

TR-1066

橋梁モニタリングのための 低消費電力無線通信方式ガイドライン

Guidelines of Low Power Wireless Communication
for Bridge Infrastructure Monitoring

第1版

2017年3月7日制定

一般社団法人

情報通信技術委員会

THE TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY COMMITTEE

本書は、一般社団法人情報通信技術委員会が著作権を保有しています。
内容の一部又は全部を一般社団法人情報通信技術委員会の許諾を得ることなく複製、転載、改変、転用及びネットワーク上での送信、配布を行うことを禁止します。

目 次

<参考>	4
1. はじめに.....	5
2. 参考文書.....	5
3. 本ガイドラインの範囲と目的	5
4. 橋梁モニタリングに求められる機能	6
4.1 スケーラビリティ	6
4.2 稼働期間.....	6
4.3 計測可能振動数	6
4.4 地震検知.....	7
4.5 時刻同期.....	7
5. 橋梁モニタリング機器構成例	7
6. 橋梁モニタリング機器の機能条件	8
6.1 センサユニットの要求機能	8
6.1.1 振動波計測機能	8
6.1.2 地震検知及びデータ計測	9
6.1.3 駆動制御.....	10
6.2 ローカル管理設備の要求機能	11
6.2.1 センサユニットの設定	11
6.2.2 WAN 接続.....	11
7. エリアネットワークの要求条件	11
7.1 ネットワークの構築範囲	11
7.2 センサユニット間の時刻同期	11
8. 情報モデルとの関係	12

<参考>

1. 概要

本書は、橋梁モニタリングを、低消費電力無線技術を利用して実現した場合に、モニタリングシステムを構成する装置類やエリアネットワークに求められる要件を記述したガイドラインである。

2. 国際標準等との関連

本仕様書に関する国際勧告は無い。

3. 上記国際標準等との相違

本仕様書に関する国際勧告は無い。

4. 国際標準等に対する変更事項

なし。

5. 工業所有権

なし。

6. 改版の履歴

版数	改訂日	改版内容
1	2017年3月7日	制定

7. 標準作成部門

第1版：IoTエリアネットワーク専門委員会

8. 本書「橋梁モニタリングのための低消費電力無線通信方式ガイドライン」の制作体制

本書は、TTC IoTイノベーション推進委員会の橋梁モニタリングワーキング・パーティー[座長：丹康雄(JAIST)]において原案を作成し、その後TTC IoTエリアネットワーク専門委員会[委員長：北村和夫(NTT)]での審議を経てTTC技術レポートとしてとして制定するものである。

橋梁モニタリングワーキング・パーティーにおける検討では、ICTベンダに加え、センサーベンダや土木建築関係の有識者にも参加いただき、幅広い観点からご意見をいただいて原案の作成にあたった。

1 はじめに

高度経済成長期に集中的に整備された橋梁をはじめとする社会インフラは、老朽化が進みつつあり、倒壊のリスクが高まっている。「インフラ長寿命化計画」（平成26年8月 国土交通省）では、今後20年以内で、建設から50年以上を経過するインフラの割合が50%を超えることが示されている。また、「地方自治体管理橋梁の通行規制状況」（平成25年 4月 国土交通省）では、損傷や劣化などにより、通行車両の重量制限などを行っている橋梁数が年々増加傾向にあることが示されている。このため、点検による予防保全の強化などによる社会インフラの長寿命化が求められている。

インフラの維持管理には適切な点検が基本となるが、点検には目視、打音、測量等によるものと、センサを用いるものに大別できる。目視によるものは、点検の頻度やそれに係る人件費等で、継続的に比較的大きなコストがかかる。また、少子高齢化の時代において点検スキルをもった人材の継続的な確保も課題となる。これに対し、センサを利用した常時モニタリングを点検に対する補助的な手段として活用する事が考えられる。モニタリングの導入にはセンサ設置等の初期投資が発生するものの、その後の費用は低減できるため、長期的に見て予防保全が低コストで実現できると考えられる。また、モニタリングを用いた継続的な監視により、損傷や劣化の早期発見が可能となることが期待されている。

