

2025年度地震工学委員会 第1回研究会

**地震災害軽減のためのダメージフリー構造技術
に関する調査研究小委員会**

**2024年度活動報告
(活動終了報告)**

小委員会の構成

※所属，委員数は，活動終了した2024年9月時点

委員長：運上 茂樹（東北大学）

副委員長：松崎 裕（東京工業大学）

幹事長：党 紀（埼玉大学）

幹事：伊津野和行（前委員長，立命館大学）

川崎 佑磨（立命館大学）

四井 早紀（東京大学）

何 昕昊（東北大学）

藤倉 修一（宇都宮大学）

委員数：31名

活動期間：2020年4月～2024年9月（4.5年）

全体で，ダメージフリー構造の定義等に関する議論を行った後，2021年度から以下の3つのWGを設置して活動してきた。

WG1（運上主査）：ダメージフリーの在り方に関するWG

WG2（党主査）：新材料・新構造・デバイスに関するWG

WG3（川崎主査）：モニタリングや地震後の診断技術に関するWG

活動の背景と目的

- 情報化が発達して交通・電力等ライフラインに極度に依存した都市
 - 高齢化・人口減少が進む地方
- ▶ どちらも大地震に対して脆弱であることは近年の地震被害から明らか

人命や生活を守る上で社会基盤構造物の果たす役割は大きく、可能な限りの被害最小化と災害発生時の迅速な事後対応への備えが求められている。

目的

本小委員会では、我が国が置かれる地震環境や最近の技術開発を踏まえ、今後の地震災害軽減に必要とされる次世代の技術展開について調査研究を行うことを目的として活動した。

2024年度の活動報告

小委員会・WG活動

- 活動成果報告書の調整・ブラッシュアップ
- 成果報告会の企画・準備・開催
- 最終小委員会 2024年9月18日 土木学会
成果報告会に関する審議 12名参加

活動成果報告会

- 開催日時 2024年9月18日
- 開催形式 土木学会講堂での対面とオンラインの
ハイブリッド
- 参加者数 150名

出版物

地震災害軽減のためのダメージフリー構造技術に関する調査研究小委員会 活動成果報告書

地震災害軽減のための
ダメージフリー構造技術に関する
調査研究小委員会
活動成果報告書

— 真に地震災害に強い新たな構造コンセプト
の展開に向けて —

2024年9月18日
土木学会 地震工学委員会

□ 構造物・部材の物理的な損傷

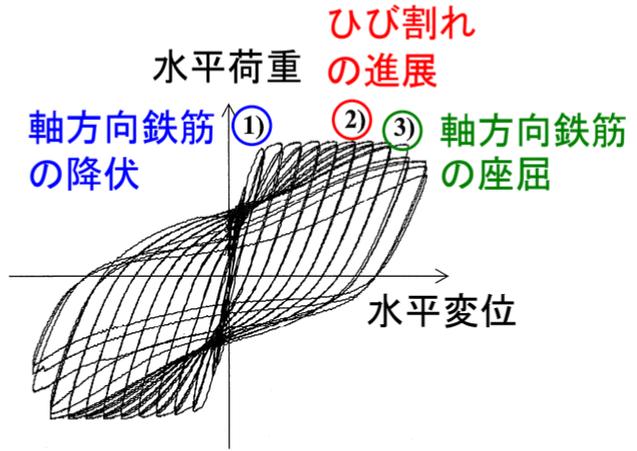
積層ゴム支承の破断
(熊本地震)



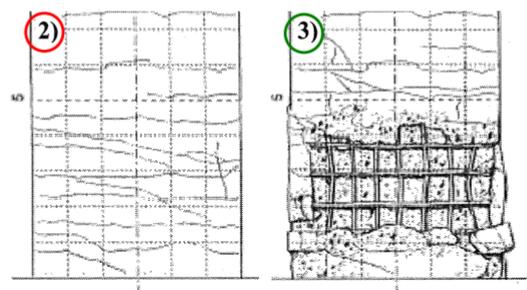
鉄筋コンクリート橋脚のせん断破壊
(兵庫県南部地震)



鉄筋コンクリート橋脚の曲げ挙動
(正負交番繰返載荷実験)



