介。



(II-1) 自撮り棒を橋面から降ろし、撮影



(II-2) 自撮り棒を地上から持ち上げ、撮影



(III-1) 操縦者が橋面にいる状況でUAVを操縦



(III-2) 操縦者が地上にいる状況でUAVを操縦



(I)近接目視点検

能登半島地震調査において、  
長さ5 mの自撮り棒とUAVを用いた  
震後調査を試行

(近接可能な箇所は近接目視点検も実施)



## 地震時損傷は多種多様

→地震は稀に生じ損傷形態も多様。そのためAI用の教師データ等も少ない。

加えて、損傷の発見の仕方にも近接目視点検と異なる難点が存在。

人による近接目視点検

変状を発見



画像を撮影

人が変状を発見し、  
画像として記録する。  
→比較的 确实



近接目視点検と順番が逆

画像を撮影



変状を発見

撮影した画像から変  
状を発見する必要

画像撮影技術による点検

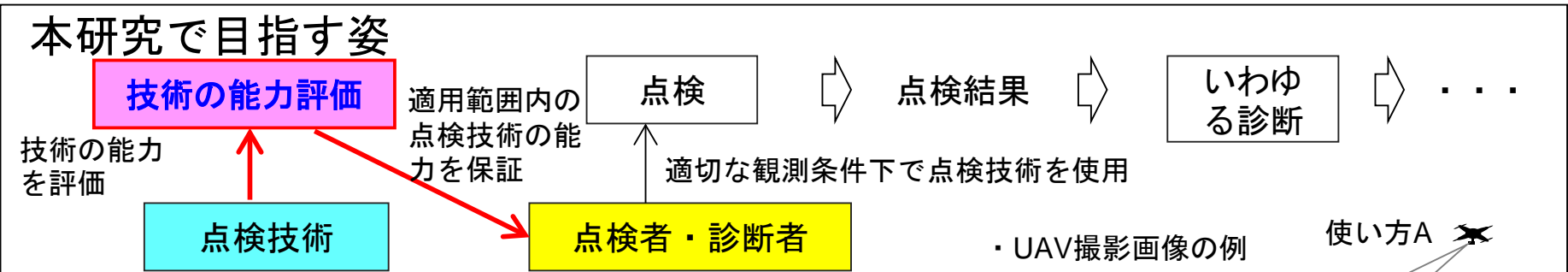
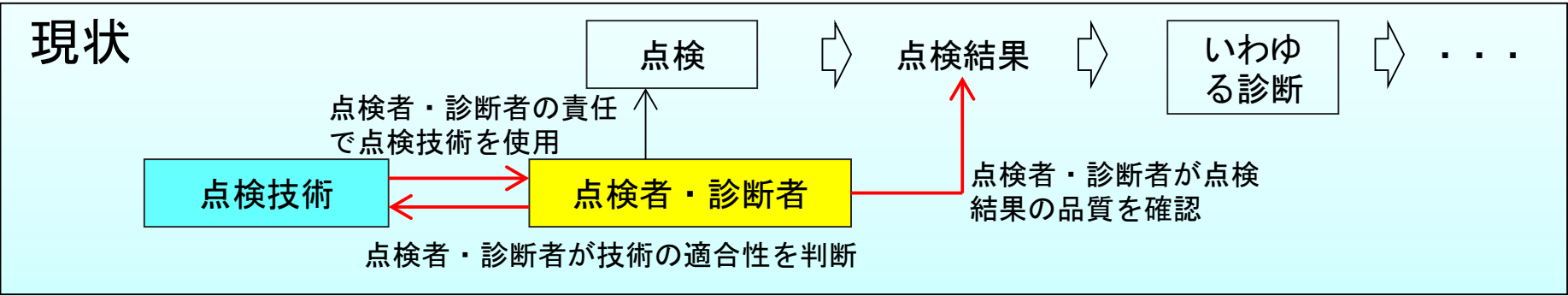


調査結果の确实  
さをどのように  
保証するか？

【課題】

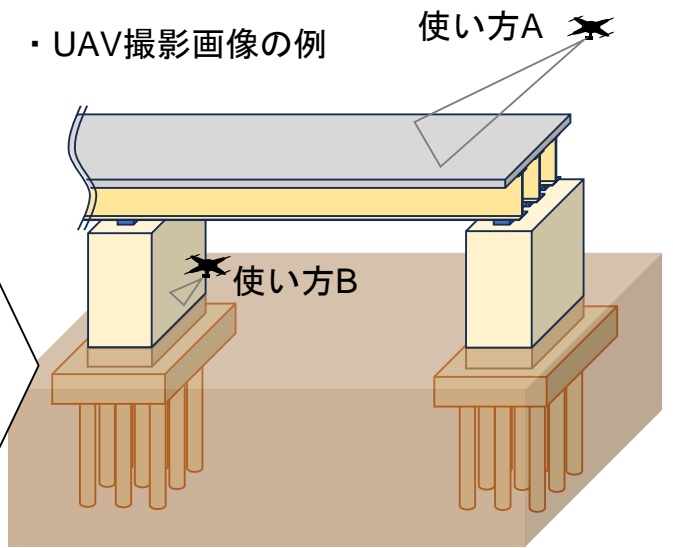


# 事前の技術の能力評価により目指す姿の例



適合性評価で観測条件ごとの点検結果の品質を保証

<b>使い方Aの観測条件</b> ・ 照度 10000 Lux以上 ・ 撮影距離 10m	・ ●mmの亀裂検知 <b>不可</b> ・ ●cmの変形検知 <b>可能</b> ・ ●°の変形検知 <b>不可</b> ...
<b>使い方Bの観測条件</b> ・ 照度 約400 Lux ・ 撮影距離 3m	・ ●mmの亀裂検知 <b>可能</b> ・ ●cmの変形検知 <b>可能</b> ・ ●°の変形検知 <b>可能</b> ...

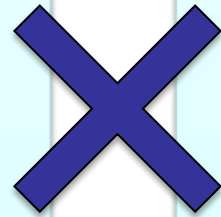


## 足場が無い状況での迅速な調査方法例



(II-1) 自撮り棒を橋面から降ろし、撮影

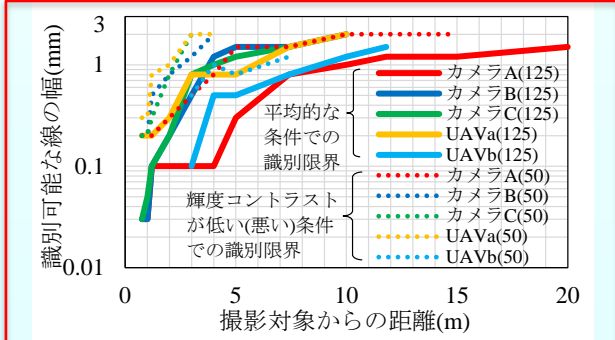
(II-2) 自撮り棒を地上から持ち上げ、撮影



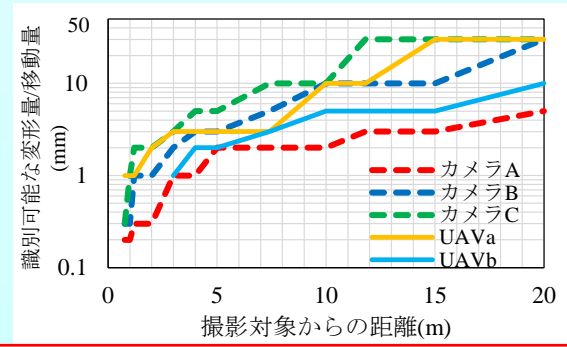
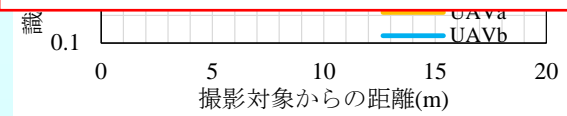
(III-1) 操縦者が橋面にいる状況でUAVを操縦

(III-2) 操縦者が地上にいる状況でUAVを操縦

## 事前の技術の能力評価により調査の確実さを補完した例



評価方法の例を次ページより紹介。

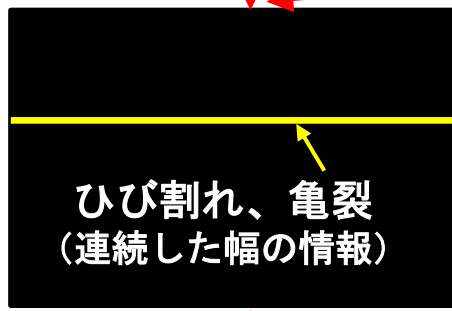


# 画像撮影技術の能力評価方法の一例

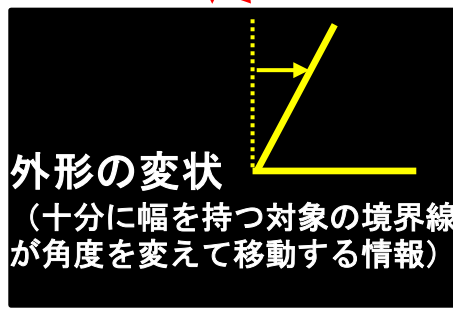
## (1) 多種多様な地震時損傷を幾何学的特徴で分類



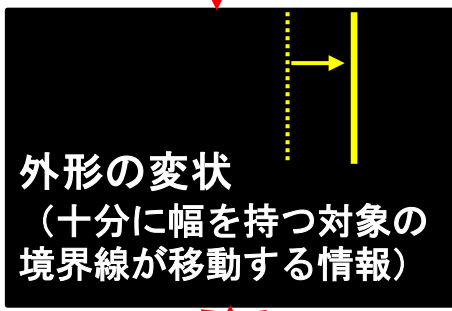
ひび割れ、亀裂  
(連続した幅の情報)