センサによる社会インフラの点検は数十年という長期安定稼働が求められる。そのため、現状はデータの送受信や電源供給にケーブルを用いることが一般的である。しかし有線方式でのデータ伝送や電源供給は、ケーブルの敷設と維持管理にコストがかかる上、災害時に断線するなどのリスクもある。こうした課題の解決のため、無線機能内蔵のセンサユニットを用いて、橋梁をはじめとする社会インフラのデータ収集・伝送を低消費電力で行うシステムの研究開発が進められている。無線によるセンシングを電池で長期間稼働することが可能になれば、有線方式における課題であったケーブル敷設コストや断線リスクも回避できる。

低消費電力の無線通信方式の普及を促進し、インフラ維持管理に広く展開するためには、通信方式の標準化が必要となる。また、通信方式やセンサの品質や安全性について一定の基準が標準化され、それが公開されることは、サービス自体の信頼性向上にも寄与する。これらにより、標準化された通信方式を利用した無線通信センサによるインフラ維持管理の普及促進が期待できる。

本ガイドラインはこのような背景から、無線機能内蔵のセンサユニットを用いた橋梁の維持管理のためのモニタリングシステムにおいて、低消費電力な通信方法に関するガイドラインと、モニタリングシステムの機能要件、品質や安定性についての指標を提供するものである。

2 参考文書

- [1]: 「橋梁定期点検要領」国土交通省 道路局 国道・防災課 2014年6月
(http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo3_1_6.pdf)
- [2]: 「道路橋定期点検要領」国土交通省 道路局 平成26年6月 (<https://www.mlit.go.jp/common/001044574.pdf>)
- [3]: 「橋梁振動モニタリングのガイドライン」第2版 平成13年2月28日発行 土木学会構造工学委員会橋梁振動モニタリング研究小委員会編集 社団法人土木学会発行 発売元：丸善(株) ISBN4-8106-0285-0
- [4]: TTC標準JJ-300.30 「橋梁モニタリング用加速度センサの情報モデル及び低消費電力無線通信における動作」

3. 本ガイドラインの範囲と目的

本ガイドラインは橋梁の振動モニタリングシステムに求められる機能を無線方式にて実現する際の、モニタリング機器とエリアネットワークに求められる要求条件について規定している。

本ガイドラインは、総務省の平成26年度開始研究開発プロジェクトのひとつである、「スマートなインフラ維持管理に向けたICT基盤の確立」で実施したフィールド実証実験等の成果を元に、橋梁モニタリングシステムに求められる機能を整理して公開することにより、実証で得られた知見の共有と、研究結果の普及推

進を目的とする。本実証実験では加速度センサを用いた橋梁の振動モニタリングを実施しており、本ガイドラインにおいても、振動モニタリングを対象としている。

4. 橋梁モニタリングに求められる機能

一般的に橋梁の健全性管理のための構造モニタリングには、局部モニタリングと全体モニタリングの2種類がある。局部モニタリングとは橋梁内の橋桁、床版、橋脚、ケーブルなど特定の部位や、コンクリート、鉄などの材質を集中してモニタリングし、橋梁の部分的な疲労度合いを計測するものである。これに対し、全体モニタリングとは構造物全体の健全性を評価するものであり、橋梁全体にわたってセンサを配置し、長期にわたって振動やひずみなどの計測を必要とする。国土交通省 道路局 国道・防災課が発行している「橋梁定期点検要領」[1]*¹、及び国土交通省 道路局発行の「道路橋定期点検要領」[2]*²によれば、橋梁の点検周期は5年と定められている。橋梁の劣化進行は非常に緩やかであることから、リアルタイムでのデータ収集や送信、分析といった仕組みではなく、日々の「健康診断」に近い簡易な状態把握の仕組みにニーズがあると考えられる。橋梁の健全性には大型車両の通行や地震等による振動が最も影響を与えることが知られている。そこで、各センサが個別に大きな振動や衝撃等を検出し、緊急性の高いデータのみリアルタイムで送信し、他のデータはパッチにて送信、といったデータの緊急性によって送信方式の切り替え制御を実現し電力消費を抑える仕組みが必要となる。