Sakai & Hoshikuma (2013)に加筆



□ 構造物等が果たすべき機能のダメージ

熊本地震の際の事例

支承が損傷し、緊急輸送道路上の橋としての交通機能を担保できていない。



応急復旧工事の完了後， 6月26日に交通開放

右下の鋼製支承の写真は、
日経コンストラクション
2016年5月9日号より

利用者や周辺に対して波及する構造物の倒壊等によるダメージ

高速道路高架橋の倒壊
(兵庫県南部地震)



ロッキング橋脚を有する跨道橋の落橋による
九州自動車道への影響 (熊本地震)



ダメージとダメージフリー 本小委員会におけるダメージの捉え方

これらのように、ダメージと一口に言っても、様々な段階での影響がある。

- 構造物・部材の物理的な損傷・ダメージ
- 構造物等が果たすべき機能のダメージ
- 利用者や周辺に対して波及する構造物の倒壊等によるダメージ



本小委員会におけるダメージの捉え方

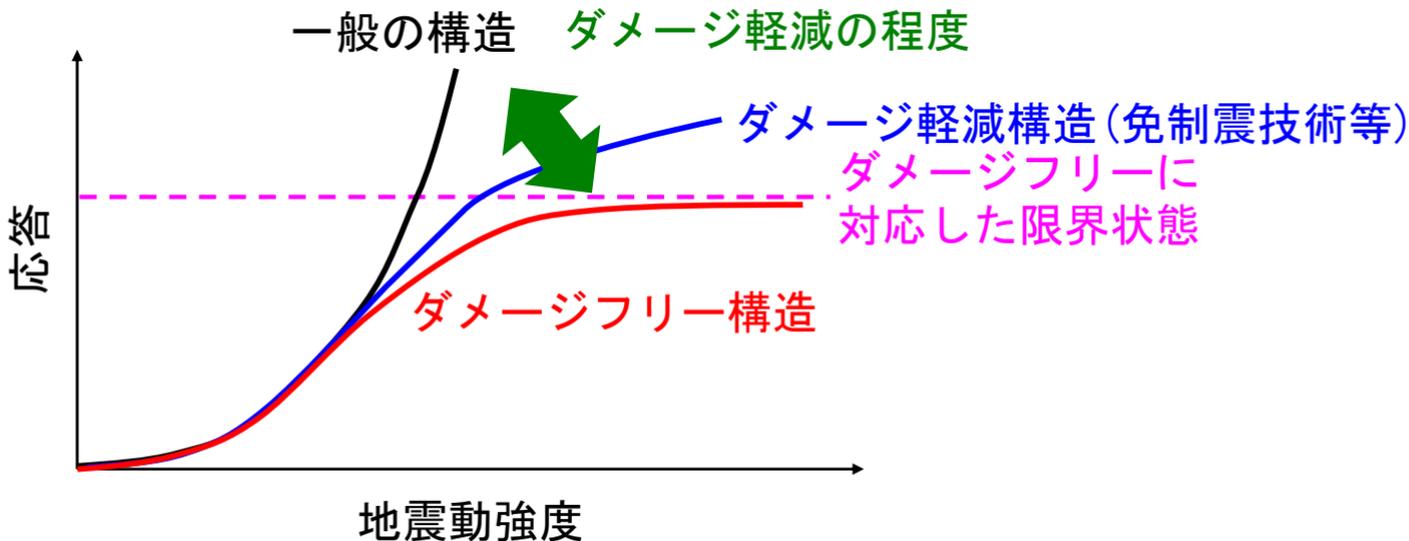
地震など外力作用によって発生する「ダメージ」とは、「構造物等本体への影響」のみならず、構造物等に起因する「人命への影響」、「社会・経済への影響」を含み、その事象「ダメージ」が発生していない状態からの「負の変化（低下・喪失・影響）を有する状態にある」ことを意味する。

