

# IoT センシングによる橋梁のインテリジェント化に関する研究

立命館大学理工学部 准教授 川崎佑磨

## 1. 背景と目的

日本では、高度経済成長期以降に整備されたインフラが今後一斉に老朽化する。その中でも、全国の 2 メートル以上の橋梁数は約 70 万橋以上存在し、そのうち約 68%を市区町村が管理している。しかし市区町村は、財政力不足、職員不足、専門的知見の不足であることが多く、町の約 5 割、村の約 7 割で橋梁保全業務に携わっている土木技術者が 0 人であることなどから、国の財政的・技術的支援がなされるまで、橋梁長寿命化修繕計画は策定されていなかった。また、経年劣化する橋梁は供用年数が長いものも多く、現行の道路橋示方書の基準とは異なる条件で設計・施工されていることがほとんどである。現存する橋梁の現在の健全性（すなわち健康診断）を把握することは、維持管理の適切な判断を早期に評価するために重要である。橋梁の初期状態を把握していることが望ましいが、初期状態を知るために必要な図面、計算書、維持管理記録が残っていない場合がある。既往研究では、橋長や幅員などの外観の情報と、設計当時の設計基準を用いて、RC 内部の配筋、応力状態などの初期値を算出し、ひび割れ進展やひずみの計測、加速度などを高精度で、高価な計測機器を用いてデータを取得する。そして、得られたデータと算出した初期値から劣化度を推定している。これらの測定技術で劣化度の診断を定期的に行い、維持管理に利用することが期待されている。しかし、市区町村の管理する橋梁数が多いことや、計測結果から劣化の診断に、専門知識が必要であるが市区町村では専門知識を有した技術者が不足していること、高価な計測機器を用いたモニタリング手法は、コストが高く財政力不足である市区町村では採用が困難であることなどの問題がある。

そこで本研究では、多くの橋梁に導入することが見込める簡潔で安価な IoT センシング技術の開発を行い、物理量として「ひずみ」の検出を試みた。これまで、既往研究でも IoT センシングでひずみを検出している事例は非常に少ない。ひずみは、材料の挙動を直接知ることができる重要な物理量であり、地震などの自然災害による損傷同定、維持管理に有効に活用できると考えている。橋梁のインテリジェント化を進めていく上で、IoT センシングによる「ひずみ」の検出可否とその精度について基礎的検討を行った。

## 2. IoT センサの概要

IoT センサには、写真-1 に示す Raspberry Pi を使用した。Raspberry Pi は、1 枚の基板の上に最小限の CPU や入出力インターフェース、コネクタが搭載されている数千円で購入可能なイギリスのラズベリーパイ財団によって教育用に開発されたシングルボードコンピュータである。RaspberryPi 用の OS である Raspbian を microSD カードにインストールし、RaspberryPi に microSD カードを挿入し、Wi-Fi に接続することで、普段使用しているコンピューターと同様に、ネットサーフィンや音楽鑑賞をすることができる。本研究では、Raspbian を使用し、Wi-Fi 環境でのネットワークの設定を行った。さらに、ひずみ検出のために、写真-2 に示す Raspberry Pi 用高精度 A/D 変換モジュールである ADpi Pro を使用した。ADpi Pro は、OS から容易に操作が可能な専用のソフトウェア