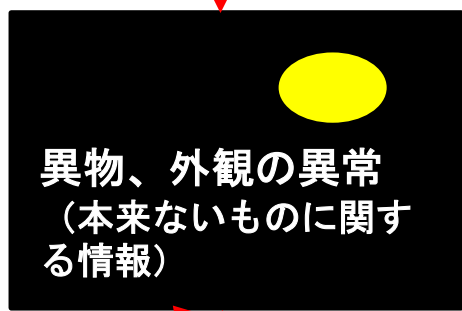
外形の変状  
(十分に幅を持つ対象の境界線が角度を変えて移動する情報)



外形の変状  
(十分に幅を持つ対象の境界線が移動する情報)



異物、外観の異常  
(本来ないものに関する情報)




# 画像撮影技術の能力評価方法の一例

## (2) 幾何学的特徴の大小を模擬した撮影対象を作成

分類

### 地震時損傷の例

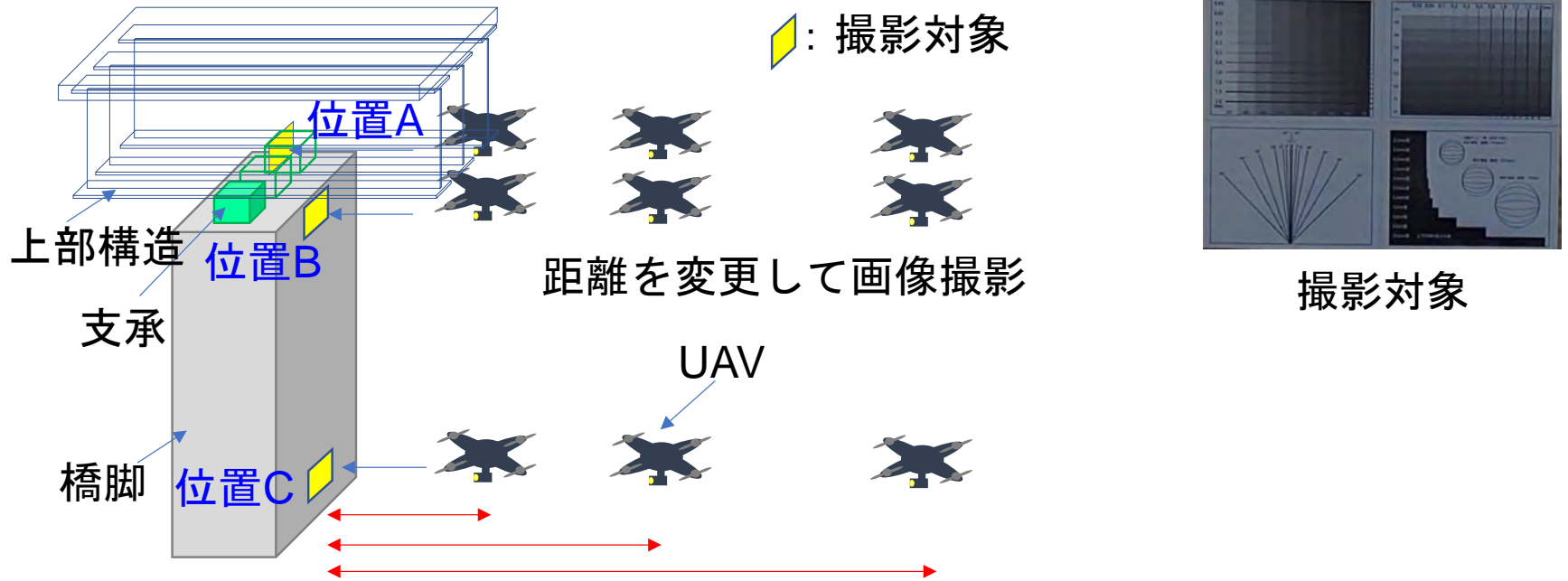
### 幾何学的特徴の分類例

- ひび割れ、亀裂 (連続した幅の情報)
- 外形の変状 (十分に幅を持つ対象の境界線が角度を変えて移動する情報)
- 外形の変状 (十分に幅を持つ対象の境界線が移動する情報)
- 異物、外観の異常 (本来ないものに関する情報)



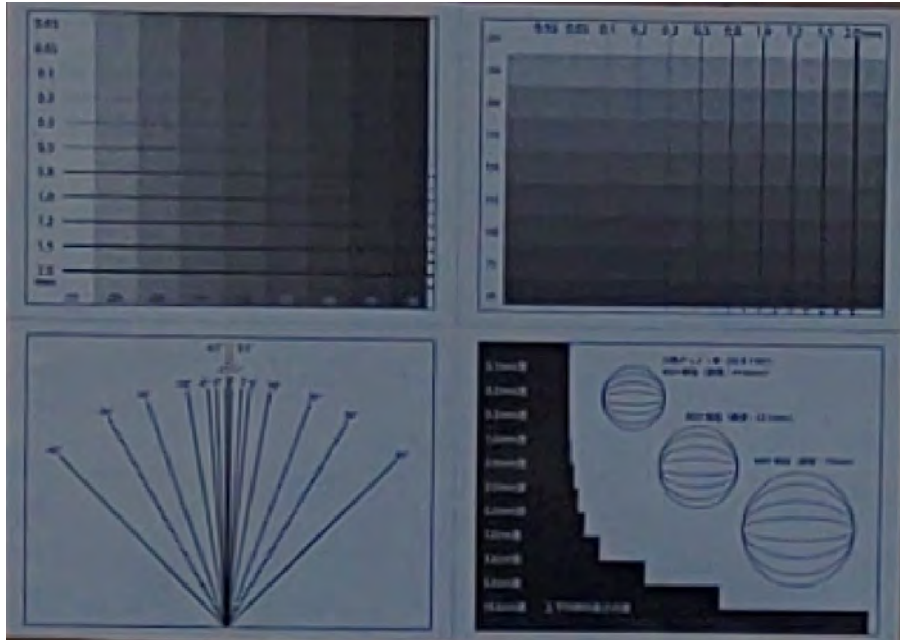
# 画像撮影技術の能力評価方法の一例

(3) 5種類のカメラを用いて、画像撮影距離や照度を変更しつつ画像を撮影し幾何学的特徴の視認性を確認

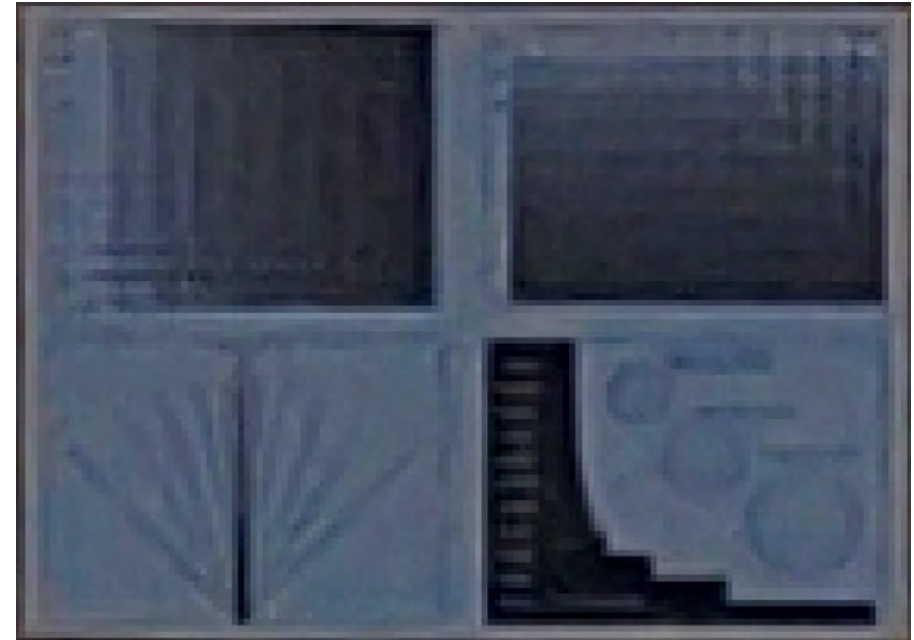


	UAVa	UAVb	カメラA	カメラB	カメラC
センサーサイズ	1/2.3 型	1 型	フルサイズ	1 型	非公開
35 mm換算の 焦点距離	20mm	24mm	24mm	24mm	28 mm
画素数	4,056 × 3,040	5,472 × 3,648	9,504 × 6,336	5,472 × 3,648	4,032 × 3,024