ダメージとダメージフリー ダメージフリーとは？

ダメージフリー構造におけるダメージフリーに関する議論

ダメージフリー構造だけでなく、ダメージ軽減構造も裾野として必要？

超過作用に対してもダメージフリー構造の概念を適用する場合、ダメージフリー構造は究極の概念となり、損傷が不可避な一般の構造とのギャップが非常に大きい。



ダメージとダメージフリー デメージフリーとは？

ダメージフリー構造におけるダメージフリーに関する議論

ダメージフリー構造だけでなく、ダメージ軽減構造も裾野として必要？

超過作用に対してもダメージフリー構造の概念を適用する場合、ダメージフリー構造は究極の概念となり、損傷が不可避な一般の構造とのギャップが非常に大きい。



本小委員会におけるダメージフリーの定義

「ダメージフリー」とは、「構造物等本体に全く損傷が生じない」というある特定の構造物等の状態に限定されず、この状態を含め、

「**構造物等の有する役割・機能・性能**」の負の変化（低下・喪失・影響）を防ぐこと、あるいは、従来に比較してその負の変化の程度について大幅な縮小・軽減を達成可能なこと、を意味する。

ダメージとダメージフリー ダメージフリー構造とは？

本小委員会におけるダメージフリー構造の定義

想定を超えるような外力に対しても、**ねばり強く抵抗**し、仮に損傷が発生してもその**状態を的確に検知・診断**し、そして**容易に修復可能である機能をビルトイン**した構造機構であり、さらに**構造物の管理体制・システムを含めて**、「**構造物の有する役割・機能・性能**」の負の変化（**低下・喪失・影響**）を防止する、あるいは、従来に比較して**大幅に最小化可能な構造機構とその管理体制**

- | | |
|------------------|------------------|
| 1) 力学的可逆性限界 | 役割・機能・性能の低下なし |
| 2) 機能性限界 | 役割・機能・性能の低下なし |
| 3) 崩壊回避限界 | 一時的に、役割・機能・性能が低下 |
| 4) 崩壊後の破滅的影響回避限界 | 役割・機能・性能を喪失 |

超過外力に対しても、**役割・機能・性能の低下のない状態をできるだけ拡大可能な構造概念**であり、**1)と2)の限界を大幅に拡大**、**向上**させることが可能な構造機構の実現

社会的に求められる要求性能レベル ダメージフリーのコンセプト

ダメージフリー構造のコンセプトキーワード **損傷度と機能, 応急復旧のリンク**

影響なし, 使用制限, 使用不可

Maintain
Functionality
機能確保

応急復旧が不要, 応急支保工

Quick
Repairability
迅速機能回復

**ダメージフリーなインフラ施設
(ミニマムインパクト)**

Resistance
損傷制御・軽減

可逆性確保, 終局

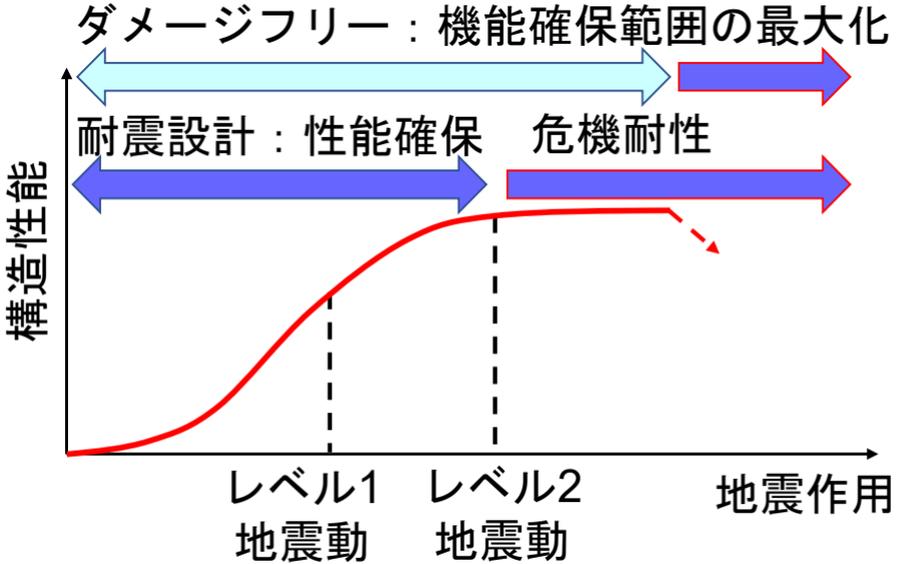
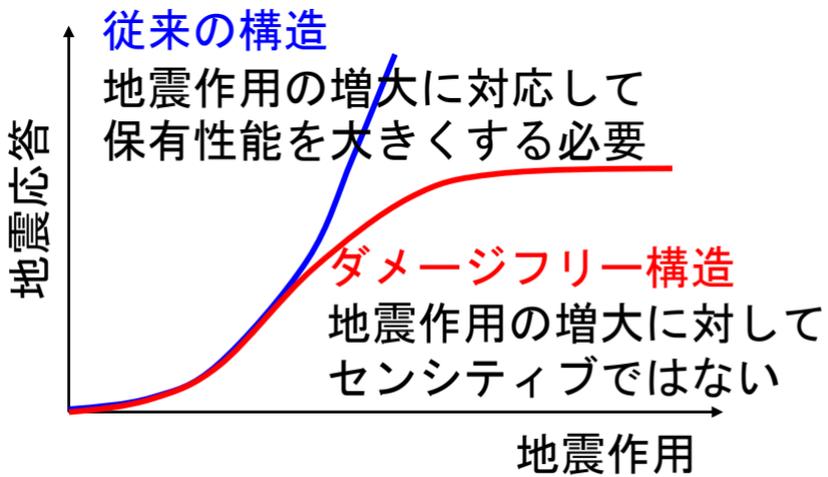
Adaptability
外力への適応性能