写真-1 Raspberry Pi



写真-2 ADPi Pro



写真-3 Raspberry Pi と ADPi Pro



写真-4 USB ドングル

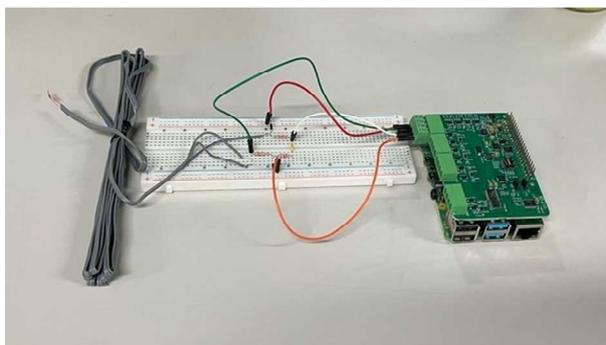


写真-5 鋼材用 I 型ひずみゲージの接続

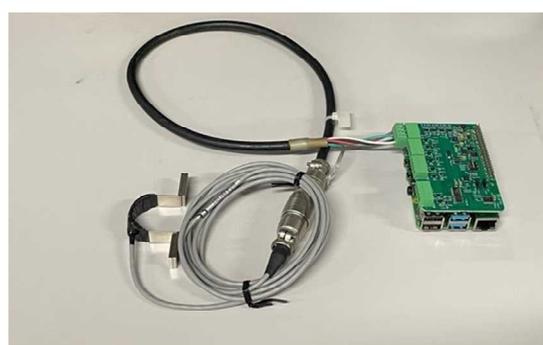


写真-6 π型ひずみゲージの接続

環境が提供されており、高精度のアナログ電圧を Raspberry Pi で計測できる。また、OS 側から電源の ON と OFF が可能な外部出力端子を搭載しており、OS 側からセンサを測定時だけ ON にすることで、消費電力を削減することができる。Raspberry Pi と ADPi Pro を接続し、写真-3 に示すシステムを作製した。また、これらを Wi-Fi に接続することで、遠隔での操作やインターネットに接続することができる。写真-4 に示すデータ通信端末の USB ドングルを Raspberry Pi の USB に接続することで、Wi-Fi に接続した。本研究では、非 Wi-Fi 環境で計測を行い、実験の後に得られたデータを Wi-Fi 環境で Windows のパソコンに送信し、データを取得した。

本研究では、鋼桁のひずみを計測するために鉄筋用ひずみゲージ、コンクリート表面のひび割れ幅の変動を計測するためにπ型ひずみゲージを使用した。I 型ひずみゲージと Raspberry Pi の接続の様子を写真-5 に、π型ひずみゲージと Raspberry Pi の接続の様子を写真-6 に示す。

### 3. 実験概要

本研究では、基礎的研究の対象として群馬県の O 橋をモデルに計測実験を行った。O 橋の設計条件を表-1 に示す。また、図-1 に O 橋の平面図、図-2 に O 橋の立面図を示す。測定項目を表-2 に示す。RC 床版の下面のひび割れ進展の計測にπ型ひずみゲージを取り付けて、鋼桁の温度収縮の計測に G4 の主桁に鋼板用のひずみゲージを取り付けて計測した。計測頻度は、1 時間当たり 1 データとした。鋼板用ひずみゲージ、π型ひずみ、コンテナボックスの設置箇所を図-3 に示す。π型ひずみゲージは歩道側と橋梁中央側の 2 箇所に橋軸直角方向のひび割れを対象に設置した。鋼材用ひずみゲージは G4 の主桁に橋軸方向に設置した。電力の供給には太陽光発電を利用した。太陽光パネルは図-1 の G6、G7 の欄干に落下防止対策を施して設置した。ここで、野外での計測を行うため、Raspberry Pi などの IoT センシングに必要な機器類は、全て防水のコンテナボックス内に収納した。写真-7 にコンテナボックスの内部の様子を示す。コンテナボックスには、IoT センサ、電源供給用のバッテリー、太陽光発電に使用するチャージコントローラーを収納し、盗難対策として、コンテナボックスと

表-1 O 橋の設計条件

設計条件	
橋長	55.500m
桁長	55.300m
支間長	27.40 + 27.40m
道路区分	第3種第5級
活荷重	A活荷重
形式	2径間連続桁橋
支承・支持条件	天然ゴム系積層ゴム支承 A1・A2：可動、P1：固定
有効幅員	6.50 ~ 23.50m
斜格	90° 00' 00"
使用鋼材	耐候性鋼材 SMA400、SMA490Y
適用示方書	平成8年12月 道路橋示方書同解説 平成8年7月 鋼道路橋設計 ガイドライン（案）