橋梁の振動モニタリングを自動化するにあたって、備えるべき機能を以下に示す。

4.1 スケーラビリティ

一般に橋梁とは、人や車両が川や谷、海、道路などの道路上の交差物を乗り越えるための構造物の事を指しており、その長さは数m程度の短いものから数kmもの長い橋も存在する。橋梁モニタリングシステムにおいては、長短あらゆる橋梁に対応でき、統一的にデータを取り扱う事ができなければならない。

4.2 稼働期間

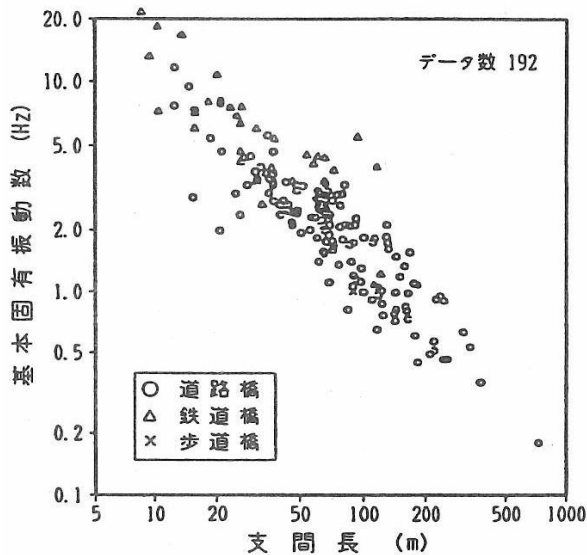
橋梁は管理者によって5年に一度の定期点検が義務付けられている。これに合わせ、橋梁モニタリングシステムにおいても5年間は人手による保守を必要とすることなく、無人で動作できなければならない。

4.3 計測可能振動数

橋梁全体を一つの構造物としてモニタリングする場合の固有振動数は、支間長など、さまざまな要因で決まる。図1は橋梁の支間長と固有振動数との関係を表しており概ね0.2Hz～20Hz程度の範囲である。橋梁の振動モニタリングにおいては、この振動数の範囲で正確に波形を計測できなければならない。

*1 「橋梁定期点検要領」[1]P.4 「定期点検は、供用開始後2年以内に初回を行い、2回目以降は、5年に1回の頻度で行うことを基本とする」とある。

*2 「道路橋点検容量」[2]p.1 「定期点検は、5年に1回の頻度で実施することを基本とする」とある。



出典：日本土木学会発行「橋梁振動モニタリングのガイドライン」[3]*3

図1 支間長と固有振動数の関係

4.4 地震検知

日本は地震大国であることから、地震の振動は大型車両の振動とは区別して検出できなければならない。地震等の災害発生時には、迅速にデータの収集・伝送を行うことが必要であり、橋梁モニタリングシステムは、地震の発生と振動に関する情報を橋梁の管理者に直ちに送信しなければならない。また、ある一定の規模以上の地震の揺れが発生した場合、地震による振動を一定時間計測できなければならない。これらにより、橋梁の管理者は、橋梁モニタリングシステムから送信された情報を元に、橋梁を通行止めにすべきか等を直ちに検討することができる。

4.5 時刻同期

橋梁モニタリングを構成する装置類は、標準時刻と同じ時刻情報を保持する必要がある。また、振動の波形を正確に計測する必要があることから、装置間の時刻も同期していなければならない。