マルチハザード, オールハザード

本小委員会で目指す地震被害軽減のためのコンセプトの定義

本小委員会におけるダメージフリー構造の定義

想定を超えるような外力に対しても、**ねばり強く抵抗し**、仮に損傷が発生してもその状態を**的確に検知・診断し**、そして**容易に修復可能である機能をビルトインした構造機構**であり、さらに**構造物の管理体制・システムを含めて**、「**構造物の有する役割・機能・性能**」の負の変化（低下・喪失・影響）を防止する、あるいは、従来に比較して**大幅に最小化可能な構造機構とその管理体制**



本小委員会で目指す地震被害軽減のためのコンセプトの定義

構造物の機能性を格段に拡張可能で、機能確保・損傷最小化・自己検知診断、適応性能を実現する構造技術を**6S-Technologies**として分類

Self-Reliance 地盤震動から独立・分離した構造

Super-Elasticity 超弾性構造

Super-Ductility 超じん性構造

Super-Energy Absorption 超減衰構造・機構

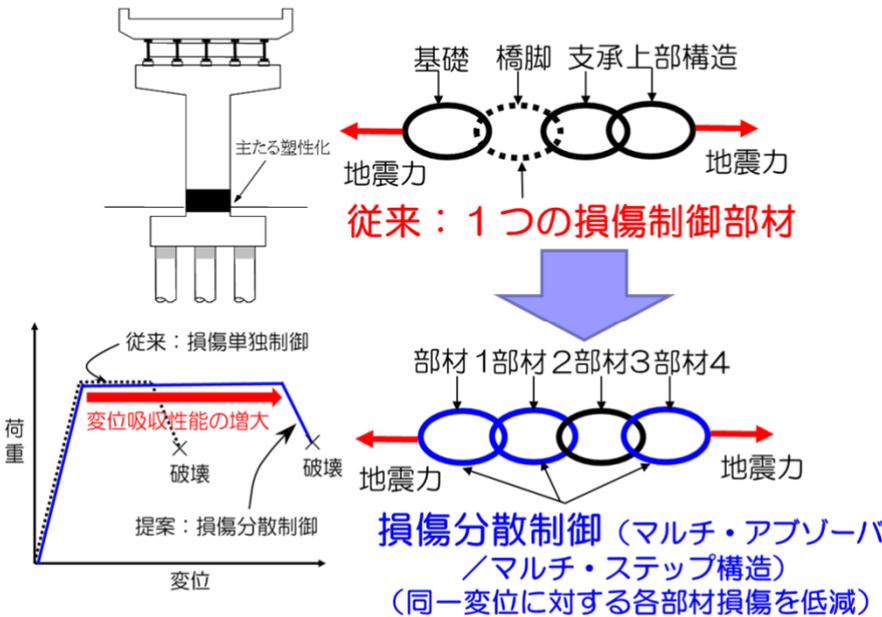
Self-Diagnosis 自己損傷検知／リアルタイム健全性診断

Self-Repairability セルフセンタリング機構

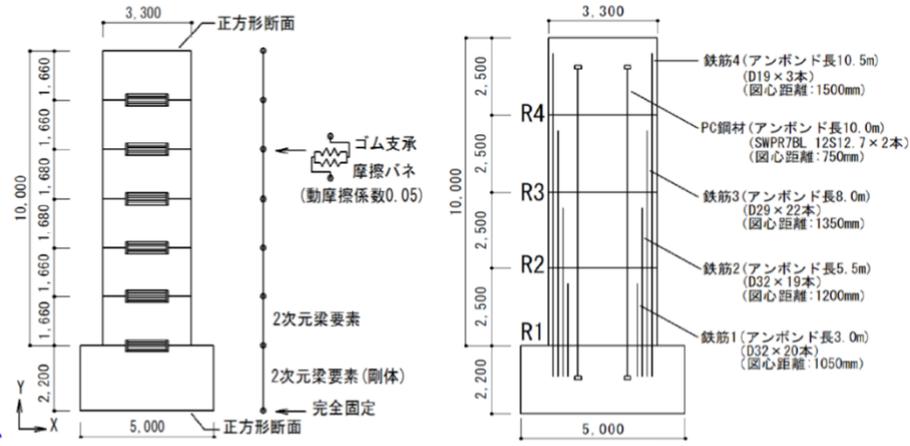
本小委員会で目指す地震被害軽減のためのコンセプトの例

Super-Ductility 超じん性構造

複数個所に損傷を分散させて、損傷程度を低下させたり、
複数の機構を段階的に機能させたりするなどして、変形能を格段に増大

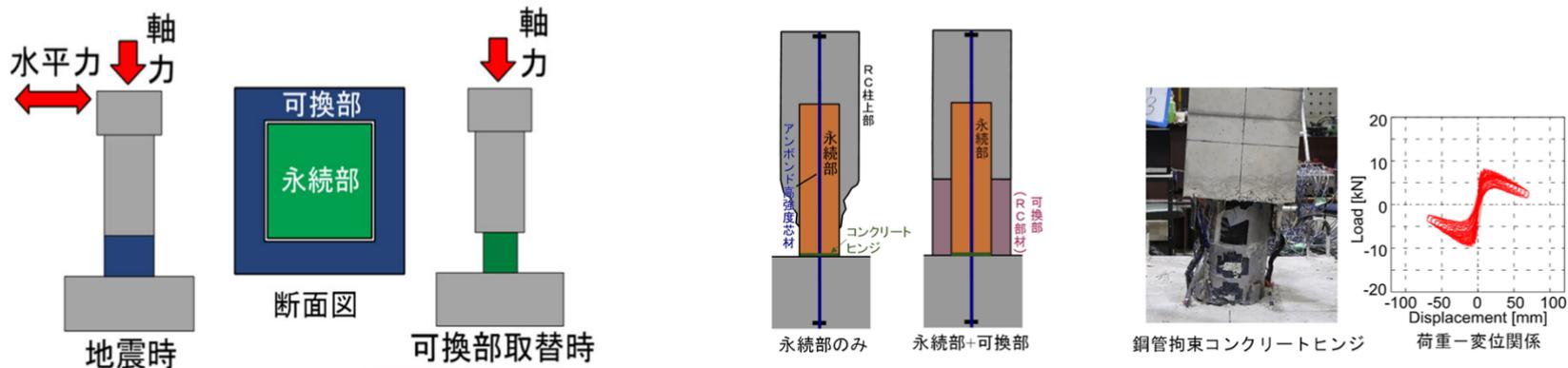


マルチ・アブゾーバの構造例



Li & Unjoh (2023)