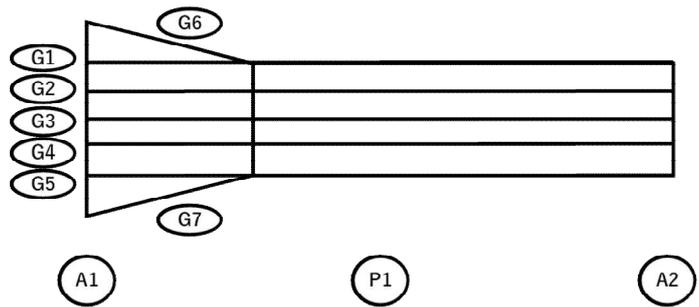


図-1 O 橋の平面図

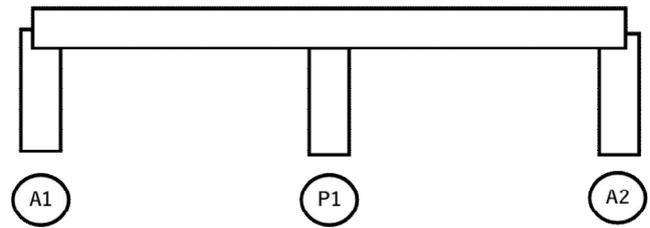


図-2 O 橋の立面図

表-2 計測項目

対象箇所	計測対象	データの取得方法	計測頻度	目的
RC床板	下面のひび割れ	$\pi$ 型ひずみゲージ	1データ/1時間	劣化・損傷の進展などの確認
積層ゴム支承	せん断変位	ひずみゲージ	1データ/1時間	鋼板の伸縮量の推定

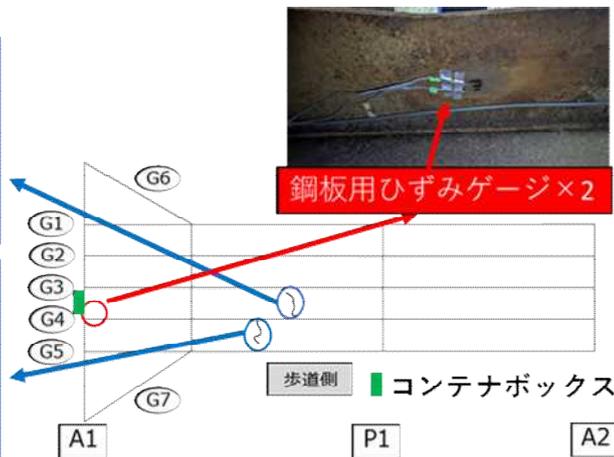
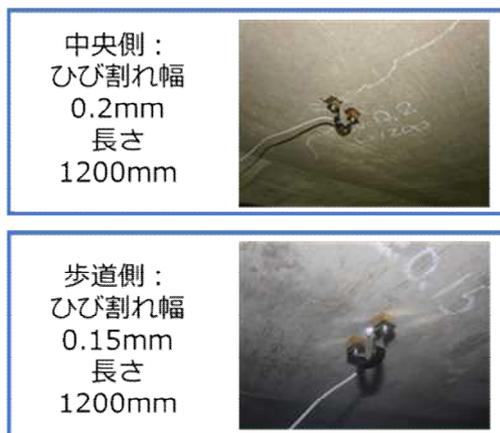


図-3 ゲージ類設置箇所とコンテナボックスの位置

蓋を南京錠で施錠した。コンテナボックスの設置の様子を写真-8 に示す。IoT センサは、雨水や湿気から守るため、タッパーに入れて収納した。

4. 実験結果と考察

図-4, 図-5 に実橋梁で得られた鋼板ひずみのデータおよび $\pi$ 型ひずみのデータを示す。なお, 図-4, 図-5 の空白部分は, 日射量が少なく太陽光パネルによる電力供給が少なくなり, 電力が不安定のため