# 撮影距離別の視認性の例



3m離れた位置からの撮影写真

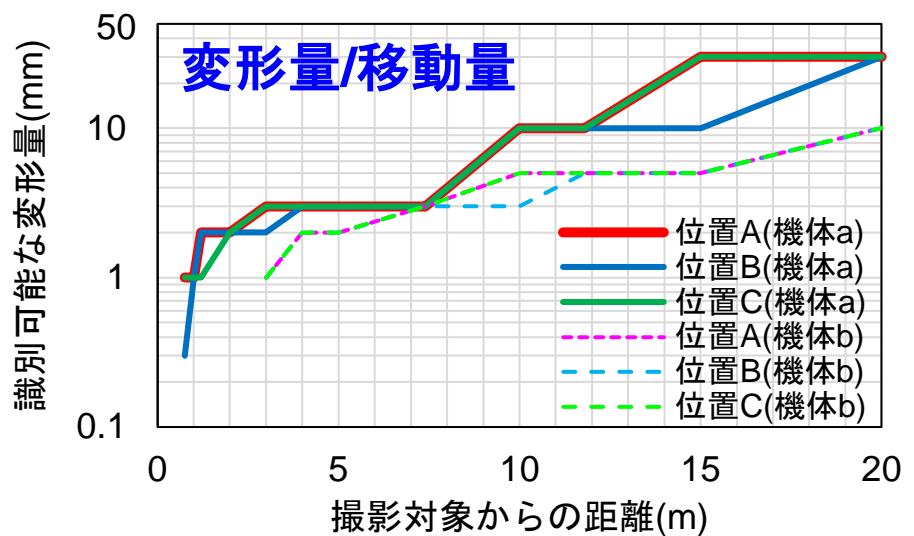
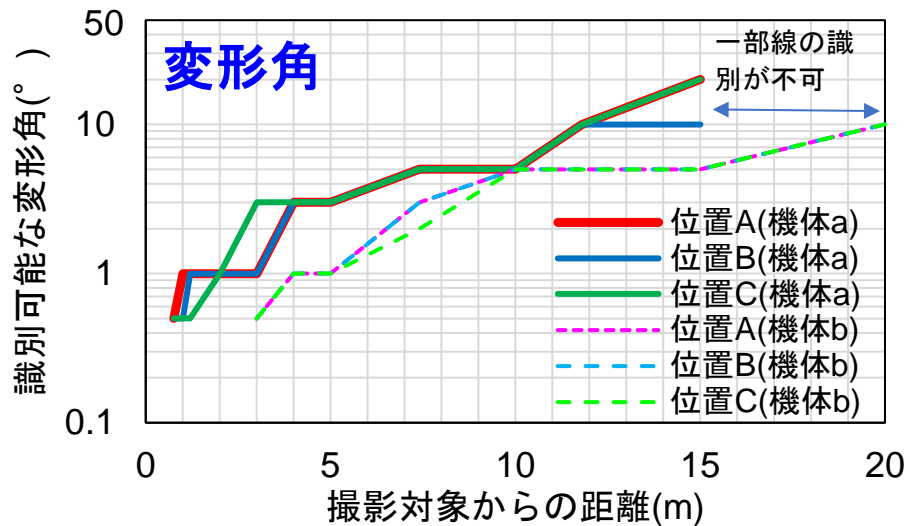
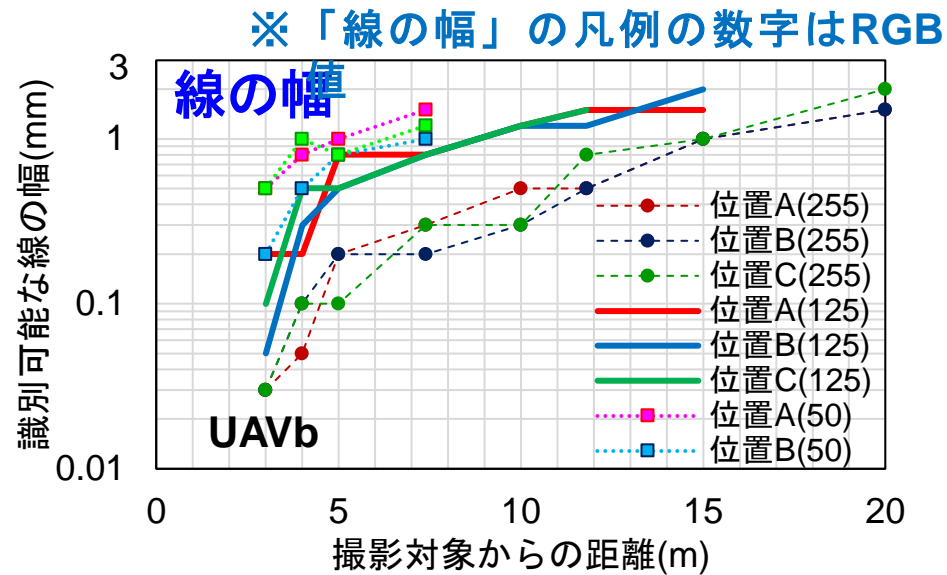
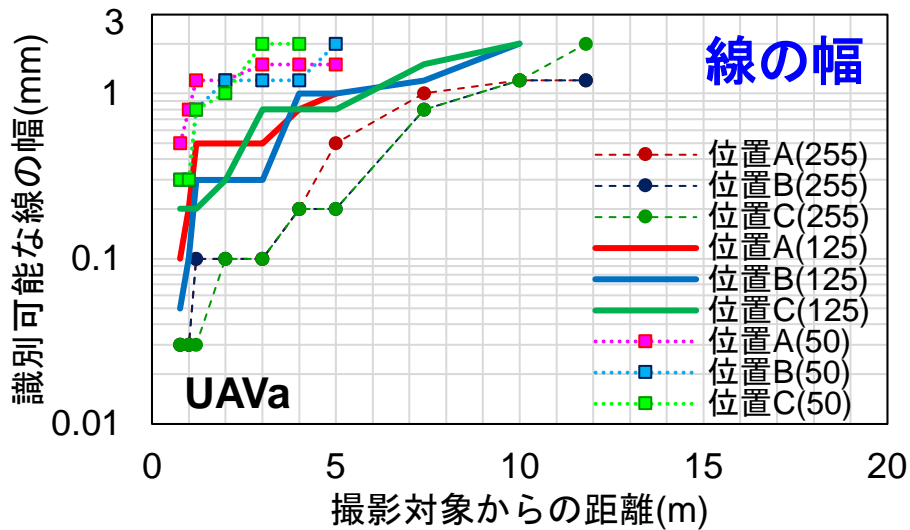


10m離れた位置からの撮影写真

(UAVaの例)

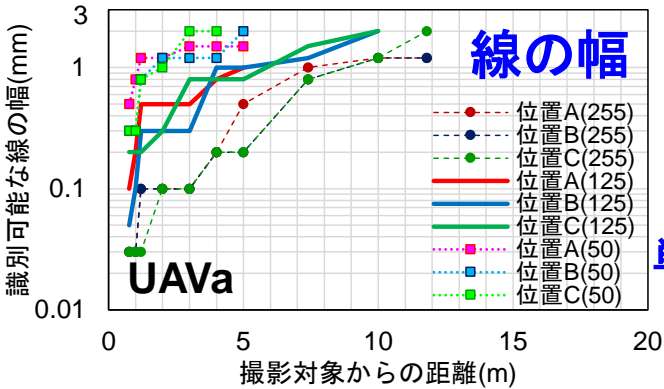
※ 晴れた日の支承部や橋脚位置における、実験時の照度375~2,600 luxの範囲では視認性が変わらないことを別途確認している。