復旧時にセルフセンタリング機構を発揮するRC柱の解析的検討



可換部

地震時に塑性化し、
エネルギー吸収能を発揮

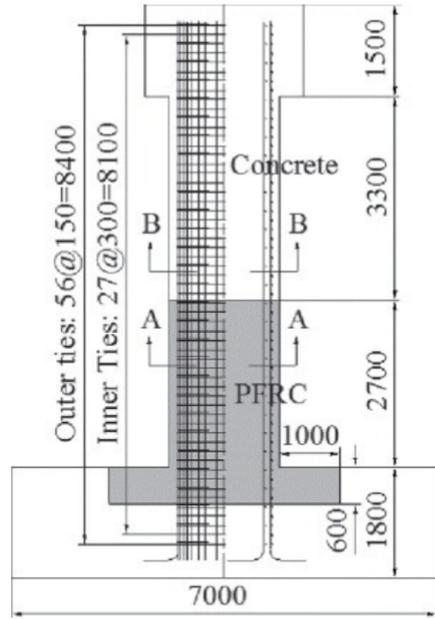
永続部

常時及び可換部
取替時に軸力を支持

永続部にコンクリートヒンジを用いた提案構造において、地震時のエネルギー吸収性能と復旧時のセルフセンタリング機構を両立できる可能性

白井 洵, 植村 佳大, 高橋 良和 : 復旧時セルフセンタリング機構を有するメタボリズム柱構造の解析的検討, 土木学会論文集A1, Vol. 78, No. 4, pp. I_523-I_536, 2022.

橋脚基部に高じん性繊維補強モルタルを使用した橋脚



大地震を経験しても大きな補修が必要ない
「ダメージフリーの橋」が提案された。

E-ディフェンス振動台において、従来のRC橋脚や
現在基準のRC橋脚と繊維補強されたダメージフリー橋脚
の実大振動台実験が実施された。



川島一彦, 佐々木智大, 右近大道, 梶原浩一, 運上茂樹, 堺淳一, 幸左賢二, 高橋良和, 矢部正明, 松崎裕: 現在の技術基準で設計したRC橋脚の耐震性に関する実大震動台実験及びその解析, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 1, pp. 324~343, 2010.

Kawashima, K. et al.: Seismic Performance of a Full-Size Polypropylene Fiber-Reinforced Cement Composite Bridge Column Based on E-Defense Shake Table Experiments, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 463-495, 2012.

実橋へのIoTセンシング適用事例

IoTセンシング, モニタリング技術

- 高度な技術や材料が開発されている。
- 実用事例：長大橋や特殊橋梁が多い
- コスト：高価になりやすい



地域防災, 地方橋梁

- 市町村でも地域防災対策が広まりつつある。
- 高齢化：橋梁数の増加, 技術者数の減少
- 対策：ソフトとハードの融合



- 地方橋梁でも導入事例を増やしたい。
- できる限りコストを抑えて最低限の情報を取得したい。

- 遠隔で情報取得して状況を確認したい。
- 橋梁の物理情報を地域防災に役立てたい。

対象部材?

精度?

機器類の管理?

本研究の最終目標

橋梁のIoTセンシングが地域全体のダメージフリーへ貢献

IoTセンシングで橋梁の状態をヘルスマニタリングすることは可能か、群馬県下仁田町の橋梁を対象に検討した。

実橋へのIoTセンシング適用事例

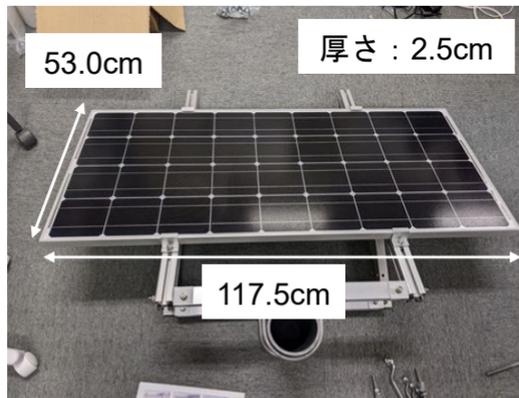
- ▶ 地方橋梁でも導入事例を増やしたい。
- ▶ できる限りコストを抑えて最低限の情報を取得したい。