写真-7 コンテナボックス内部の様子



写真-8 コンテナボックス設置箇所の様子

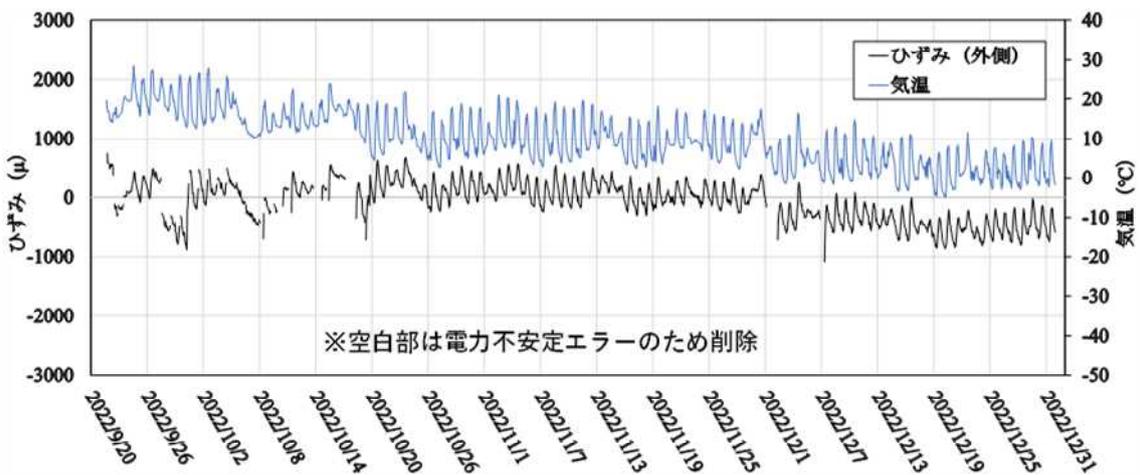


図-4 鋼桁ひずみの挙動

め計測できていない、あるいは計測値が明らかに異なっているなどのデータをエラー値として削除している。鋼板のひずみゲージは2箇所設置しているが、鋼板中央側のデータは接続不良によってデータの取得が不十分であり削除した。また、 $\pi$ 型ひずみでは、IoT センサ内のプログラムに不備があり、図-5 のようにプログラム変更前と変更後を結果として表している。図-4 より、鋼桁のひずみ値は、気温に応じて変動していることがわかった。なお、この気温は対象橋梁の直近にある気象台のデータを気象庁から取得して表示した。このことから、鋼桁のひずみ変動をIoT センシングで長期間モニタリングすることができた。しかし、ひずみの変動はある程度確認できたが、ひずみ値の整合性についてはまだ課題を残している。この点については、今後、室内実験などで精査していきたい。なお、ひずみ値の誤差は、ひずみをIoT センシングで計測するためのブリッジ回路をブレッドボードに抵抗線を差し込む形式で作成していることが大きな要因と考えている。そのため、今後はブレッドボードではなく、ひずみゲージの導線と抵抗線などをハンダ付けすることで漏電対策を行う、あるいは既存製品のブリッジ回路は比較的安価（メーカーにもよるが約1万5千円程度）を使用するなどの対策を検討している。

$\pi$ 型ひずみの歩道側と車道側の結果では、橋梁の拡幅部の影響によって振動が伝わりやすい歩道側のひび割れ幅の変動が大きくなることが予測された。図-5 より、ひび割れ幅の変動は、車道側に比べて歩道側が大きく、計測前に想定していた通りの結果が得られた。歩道側のひび割れ幅は車道側のひ