5. 橋梁モニタリング機器構成例

本ガイドラインで取り扱う橋梁モニタリングシステムの機器構成の例を図2に示す。主桁にセンサユニット（加速度センサに無線通信機能を備えた装置群）を設置し、同じ橋梁内に設置されたローカル管理設備で各センサのデータを収集する。センサユニットを無線化することで設置工事を簡略化することができる。1径間毎の固有振動数やたわみを確認する場合は、1径間に最低1個（支承部と支承部間の最も振動する中間地点に1個ずつ）のセンサを設置する必要がある。また橋脚や橋台などの支承部の衝撃により段差、すきま、ゴム摩耗を確認するためには支承部の真上にセンサ設置することもある。

本書ではモニタリングデータの送受信には無線を用いた方式を対象としている。各装置の説明を以下に示す。

*3 「橋梁振動モニタリングのガイドライン」[3] p.207

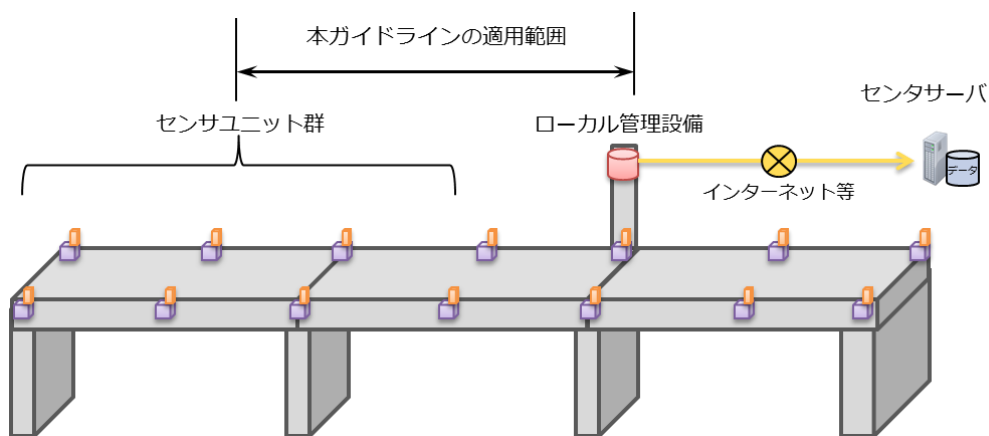


図2 橋梁モニタリング機器構成例

① センサユニット

加速度センサに無線通信機能を備えた装置群である。橋梁全体をカバーするだけの数が設置されている。情報をローカル管理設備に送信するとともにローカル管理設備からのコマンドを受信する。

② ローカル管理設備

橋梁内に設置され、当該橋梁内のセンサユニットからの情報を収集するとともに、各センサユニットの状態を監視する機能を持つ。インターネット等との接続機能を持ち、センサユニットから収集した情報をインターネットや携帯電話網等の外部ネットワーク経由でセンタサーバに送信する。

③ センタサーバ

ローカル管理設備からインターネット等を経由して受信したセンサユニットからの情報を蓄積、分析し、当該橋梁の状態を把握するシステムである。

6. 橋梁モニタリング機器の機能条件

本章では橋梁モニタリングを構成する装置の要求機能について規定する。

6.1 センサユニットの要求機能

6.1.1 振動波計測機能

センサユニットにおける振動センサの計測データは連続的に発生するため、全てを収集すると無線通信の増加による消費電力の増加、電波帯域の混雑、データ管理措置の一次蓄積メモリの増大などが発生し、モニタリングシステムへの影響が大きいことが考えられる。

一方、センサユニットではすべての振動データを24時間計測する必要はなく、一日の一定時間帯に、橋梁の構造に影響を及ぼすある一定の振幅以上の振動波を計測すれば、橋梁全体の健全性を判断できるとしている。