- ▶ Raspberry Pi 4Bは、カード型コンピュータでクレジットカードの大きさと同様。



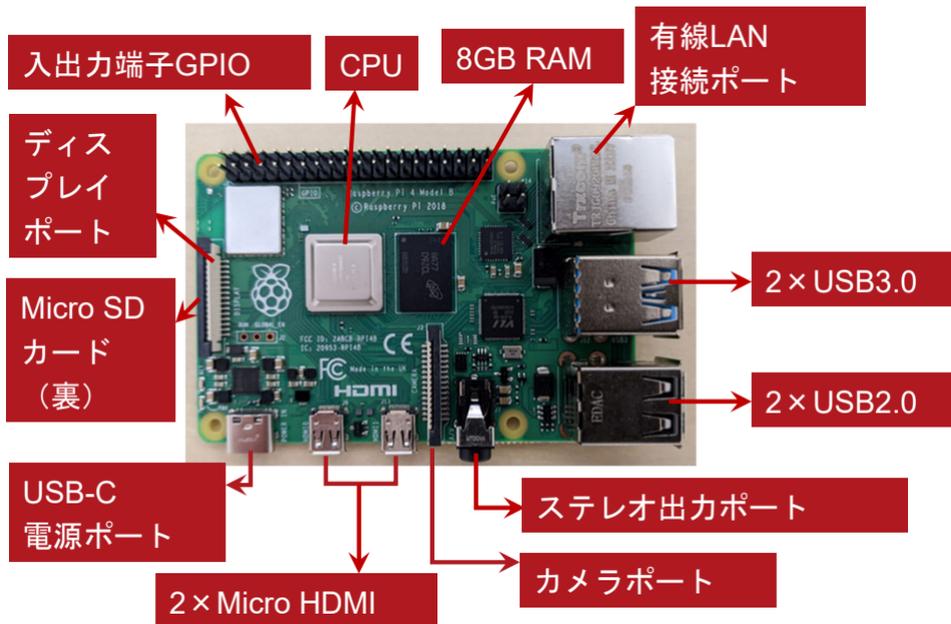
IoTセンサとして**Raspberry Pi**、動力源は自然エネルギー（太陽光）を利用する。電気工事が不要で、後付け設置、どのような橋梁でも設置可能。

使用した太陽電池モジュール

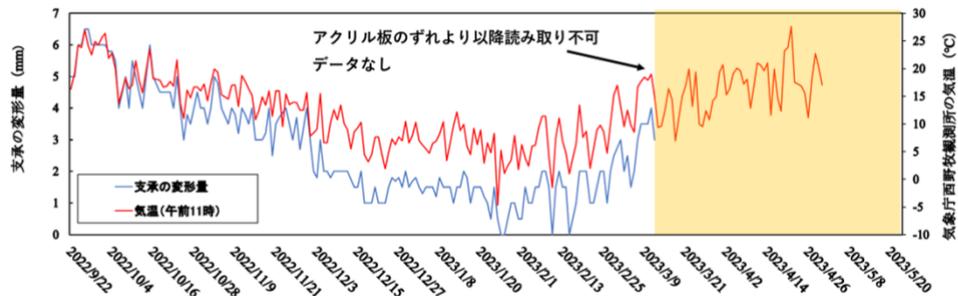


最大出力100W、耐腐食性、10年以内で最大出力下限値の90%以上、25年で80%以上の発電能力。

- ▶ 現状では、太陽光のみで発電。
- ▶ 将来的には、その他の自然エネルギー（風、水など）も検討の必要あり。

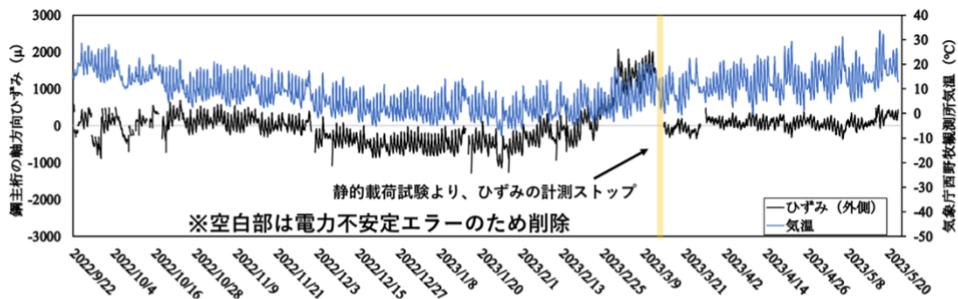


実橋へのIoTセンシング適用事例



カメラによるモニタリング結果

計測の際に使用していたアクリル板が3/14の静的載荷試験によってずれが生じ正しいデータが計測できていない。



鋼材用ひずみゲージモニタリング結果

3/14の静的載荷試験後に、ひずみゲージの接着方法を改良し、接着力の改善、防水処理を行ったため、変更前より正確な値となっていると考えられる。

- 開発したIoTセンサを用いて、8ヶ月間のモニタリングが可能であることが分かった。しかし、太陽光発電では、電力不足となることがあった。今後の課題として、新たな発電方法の検討を行う。