# 撮影距離と識別可能な幾何学的特徴の関係

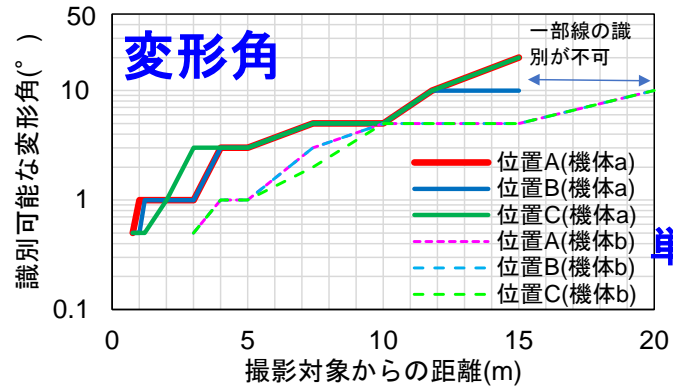
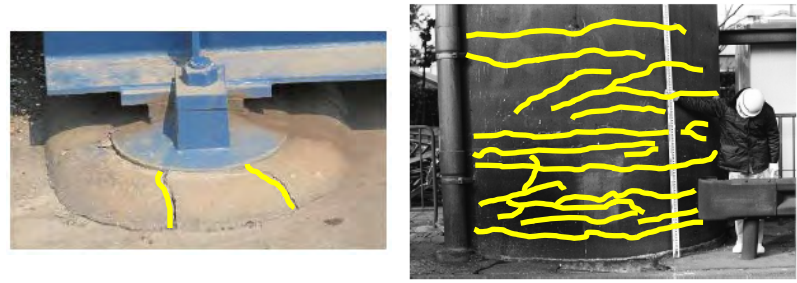


例えば10m離れた位置からは、2mm以上の線の幅、5° 以上の変形角、10mm以上の変形量を識別できる見込みがある

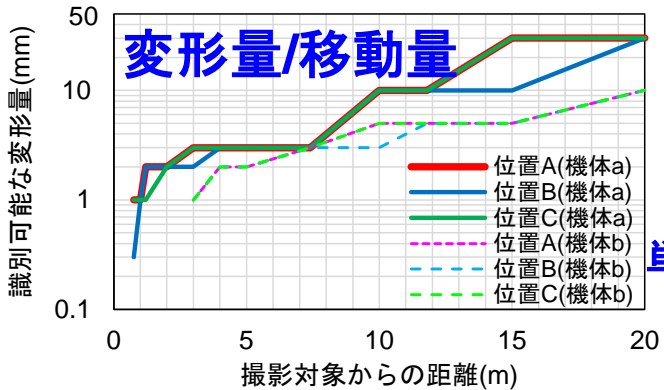
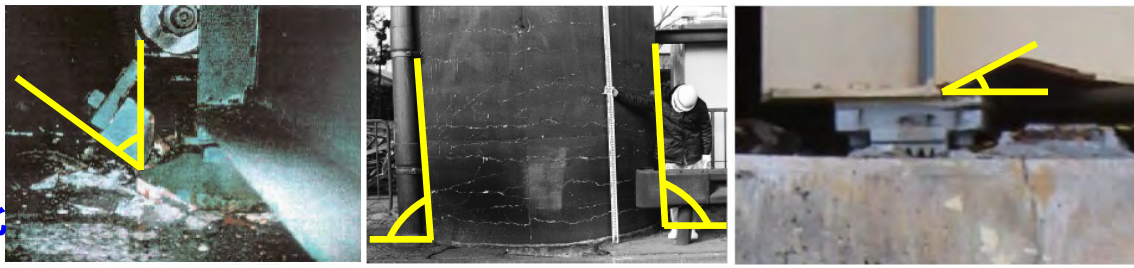
# 撮影距離と識別可能な幾何学的特徴の関係



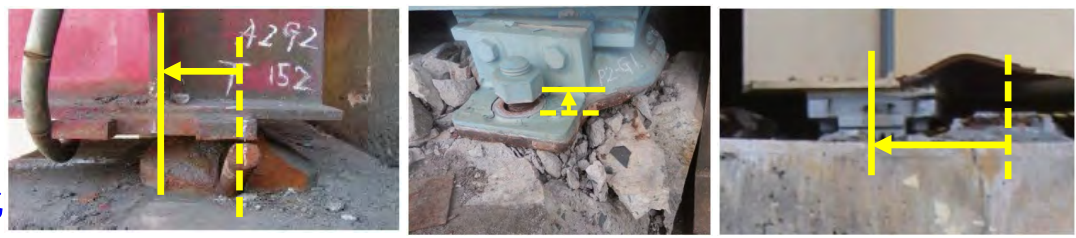
単純化



単純化



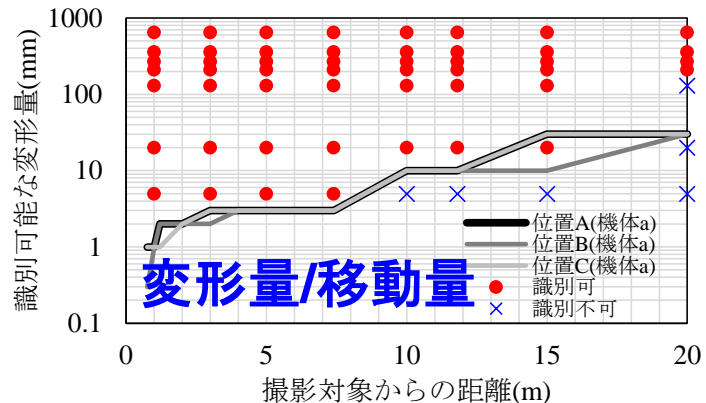
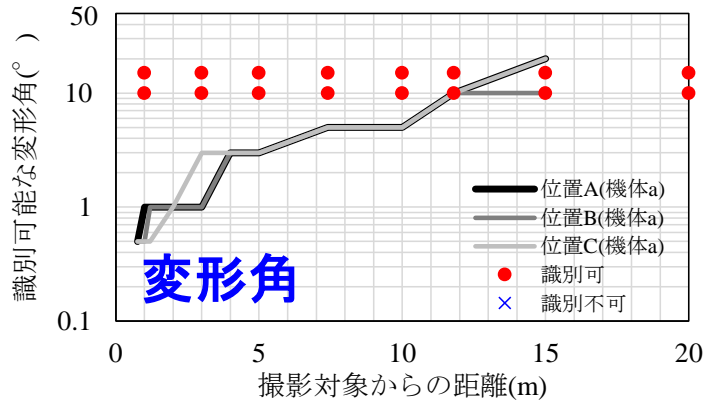
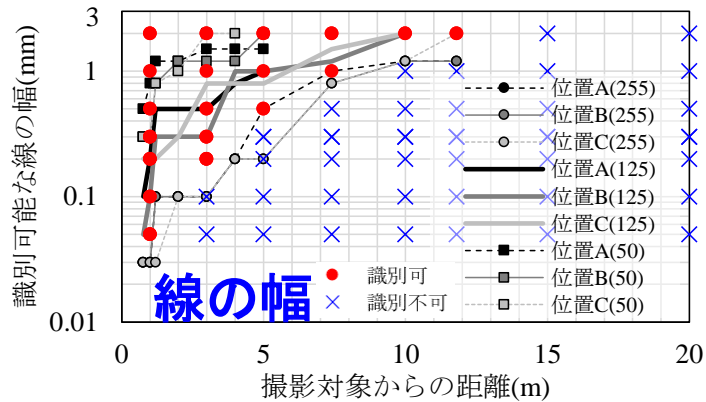
単純化



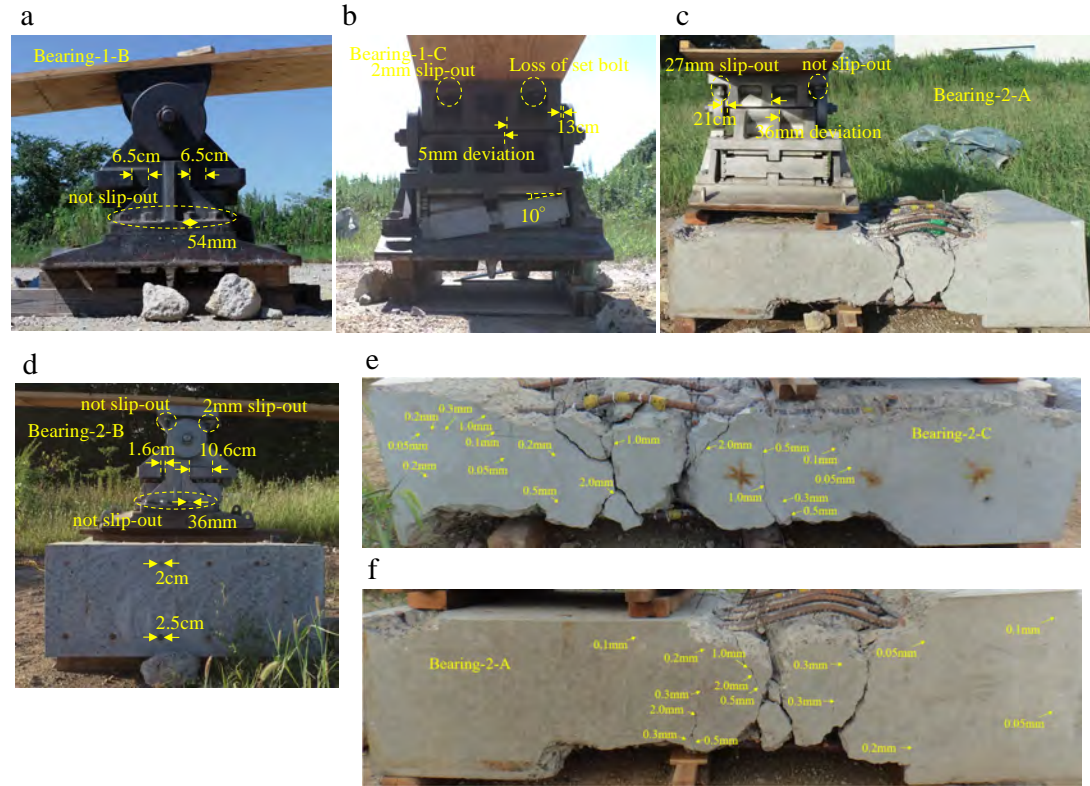
損傷種類は様々で、損傷ごとに点検時に収集したい損傷の大きさは異なるため、点検指標を単純化



