

神戸港における陸閘の遠隔操作・監視化の推進

大待 達郎¹

¹神戸市港湾局ウォーターフロント再開発推進課 (〒650-0046 兵庫県神戸市中央区港島中町4-1-1)

神戸市では、神戸港における南海トラフ巨大地震に伴う最大クラスの津波に対する防災・減災対策の一環として、陸閘の遠隔操作システム及び、遠隔監視システムの整備を進めている。遠隔操作システムはJ-Alertをトリガーとして60分以内に全ての対象陸閘を自動的に閉鎖する。遠隔監視システムはLPWAの無線通信規格の一つであるLoRaWANTMを活用することで、対象陸閘の閉鎖状況を迅速かつ確実に把握するものである。これらのシステムは、神戸市職員が指定のタブレットから閉鎖状況を任意の場所、時間で確認することが可能であり、遠隔操作対象陸閘は開閉操作も可能な神戸市オリジナルの津波防災IoTである。

キーワード 陸閘の遠隔化, 防災, リスク

1. 背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震に伴う津波による巨大災害を受け、2011年9月に取りまとめられた中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告」では、今後の津波対策を構築するにあたり、二つのレベルの津波を想定する必要があることが示されたり、一つは、後述する最大クラスの津波に比べて発生頻度は高く、津波高は低いもの大きな被害をもたらす津波（レベル1津波）、もう一つは発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波（レベル2津波）である。

神戸市では、今後30年以内に70～80%の確率で発生が予測されている南海トラフ巨大地震に伴う最大クラスの津波から堤内地の人命・財産に関わる被害の防止・低減を図るため、1960年代後半から進めてきた全長約60kmに渡る高潮対策事業によりレベル1津波の対応は可能となっており、レベル2津波対策として2015年度より海岸保全施設の破堤等の防止、堤内地の浸水深を30cm以下とすること等を目的に整備を進めている²。

一方、神戸港は1868年の開港以来、東洋を代表する貿易港として栄え、また神戸市は国内随一の工業都市として発展してきた経緯があるため、現在でも海岸沿いには多数の地元企業等が立地している。したがって先述の高潮対策事業では、津波・高潮から堤内地の浸水被害を防止・軽減すると共に、商業・工業活動に支障を生じさせないために、神戸港海岸沿いに数多くの陸閘を整備した。台風等に伴う高潮時には神戸市職員や地元企業等の社員、地域の方々等で構成される陸閘閉鎖作業従事者（以降、閉鎖作業者）が協力し、陸閘の事前閉鎖に当たってきた。

他方、事前に発生の予測が困難である大規模地震に伴う津波に対しては、津波到来の予測が高潮と比べて困難であることや、南海トラフ巨大地震に伴う最大クラスの津波が地震発生後から約90分で神戸港海岸に到達することが予測されている中、全ての陸閘を確実に閉鎖すると共に、閉鎖状況を迅速に確認することは極めて困難であることが予想される。加えて、東北地方太平洋沖地震直後には閉鎖作業者が津波に巻き込まれて亡くなった例が多くあったこと等から、閉鎖作業者の身の安全を確保する必要がある。

以上より、神戸市は閉鎖作業者の身の安全を確保し、陸閘の確実な閉鎖、及び閉鎖状況を可能な限り迅速かつ正確に把握するため、インフラ整備による津波災害リスク低減の実現に向けて検討を行い、後述する神戸港における陸閘の遠隔操作システム及び遠隔監視システムの整備を実施する運びとなった。

2. 神戸港における陸閘の遠隔操作・監視の特徴

本章では、神戸港における陸閘の遠隔操作システム及び遠隔監視システムの特徴について概説する。

神戸市では2015年度に先述の約半世紀に渡る海岸保全施設を対象とした高潮対策事業を完了している。2015年度にはレベル2津波対策事業の本格着手に移行したが、時をほぼ同じくして神戸港における陸閘の遠隔操作・監視化事業の検討を開始した。事業完了に伴う防災・減災効果を確認した上で、国土交通省及び総務省から防災・安全交付金や東北地方太平洋沖地震を契機に創設された緊急防災・減災事業債を活用した整備事業認可を頂き、2018年度に本格的に工事着手した。2021年現在も整備を