このため、橋梁モニタリングシステムは、センサユニットに振動波の振幅に対するしきい値を設定し、しきい値を超えた場合のみ計測データを送信する事で、消費電力やデータ量を適切な値に抑えることが出来る。但し、センサデータはしきい値を超えた瞬間の振動のみ計測するのではなく、しきい値を超えた時刻を中心とする前後最低でも数十秒間のデータを計測する。たとえば、30mの橋桁を時速60km/hで走行した場合、約2秒で通過するが、渋滞時は10km/hとなり通過に20秒かかる。余波も含めて余裕をもって計測するためには最低でも40秒間程度の計測時間が必要となる。図3に通常の振動発生時における振動波と計測時間との関係を示す。計測時間とこのしきい値は橋梁によって異なるため、センサユニットが持つしきい値としきい値を超えた場合のデータ計測時間はローカル管理設備経由で外部から遠隔で設定できることが必要である。

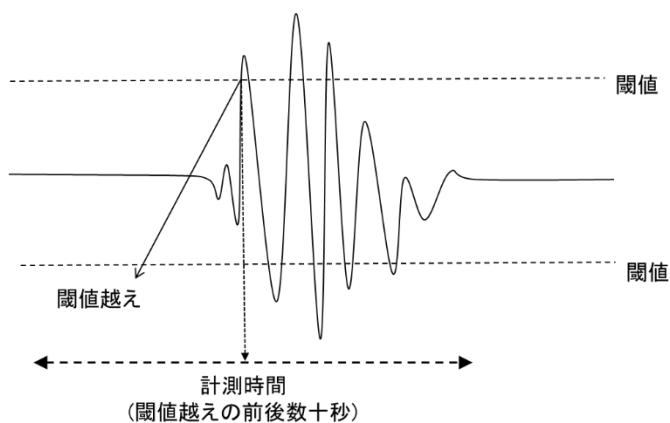


図3 しきい値と計測時間の関係

これより、以下の要求条件を制定する。

① 計測可能振動数とサンプリング周期

要求条件6.1.1-1 0.2Hz～20Hzの範囲の振動数を計測できなければならない(図1参照)

[振動波形をデジタル化する際のサンプリング周波数は、余裕をもって100Hz（1秒間に100回のサンプリング）程度であることが望ましい]

② 計測時間

要求条件6.1.1-2 ある一定の振幅しきい値を超えた時点の前後最低でも数十秒を計測できなければならない

要求条件6.1.1-3 しきい値は変更できなければならない

要求条件6.1.1-4 しきい値超過前後のセンサデータ計測時間は設定・変更できなければならない

6.1.2 地震検知及びデータ計測

橋梁に地震による大きな揺れをうけると、橋梁全体の健全性に重大な影響を与える場合がある。橋梁の管理者は地震発生時には直ちに橋梁の状態を把握し、しかるべき措置をとる必要があることから、センサユニットは地震による振動を通常的大型車両通行時の振動と区別し、そのデータを直ちに通報しなければならない。地震によるデータ計測では、地震による振動がある一定の振幅しきい値を超えた時点から計測を開始し、その後最低でも数十秒間を計測できなければならない。図4に地震発生時における振動波と計測時間との関係を示す。しきい値とその前後の計測時間は、ローカル管理設備からのコマンドにて変更可能であり、その値は通常的大型車両等の通行によるもとのとは区別して設定できなければならない。