# 実際の損傷でも同様の実験を行い検証



幾何学的特徴で確認された視認性は、実際の損傷でも同様の傾向を示すことを確認。



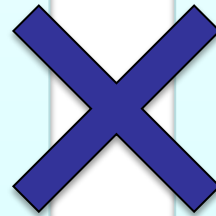
実際の損傷に対しても距離を変えて画像撮影を行い、視認性を確認

## 足場が無い状況での迅速な調査方法例



(II-1) 自撮り棒を橋面から降ろし、撮影

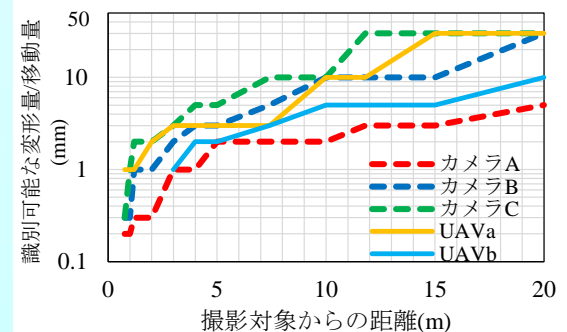
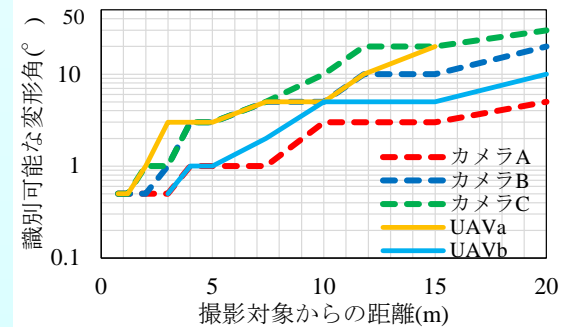
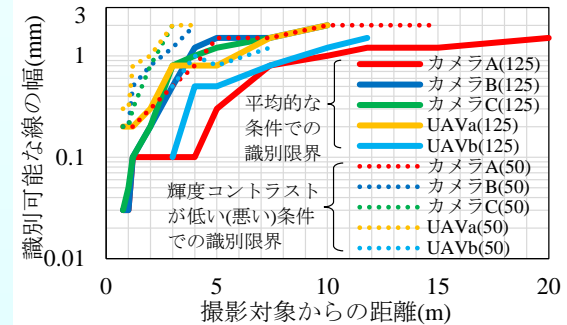
(II-2) 自撮り棒を地上から持ち上げ、撮影



(III-1) 操縦者が橋面にいる状況でUAVを操縦

(III-2) 操縦者が地上にいる状況でUAVを操縦

## 事前の技術の能力評価により調査の確実さを補完した例





# 技術に求められる損傷検知の水準は？

損傷種や部材寸法により様々であり一概に決定できない（今後の課題）

## 【き裂幅／ひび割れ幅】

小



大

## 【変形角】

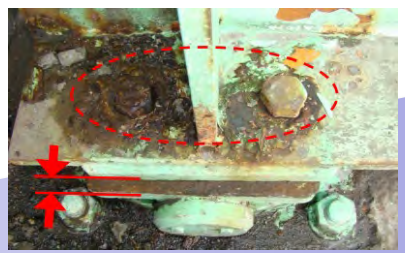
小



大

## 【変形量／移動量】

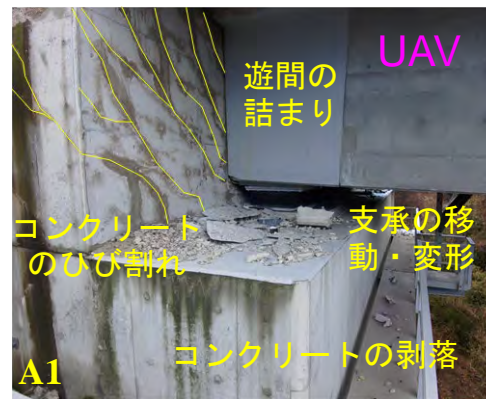
小



大

## ポイント：

- ・ 規模が大きい地盤変状の概況把握にUAVを使用
- ・ ラーメン隅角部のひび割れ状態をUAVと自撮り棒で撮影  
→ 事前の能力評価により、2mの距離から少なくとも0.3 mmより幅が大きいひび割れが無いことを確認





# B橋の調査事例

ポイント：

- ・山奥に位置しており、桁下にアクセスするための人道・獣道すら無い現場条件。

- 1) 操縦者が桁下に移動できず目視内飛行が出来なかった。
- 2) 桁高が非常に高い形式の上部構造であったため5 mの自撮り棒では橋面から支承部を確認することが出来なかった。



# C橋の調査事例

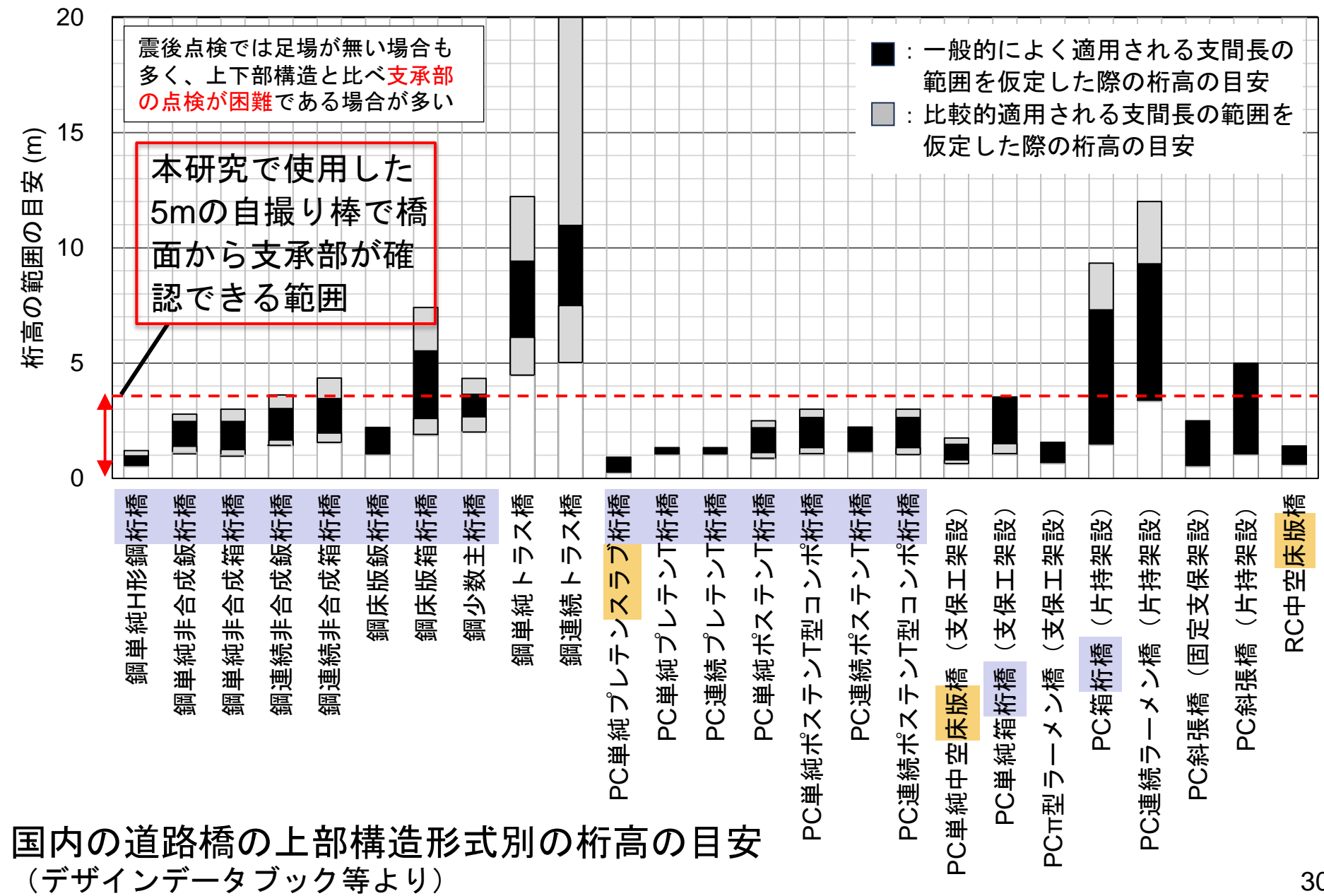
## ポイント：

- ・ 画像撮影技術で収集できる情報は全て近接目視点検・遠望目視点検での情報収集が可能であった。
- ・ 支承受付ボルトが破断し、上部構造が移動し、橋台パラペットと下弦材が衝突。上部構造に残留応力が生じている可能性。しかし、残留応力等については多くの場合は近接目視点検でもわからない場合が多い。
- ・ 例えば基礎の地中内の変状も同じであるが、**点検で取得できる情報と診断等の技術的な判断に必要な情報には乖離があり情報の非対称性が存在。**