進めているところであり、整備完了は2024年度を予定している。

神戸市では神戸港における陸閘の遠隔操作・監視化事業の検討をする上で、整備後の防災・減災機能を確保しつつ、可能な限り安価で整備・運用できることに重きを置いた結果、次のように整備・運用方針を固めた。

- a) 整備にあたっては日頃の開閉状況や現場環境等を鑑み、陸閘の遠隔操作と遠隔監視に区分して整備すること
- b) 遠隔操作の整備においては、陸閘の安全かつ確実な閉鎖を最優先すること
- c) 遠隔監視の整備においては、整備費用を可能な限り安価にすると共に、公共インフラ主体が提供する通信網を活用することで確実な監視体制を構築すること
- d) 運用面では昨今注目されているIoT (Internet of Things : 物のインターネット) を前提とすることで、確実な遠隔操作・監視を実現すると共に運用単価の軽減を図ること

c)については、LPWA (Low Power Wide Area : 省電力広域無線) の活用について本格検討を行い、西日本電信電話株式会社管内において株式会社エヌ・ティ・ティ・ネオメイトが提供するLPWAの無線通信規格の一つであるLoRaWAN™ (Long Range Wide Area Network) を活用することとした。詳細は第4章にて後述するが、LoRaWAN™は整備費用を安価に抑えつつ、少量の情報を比較的離れた場所に多角的に伝送できる特徴を持つ。

次に、d)に関するIoTに関する国内の動向として、2016年4月20日に改正された特定通信・放送開発事業実施円滑化法の附則では、「インターネット・オブ・シングスの実現」を「インターネットに多様かつ多数の物が接続され、及びそれらの物から送信され、又はそれらの物に送信される大量の情報の円滑な流通が国民生活及び経済活動の基盤となる社会の実現」として定義された。これらの動向も鑑み、神戸市では指定のタブレットを用いて職員が時間・場所を問わずに陸閘の開鎖状況を迅速かつ確実に把握すると共に、遠隔操作対象陸閘に対しては遠隔地から開閉操作ができる仕様とした。図-1に、タブレットを用いた神戸港における遠隔操作・監視システムの概念図を示す。

東北地方太平洋沖地震や今後の発生が予測されている南海トラフ巨大地震に対する津波防災・減災事業の一つとして、陸閘の遠隔操作システムを導入している自治体はいくつか存在する²⁹⁾が、津波防災・減災事業で上記に基づいた本格整備・運用を開始したのは全国で神戸市が初めてのことであり、これは兵庫県南部地震を経験した神戸市のオリジナルアイデアである。

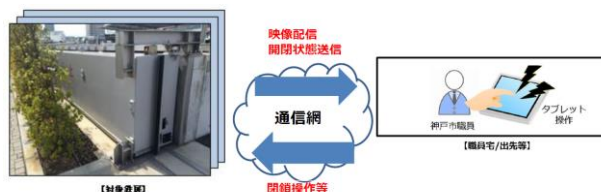


図-1 タブレットを用いた陸閘遠隔操作・遠隔監視システムの概念図

3. 神戸港における陸閘遠隔操作システムの概要

本章では、神戸港における陸閘遠隔操作システム（以下、操作システム）について概説する。操作システムの構成図を図-2に示す³⁰⁾。操作システムは南海トラフ巨大地震等に基づき気象庁から大津波警報または津波警報が発令されると同時に起動する全国瞬時警報システム（以下、J-Alert）をトリガーとして、仮想化サーバー（APサーバー）からの指示を光主回線を介して図-3右下に示す遠隔制御操作盤が受けた上で、次のような各種制御が実施可能となる。

- a) 陸閘近傍に設置された多設備柱に取り付けられた回転灯の点灯及び4か国語（日本語・英語・中国語・韓国語）による警告放送の鳴動（図-3左上）に基づいた避難時間の確保を伴う呼びかけ
- b) a)の動作が30分間実施された後、30分以内に全ての陸閘の閉鎖の実施による、津波到来までに余裕を持った閉鎖完了の実現
- c) 陸閘閉鎖中に指定のタブレットまたは神戸市港湾局執務室に設置された制御PC付きモニター画面（以下、タブレット等）に映し出される現地カメラ映像を神戸市職員が確認し、一時停止をする必要があると判断した場合は、タブレット等から任意に閉鎖動作を一時停止するために操作することが可能
- d) 陸閘閉鎖中に車両等が通過し、陸閘と接触すると同時に陸閘側面に設置された図-3左下に示す挟まれ防止センサーが感知した場合は、閉鎖動作が一時停止
- e) c)またはd)の後、神戸市職員が指定のタブレット等に映し出される現地カメラ映像を確認し、安全を確認した後に閉鎖再開指示が可能