これより、以下の要求条件を制定する。

① 地震検知通報機能

要求条件6.1.2-1 センサユニットは、地震による振動を他の振動とは区別して検知できなければならない。

要求条件6.1.2-2 センサユニットは地震による振動を検知すると、ただちにローカル管理設備を経由して橋梁管理者に通報しなければならない。

③ 地震による振動計測機能

要求条件6.1.2-3 地震発生時の計測は、地震のしきい値を超えた時点から最低数十秒後までを計測できることとし、計測時間は変更できなければならない。

要求条件6.1.2-4 地震発生時の計測開始契機となるしきい値は、通常のしきい値とは区別して設定し、その値は変更できなければならない。

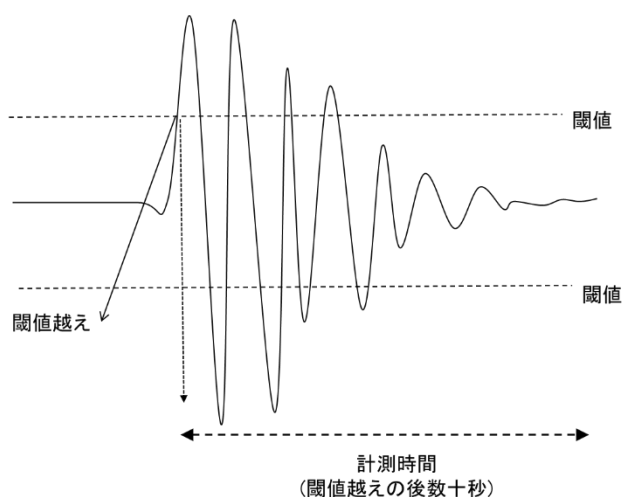


図4 地震発生時のしきい値と計測時間

6.1.3 駆動制御

電池駆動のセンサユニットが電池の消耗を抑えるための一手段として、通常の起動モードと電力消費が少ない待機モードを持ち、適宜切り替えを行う方式が考えられる。今回の実証実験では、交通量の少ない時間帯は待機モードに切り替え、地震の検知に最低限必要なレベルまでサンプリング周波数を下げる等の制御を行い、成果を確認した。無線センサユニットを用いた橋梁モニタリングシステムにおいては、同様の駆動制御が求められる。

要求条件6.1.3-1 センサユニットは起動モードと待機モードの切り替え機能を持たなければならない

6.1.4 駆動期間と送受信データ量

社会インフラの維持管理要件とフィールド実証実験の成果を踏まえ、センサユニットが5年間の稼働期間内において1日に送信できるデータ量は、数百キロバイト程度とする。

要求条件6.1.4-1 センサユニットは電池で動作しなければならない

要求条件6.1.4-2 センサユニットは、5年間電池交換することなく動作できなければならない

要求条件6.1.4-3 センサユニットは1日あたり数百キロバイト程度のデータを送受信できなければならない

6.2 ローカル管理設備の要求機能

6.2.1 センサユニットの設定

ローカル管理設備はセンサユニットの持つ以下の値を設定・変更する機能を持つ。

- 要求条件6.2.1-1 大型車両通行時の振動の振幅しきい値を設定・変更できなければならない
- 要求条件6.2.1-2 地震発生時の振幅しきい値を設定・変更できなければならない
- 要求条件6.2.1-3 大型車両通行時の計測時間を設定・変更できなければならない
- 要求条件6.2.1-4 地震発生時の計測時間を設定・変更できなければならない
- 要求条件6.2.1-5 時刻情報を設定・変更できなければならない

6.2.2 WAN 接続

ローカル管理設備は、インターネット等の外部のネットワークに接続する機能を持つ

- 要求条件6.2.2-1 ローカル管理設備は、3G、LTE回線等を通じて外部のネットワークに接続する機能を持たなければならない。

7. エリアネットワークの要求条件

本章では橋梁モニタリングシステムを構成するエリアネットワークの要求条件について規定する。本章で定義するエリアネットワークとは、センサユニット群とローカル管理設備で構成されるネットワークであり、一つの橋梁全体をカバーするものである。（図5参照）