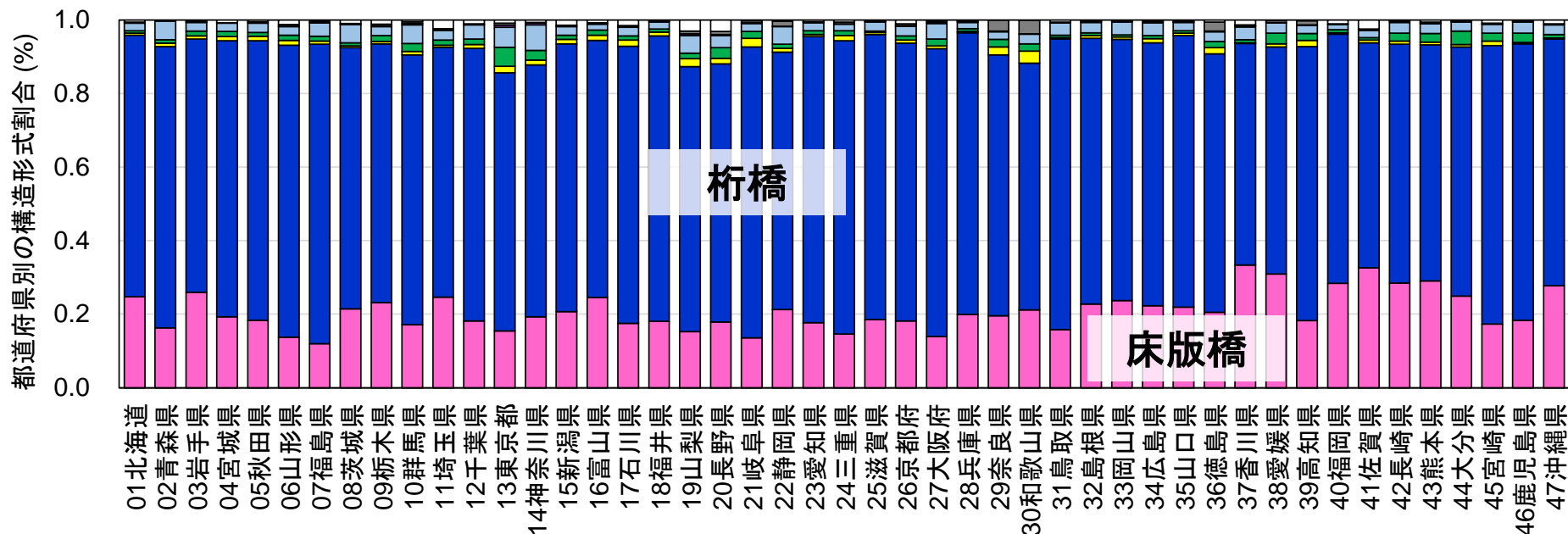
# 橋面から5mの自撮り棒で支承部が確認できる構造



国内の道路橋の上部構造形式別の桁高の目安 (デザインデータブック等より)

# 点検時のニーズの例、類型の例

都道府県別の上部構造形式割合（国土交通省、道路統計年報2022より）



- 床版橋
- 桁橋
- ラーメン橋
- 斜張橋
- トラス橋
- アーチ橋
- 吊橋
- カルバート

✓ 震後の限られた時間で、特徴が異なる膨大な数の橋梁に対して、**いかに迅速で確実な調査を行えるか**が課題  
 ✓ 技術の向き、不向きと適用

	構造	橋数
床版橋、桁橋	比較的 <b>シンプルで小さい構造が多い</b>	<b>多数</b>
ラーメン橋、斜張橋、トラス橋、アーチ橋、吊橋	比較的 <b>複雑で大きい構造が多い</b>	<b>少数</b>

→例えば  
自撮り棒

→例えば  
UAV



# 令和6年能登半島地震での様々な新技術の活用事例

「道路橋の震後点検の効率化・高度化に向けた新技術の利活用に関する共同研究（令和5～6年度）」（土木研究所、橋梁調査会、川金コアテック、ニコン・トリンプル、日本電気、パナソニックコネク）の一環で、能登半島地震において、点検支援技術を積極的に活用した地震後の点検を実施。



UAV空撮画像



UAVによる空撮の様子



ハンディスキャナー  
点群計測風景



自撮り棒による画像



自撮り棒  
(5m)

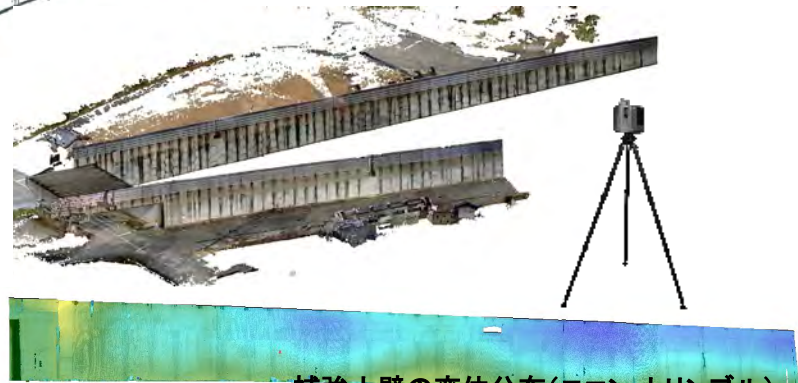
自撮り棒による  
撮影風景

トラス上部構造の点群モデル



支承部の挙動を把握

画像解析結果(パナソニックコネク)



補強土壁の変位分布(ニコン・トリンプル)



主桁の変形

目視点検のみではこの損傷が進展する可能性があるか否かがわからない

## 実施主体：パナソニックコネクト

- ✓ 目視点検ではわからない損傷の進展性を確認するために、主桁の変形が生じ支承部にアンカーバーの抜け出しや沓座モルタルの割れ等の変状が生じた道路橋の点検に画像撮影による微小変位計測を実施
- ✓ 桁が変形した後も車両の通行に応じて0.2mm程度動いている様子を確認



- : 変位ベクトル(支承上の各点の移動方向とその程度、変位は400倍)
- : 不動点



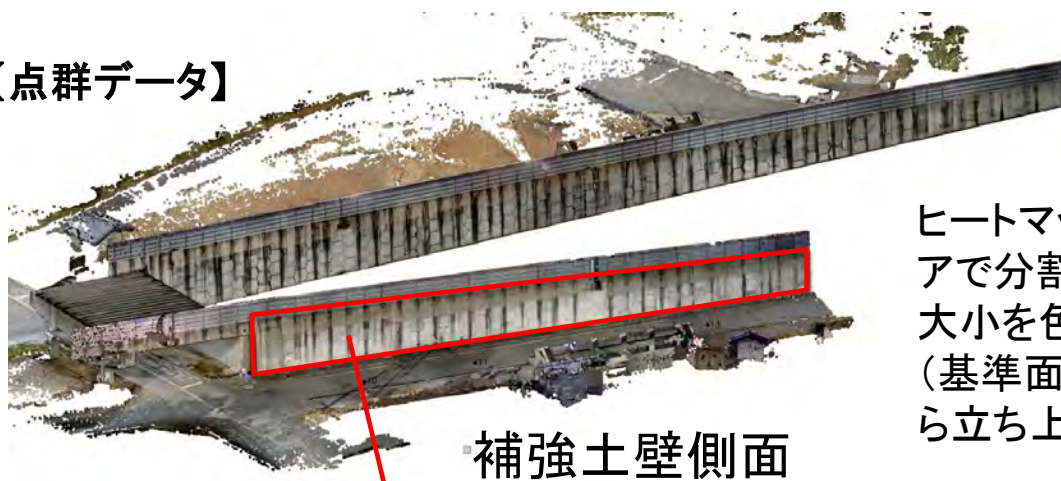




## 実施主体：ニコン・トリンブル

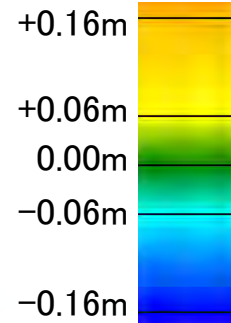
- ✓ 近接目視点検で数cm程度のはらみ出しが確認された補強土壁に対し**3次元点群計測**を実施
- ✓ **人による近接目視点検では部分的な変位しかわからなかったが**、3次元点群計測を行ったことで面的な変位の分布が計測できた。
- ✓ 補強土壁の倒れこみが生じている可能性があるが、計測結果の確からしさ、および、点群取得精度の確認は今後行う。