以上の各種制御は、図-2に示す遠隔操作システム構成図に沿って実施される。なお、図-2に示す各陸閘は2018年度予算での整備対象のみ抜粋して掲載しており、本稿では簡単のためこれらの陸閘のみを解説の対象とすることに留意されたい。神戸市中央区内の各陸閘と後述する中継局及び神戸市役所本庁舎の位置関係を図-4に示す。

また、操作システムの構築に伴い、次の点に留意して整備を進めることとなった。

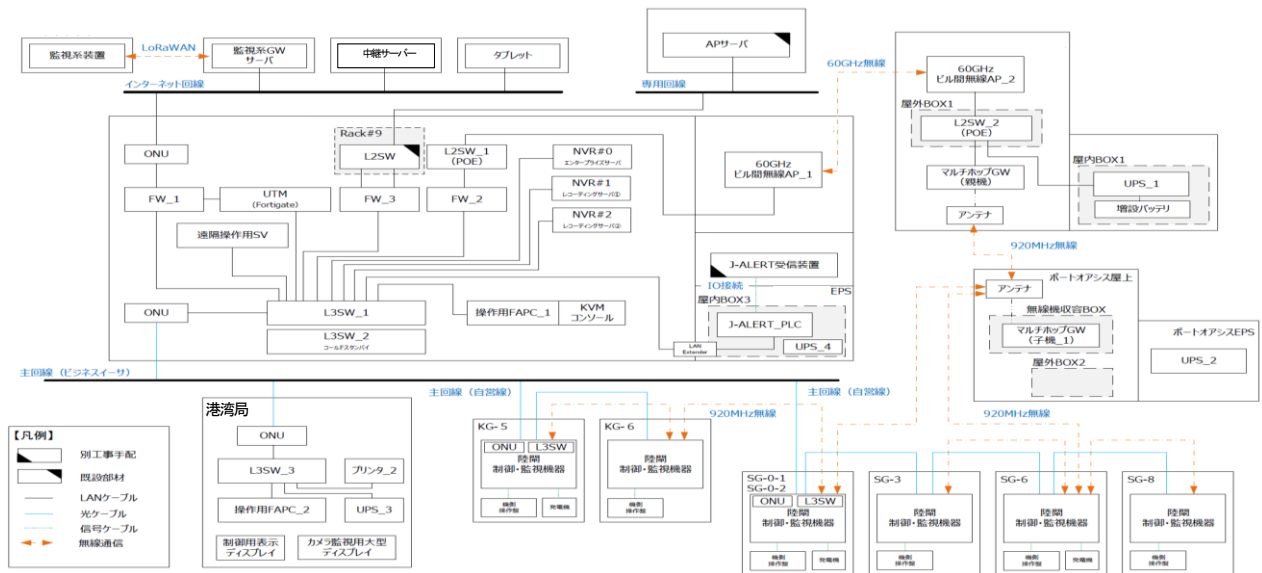


図-2 陸間の遠隔操作システム構成図

- f) 遠隔操作化には陸間の電動化が必須となるため、電動化が完了していない陸間に対して電動化工事を実施するとともに、各種機器を堤内地に設置することで津波・高潮による機器の被害発生確率の低減を図ること
- g) 南海トラフ巨大地震等の大規模地震の影響により、開閉指示信号が陸間に至るまでに経由する光主回線が断線する可能性があるため、神戸市役所から図-4内に示す中継局を介して各陸間近傍に設置された多設備柱に取り付けられた920MHz帯無線アンテナに開閉指示信号が伝達される仕様とすることで、陸間閉鎖の確実性を向上させること
- h) 920MHz帯中継局アンテナにはマルチホップ機能を有するGW（ゲートウェイ）をUPSと共に併設することで、各陸間への閉鎖指示信号に連動性を常時持たせると共に、中継局アンテナの整備を最小限に留めること
- i) 大規模地震によって有線による電力供給が滞る可能性があるため、複数の陸間で構成されるグループ毎に閉鎖に必要な電力を貯蔵した非常用発電機（図-3右上）を設置し、陸間の自動閉鎖を確実なものとする
- j) i)については、有線による受電が確認されなければ、直ちに受変電切替盤（図-3右上）を介して非常用電源に切り替える仕様とすること
- k) 遠隔操作化に伴い陸間の休止フックを廃止する場合は、動力と繋がるサイクロ減速機と車輪との間に設置された電磁クラッチが停電時も含めて常に減速機と接続された状態とすることで、神戸市が意図しない陸間の開閉を防ぐこと