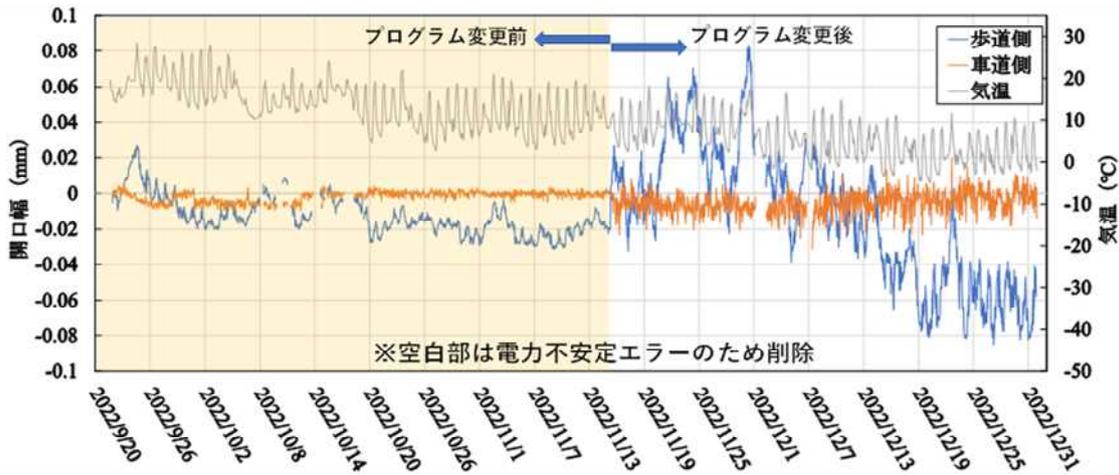


図-5 コンクリート床版のひび割れ開口幅の挙動

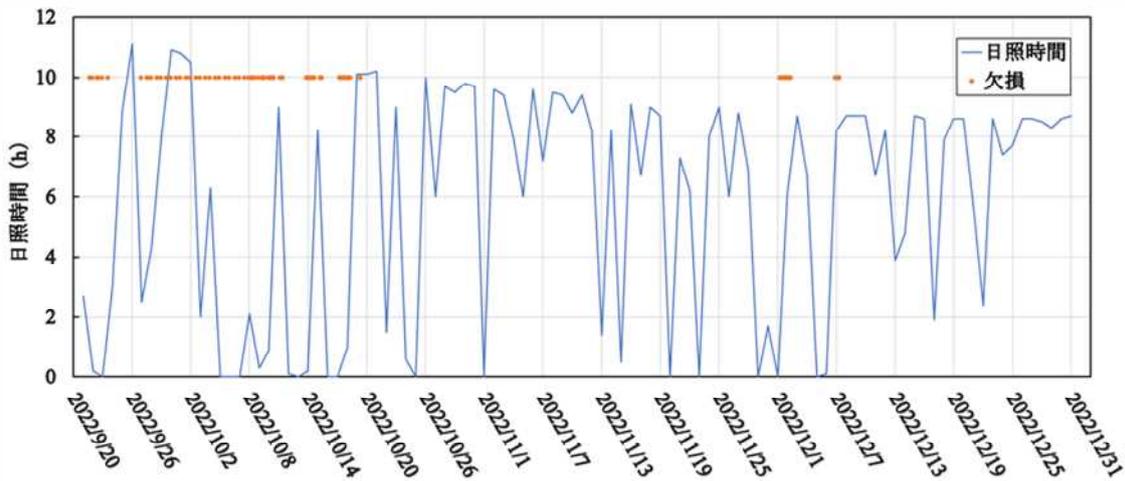


図-6 日照時間の挙動

ひび割れ幅よりも 0.05mm 小さいが、エフロッセンスが多くひび割れから析出しており、橋面上の水がコンクリート床版内を貫通していると推察される。これは、コンクリート床版内の鉄筋腐食などコンクリート部および鋼桁部の劣化に影響する。そのため、ひび割れ幅の変動をモニタリングすることで、ひび割れの進展を遠隔で確認することが可能である。なお、 $\pi$ 型ひび割れの値に関しては、実験室レベルの RC 梁載荷試験結果で計測値の整合性を検証し、誤差はほとんどなく検出可能であることを確認している。図-6 に対象橋梁付近の観照データにより、日照時間と IoT センサの電力不安定による計測欠損箇所の関係を示す。図-6 より、日照時間の少ない 10 月 12 日から 10 月 19 日の期間に電力不安定となることが多かった。日照時間の比較的多い期間である 10 月 20 日から 12 月 1 日では、電力不安定とならなかった。このことから、電力の不安定については、自然エネルギーを太陽光だけでなく風力発電やその他の発電を検討する必要があると考えている。特に、大雨などの洪水被害をモニタリングすることを検討する場合には、太陽光による発電は期待できない。したがって、様々な環境要因でも計測可能なシステムを今後も実橋を通じて検討していく。なお、今回の研究で利用した IoT センサを作成するために購入した物品の総額は約 18 万円程度であり、1 システム当たり 9 万円でデータ取得できた。しかし、使用した Raspberry Pi は、通常であれば約 8 千円であるが、半導体不足の影響から約 3 万 3 千円まで高騰していた。半導体不足の影響が緩和されれば、本研究における 1 システム当たりのコストも低下する。

5. まとめ

本研究では、IoT センシングによる橋梁のインテリジェント化を進める上で、重要となる IoT センシングによるひずみの検出を目的として、実橋を対象に約3か月間のモニタリングデータを検証した。その結果、鋼桁ひずみのデータが、気温に応じて変動する挙動が検出できた。このことから、実橋かつ自然エネルギーによるIoT センシングにおいても、ひずみを検出できる可能性がわかった。しかし、鋼桁ひずみの値に関しては、室内実験で使用されるデータロガーのひずみ値との対比から整合性の合わないケースを一部確認しており、実用化には信頼性が低いと考えられる。そのため、今後はIoT センシングのシステムも含めて、誤差を少なくすることができる方法を検討していく。π型ひずみゲージによるひび割れ幅は、コンクリート床版の観察状況に合致する計測データが得られた。また、IoT センシングによるひび割れ幅の変動は、室内実験でも整合性が合うことを別途確認しており、実橋のモニタリング対象として問題ないと思われる。