### 【点群データ】



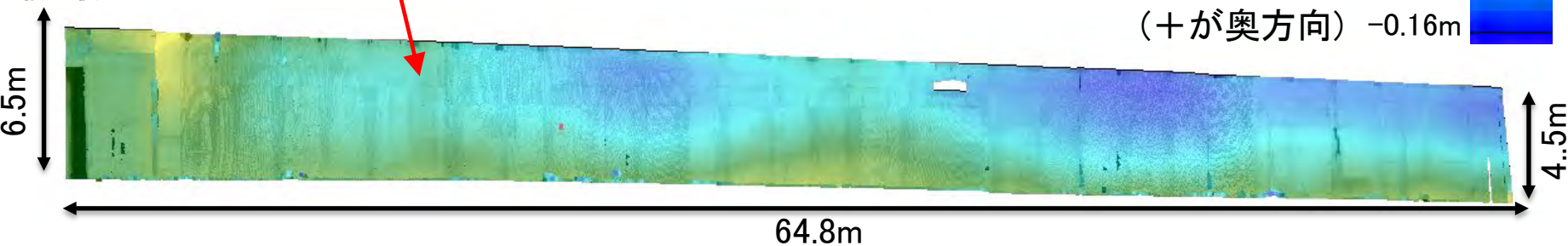
ヒートマップ：壁面を微小なエリアで分割し、エリア毎の偏差の大小を色調により表現したもの  
(基準面：壁面下部(ピンク色)から立ち上げた鉛直面)

【凡例】



※数値は基準面との偏差  
(+が奥方向)

橋台側



## ゴム支承の破断



目視点検のみでは、外観からは変状が無いゴム支承の内部の状態が不明。

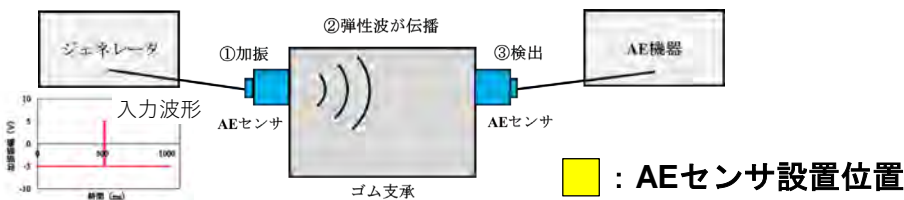


実施主体：立命館大学、川金コアテック

- ✓ 外観目視で破断が疑われたゴム支承では卓越周波数が小さい傾向があることが確認
- ✓ 外観からは確認できない変状を検知するためには、この傾向が実際にどのような変状を意味している計測結果であるか判別する技術が必要となり、今後の検討課題

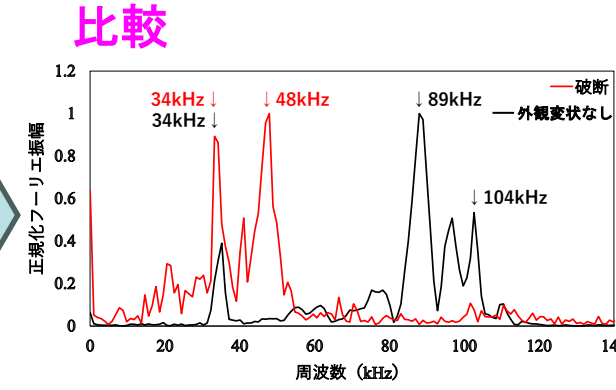
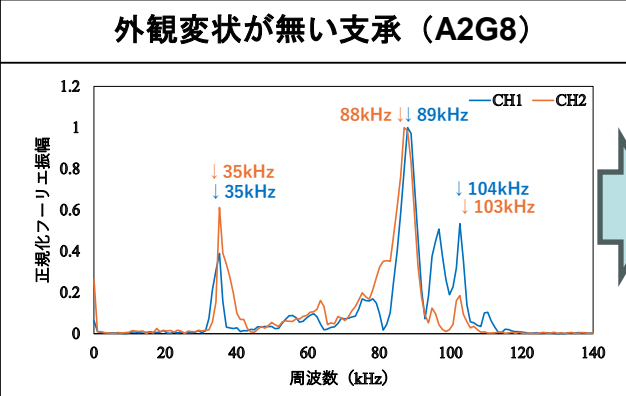
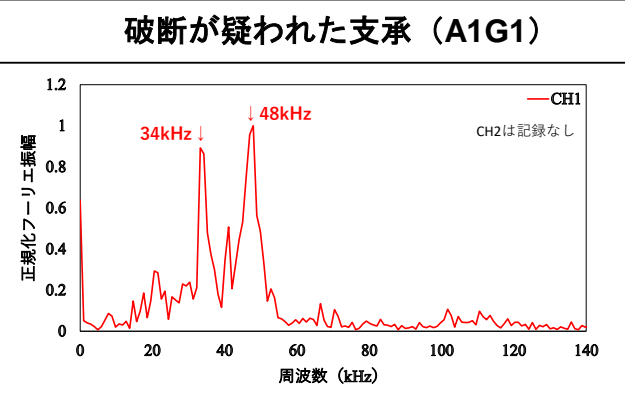
## 【弾性波計測の概要】