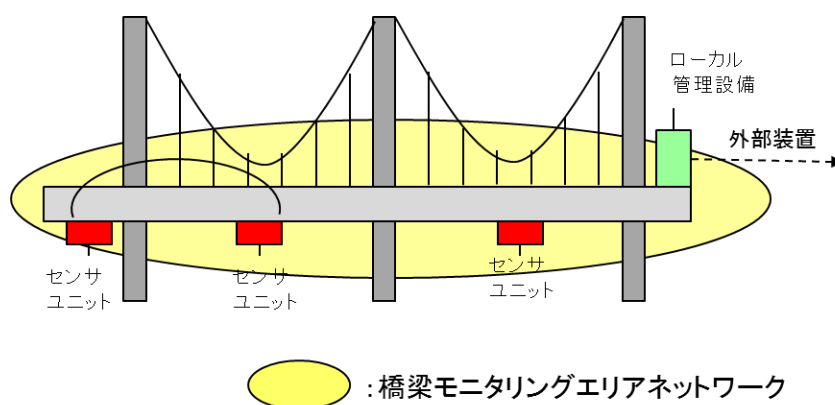


図5 橋梁モニタリングエリアネットワーク

7.1 ネットワークの構築範囲

橋梁モニタリングシステムを構成するエリアネットワークは、橋梁の長短に従って数mから数kmまでの範囲をカバーする必要がある。センサユニットの電波がローカル管理設備まで届かない場合は、橋梁の全エリアをカバーするためにセンサユニット間でのパケットリレーによるマルチホップ通信が推奨される。

- 要求条件7.1-1 エリアネットワーク内においては、全てのセンサユニットがローカル管理設備との通信を無線で行えるよう、エリアネットワークを構築しなければならない。

7.2 センサユニット間の時刻同期

異常な振動を抽出・検知し、その原因を特定又は推定するため、複数個所にセンサを配置する必要があるが、それらのセンサ群はその時刻が高精度に同期されていないといけない。一般的に30m以上の橋げたを

持つ橋梁の固有振動数は3Hz程度である(図1参照)。橋梁には複数のセンサが配置されているため、センサ間で波形の位相を正確に認識するためには、センサ間の時刻によるずれは一つの波形の5分の1に抑える必要がある。これにより、センサユニット間の時刻の誤差の範囲を15分の1秒以下とする。

要求条件7.2-1 エリアネットワーク内のセンサユニットが持つ時刻情報のずれは15分の1秒以内に抑えなければならない。

要求条件7.2-2 時刻情報はローカル管理設備が保持し、ローカル管理設備はエリアネットワーク内の全てのセンサユニットに対して時刻補正の機能を持たなければならない。

8. 情報モデルとの関係

本ガイドラインで記載されている装置類（センサユニット、ローカル管理設備）で取り扱う情報モデルはTTC JJ-300.30「橋梁モニタリング用加速度センサの情報モデル及び低消費電力無線通信における動作」[4]で規定されている。本ガイドラインで規定した要求条件と情報モデルとの関係を表1に示す。

表1 情報モデルとの対応表

対象	要求条件	関連する情報モデル
センサユニット	要求条件6.1.1-1	6.4.1, 6.4.3, 7.3.2, 7.3.7
	要求条件6.1.1-2	6.4.3, 7.3.7,
	要求条件6.1.1-3	6.4.3, 7.3.7
	要求条件6.1.1-4	6.4.3, 7.3.7
	要求条件6.1.2-1	6.4.3, 7.3.7
	要求条件6.1.2-2	6.4.3, 7.3.5
	要求条件6.1.2-3	6.4.3, 7.3.7
	要求条件6.1.2-4	6.4.3, 7.3.7
	要求条件6.1.3-1	6.4.2
	要求条件6.1.4-1	6.4.5
	要求条件6.1.4-2	6.4.5, 7.3.4
	要求条件6.1.4-3	7.3.2, 7.3.3, 7.3.4
ローカル管理設備	要求条件6.2.1-1	7.3.7
	要求条件6.2.1-2	7.3.7
	要求条件6.2.1-3	7.3.7
	要求条件6.2.1-4	7.3.7
	要求条件6.2.1-5	7.3.1
	要求条件6.2.2-1	None
エリアネットワーク	要求条件7.1-1	None
	要求条件7.2-1	6.4.1, 7.3.1
	要求条件7.2-2	7.2.1, 7.3.1