当初、ひずみ計測機器類の一部メーカーからもIoT センシングによるひずみの計測は困難であると指摘を受けていた。しかし、本研究の検討から、一部の計測値の信頼性には課題が残ったが、自然エネルギーのみで3か月超のモニタリングにより、ひずみ変動を計測することができた。今後は、ひずみ値の整合性を確認して計測システムのアップグレードを進める。また、自然エネルギーとして太陽光だけではなく、他の自然エネルギー（例えば、風力、水力など）の活用も検討する。IoT センシングで得られたデータの活用イメージについて図-7 に示す。橋梁のインテリジェント化に向けて、IoT センシングで計測された物理量を、維持管理や損傷評価にどのように活かすか、具体的な検討を進める予定である。2023年3月末現在、既に立命館大学びわこくさつキャンパスの所在地である滋賀県からIoT センサ設置およびモニタリングが可能な対象橋梁のデータを取得している。上記に記載した課題は、今後は近畿圏内の橋梁を対象に検討を進めて、近畿圏内の市区町村の橋梁（特に財源が厳しい市区町村）の維持管理などに実用できるシステム開発に繋げていきたい。

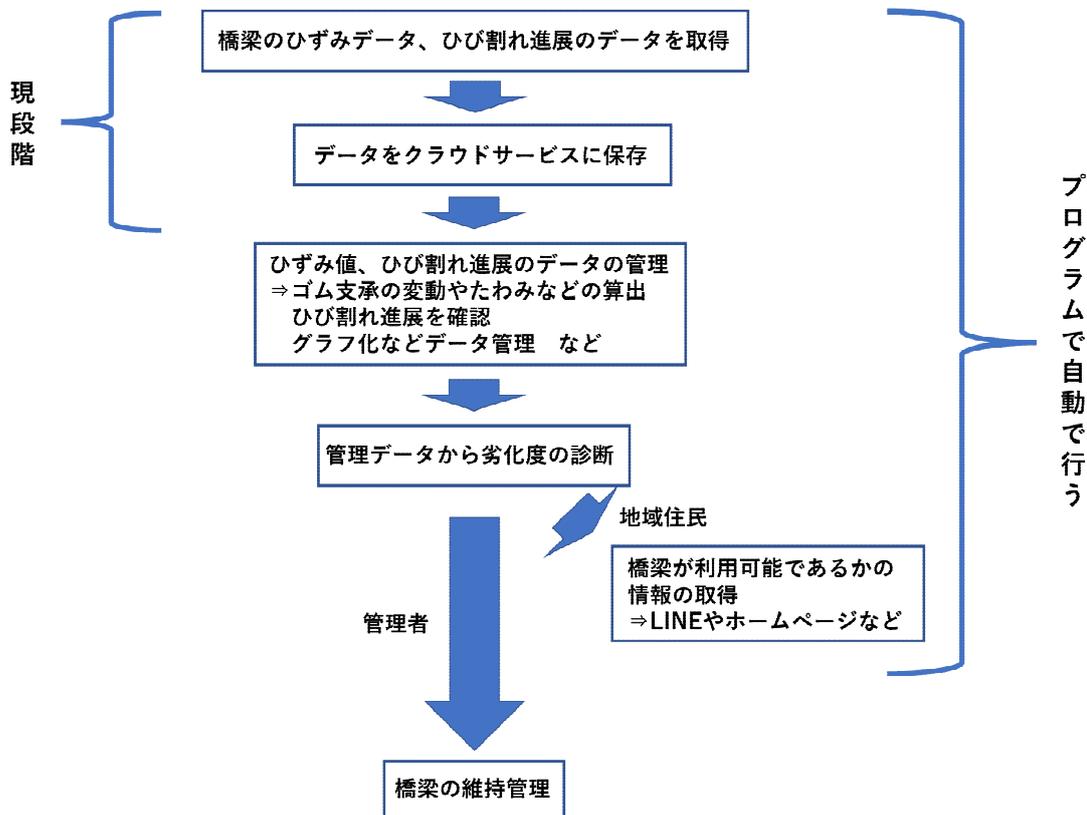


図-7 IoT センシングで得られたデータの活用イメージ