- ファンクションジェネレータによりパルス波を加振し、対面のAEセンサで受信する。支承内部および表面を伝搬した弾性波の特徴をFFTで確認する。



調査対象支承

## FFT（高速フーリエ変換）結果





地震発生直後には広大な道路網  
の損傷状態の把握が必要  
そのための手段が限られる



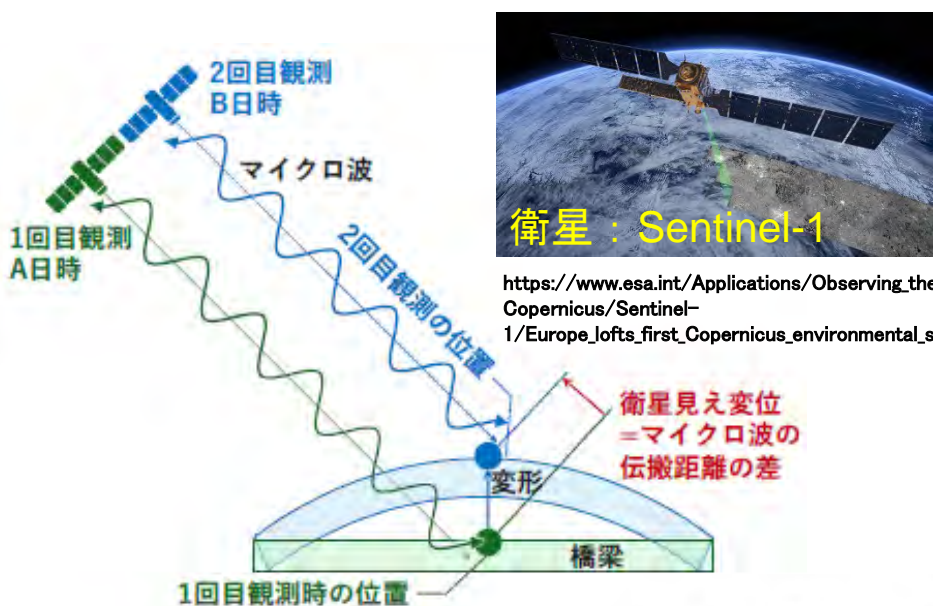
国土交通省：復旧見える化マップより

# 令和6年能登半島地震での様々な新技術の活用事例



実施主体：日本電気

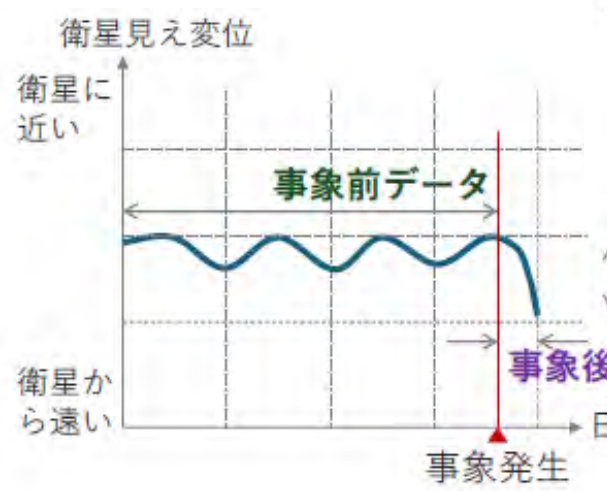
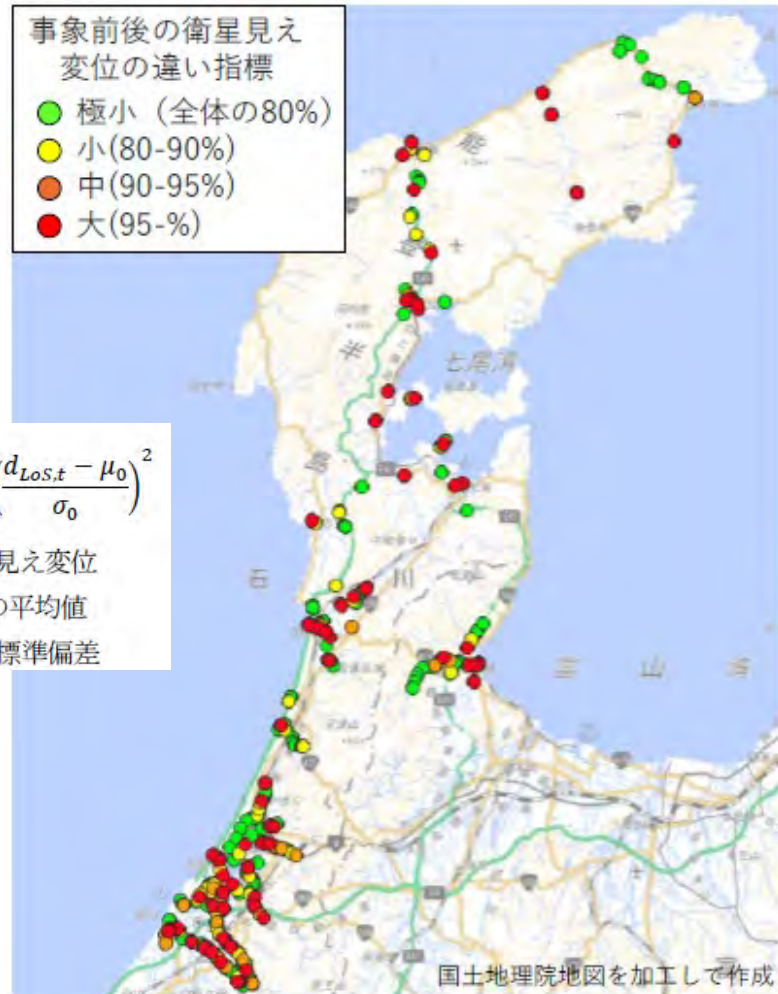
- ✓ 地震発生前後の道路橋の橋面の変位の変化の傾向を分析
- ✓ 実際の変状と比較して「見え変位」が何を意味しており、どのような精度で変状を検知可能であるかは今後の課題



衛星：Sentinel-1  
[https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Europe\\_lofts\\_first\\_Copernicus\\_environmental\\_satellite](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Europe_lofts_first_Copernicus_environmental_satellite)

事象前後の衛星見え変位の違い指標

- 極小 (全体の80%)
- 小 (80-90%)
- 中 (90-95%)
- 大 (95-%)



マハラノビス距離 
$$a = \sum_{t=T1, T2, T3} \left( \frac{d_{Los,t} - \mu_0}{\sigma_0} \right)^2$$

$d_{Los,t}$  事象後観測日tの衛星見え変位  
 $\mu_0$  事象前の衛星見え変位の平均値  
 $\sigma_0$  事象前の衛星見え変位の標準偏差

事象前後の  
違いを  
数値化

# まとめ①

大規模地震発生後の道路橋の震災復旧では以下の制約条件を踏まえ、**迅速な交通開放と確実な措置を両立することが社会的に要請**

- 1) **時間的制約**（例えば、人命救助の壁：72時間）
- 2) **機材や資材の制約**（例えば、橋梁点検車や足場が無い条件での点検、復旧のための資材の不足）
- 3) **人材の制約**（例えば、行政職員や点検技能者が十分に参集できない状況、技術者数の不足）
- 4) **ライフラインやインフラの途絶**（例えば、電気・通信・水等の供給の途絶、道路交通網の途絶）等

実際に熊本地震では震度6弱以上を観測した地域に**約15,700橋**の道路橋が存在<sup>1)</sup>



膨大な数の道路橋に対して、復旧を**迅速に確実に行うことができる方策が必要**。点検技術含め、**そのための手段の拡充が課題**。



# まとめ② 必要性の議論をすべき

必要性の議論が必要なのは、点検手段（技術）でも同じ



吉田巖氏（1926～2019）

1963:建設省土木研究所 基礎調査室長

1966:建設省土木研究所 構造橋梁部  
基礎研究室長（初代）

**必要性の議論をすべきなのです。  
必要性のあるところに  
必ず技術がついてくるのです。**

実現は可能だが、技術はいまのところ、  
まだ成熟していませんね。  
時間と金を投入して  
技術をアップさせたい。  
技術的にむずかしいから  
止めようというのはダメ。

## 参考文献

土木施工設計計算例委員会：実際に役立つ土木構造物の設計計算例，1968.

田村喜子：土木のこころ，夢追いびとたちの系譜，復刻版，2021.

本研究の遂行にあたり、北陸地方整備局や石川県等に調査の許可を頂きました。また、本研究は「道路橋の震後点検の効率化・高度化に向けた新技術の利活用に関する共同研究（土木研究所、橋梁調査会、川金コアテック、ニコン・トリンブル、日本電気、パナソニックコネクト）」の一環で行われたものです。記して謝意を示します。

ご清聴いただきありがとうございました。

- ・ 日本道路協会：道路震災対策便覧，災害復旧編，令和4年度改訂版。
- ・ 国土交通省：道路構造物の被災状況のとりまとめ，第5回道路技術小委員会，資料2，2016年6月24日。
- ・ 国土技術政策総合研究所：道路橋の定期点検に関する参考資料（2013年版），—橋梁損傷事例写真集—，国総研資料，第748号，2013。
- ・ 国土技術政策総合研究所，土木研究所：平成28年（2016年）熊本地震土木施設被害調査報告，国総研資料，第967号，土研資料，第4359号，平成29年3月。
- ・ 日本橋梁建設協会：'21 Design Data Book，デザインデータブック，2021年5月改訂版。
- ・ 日本道路協会：道路橋点検必携，～橋梁点検に関する参考資料～，平成27年版。
- ・ 中部地方整備局：道路設計要領，第5章 橋梁，2023。 <https://www.cbr.mlit.go.jp/road/sekkeiyouryou/index.htm>（最終閲覧日：2024年6月7日）
- ・ 国土交通省：道路統計年報2022，橋梁の現況，表41 構造形式別、都道府県別橋梁の現況《合計》。 <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/2022/nenpo03.html>（最終閲覧日：2024年6月7日）
- ・ 国土交通省：復旧見える化マップ。 <https://www.mlit.go.jp/road/r6noto/index2.html>
- ・ Europe lofts first Copernicus environmental satellite, [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Europe\\_lofts\\_first\\_Copernicus\\_environmental\\_satellite](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Europe_lofts_first_Copernicus_environmental_satellite)（最終閲覧日：2024年8月9日）
- ・ 土木施工設計計算例委員会：実際に役立つ土木構造物の設計計算例，1968。
- ・ 田村喜子：土木のこころ，夢追いびとたちの系譜，復刻版，2021。
- ・ 小林巧，大住道生：道路橋の震後点検の効率化・高度化に向けたデジタル技術の利活用に関する検討，土木技術資料、第65巻、第9号、2023。
- ・ 吉谷薫，小林巧，大住道生：道路橋の震後点検の効率化・高度化に向けた新技術の適用性，～令和6年能登半島地震での試行事例～，土木技術資料、第66巻、第9号、2024。
- ・ 小林巧，吉谷薫，大住道生：道路橋の震後点検におけるUAVや自撮り棒の活用方法に関する実践的研究，AI・データサイエンス論文集，2024。(掲載決定)
- ・ 吉谷薫、小林巧、大住道生：震後点検における点群計測による鋼アーチ橋のゆがみ調査、AI・データサイエンス論文集、2024。(査読中)
- ・ 室田亮馬，川崎佑磨，後智貴，井上和真，姫野岳彦，高畦武志：令和6年能登半島地震で被災した橋梁用ゴム支承の損傷評価，地震工学研究発表会，2024。
- ・ 久村孝寛、木下耕介、矢野友貴宏：人工衛星による橋梁の異常検知に関する検討 令和6年能登半島地震を事例として、AI・データサイエンス論文集、2024。(掲載決定)