なお、操作システム及び次章以降で説明する遠隔監視システムはインターネット網を通じた陸間の閉鎖操作・監視に関する通信が行われるため、外部からの不正なアクセスを防止するためにセキュリティの確保が重要となるが、これらについては第5章内で解説する。



図-3 遠隔操作対象陸間及び周囲の各種機器

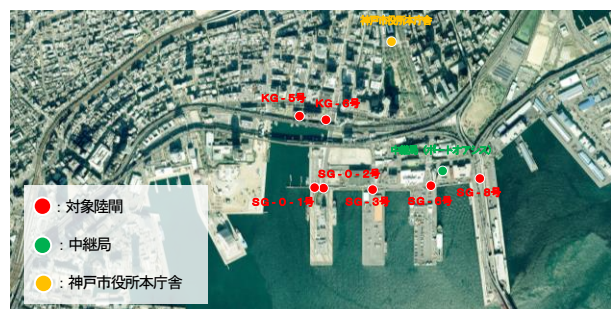


図-4 本稿で対象とする操作対象陸間と中継局等の位置関係図

4. LPWAに関する既往研究等の整理

本章では、神戸市が全国に先駆けて津波・防災の本格実装に適用したLPWAおよびLPWAの無線通信規格の一つであるLoRaWAN™に関する既往研究等を整理し、LPWAの有用性を確認する。

Fei Guらは、LPWAに関する概説を行った⁶⁾。LPWAは2017年時点で、IoTにおける無線通信手法として、全世界における利用の約25%を占めており、2017年現在のLPWAに起因する収益額は全世界で7千億米ドルを超えるなど、年々需要が高まっていることが示されている。LPWAは図-5に示すように他の無線通信手法と比べ、単位時間当たりの通信速度は最大でも100Bps程度と低いものの、理想的な条件下では10km以上の通信距離を有する。また、通信速度が比較的高いLTE等の無線通信手法と比べ、初期投資を安価に抑えることができるため、少量かつ広域のデータ通信が必要な用途での利用に適することが示されている。LPWAの中でも、LoRaWAN™は最も優れた物理層プロトコルの一つとされており、1GHz以下の周波数帯で最大250バイトのデータ通信が可能である。また、変調方式としてスペクトラム拡散変調を採用しているため、秘匿性や省電力性、多元接続性に優れている。加えて、LoRaWAN™は無免許で利用できる無線通信規格であることからIoTでの利用を検討する際のハードルが低いことなど、様々な長所が示されている。

Dae-Young Kimらは、LoRaWAN™によるネットワーク通信の頑健性（ロバストネス）の向上を目的として、LoRaWAN™ネットワーク上のデータレートを効率的に調整するための手法を提案した⁷⁾。データレートの調整はLoRaWAN™ネットワークの頑健性向上に寄与するが、送信割合、受信信号の強さ、データセッションの長さなど、ネットワークの混雑状況を示す各種パラメータと、実際のネットワーク上の混雑状況を回帰分析に基づき明らかにすることで、最適なデータレート調整が可能となり、ひいてはネットワークの頑健性を最大限に高めることができる可能性を示唆している。現在、我が国におけるLoRaWAN™は黎明期から成長期にあたる時期にあるため、神戸港における陸隔監視システムはデータレートを一定としても問題ないが、今後のLoRaWAN™需要拡大後も安定的に無線通信が可能となることが示唆される。

小林らは、LPWAを用いた市街地でのリアルタイム浸水モニタリングに関する研究を行った⁸⁾。小林らは、気象や土地利用の変化等により頻発、激甚化する水害に対応するため、2013年以降の度重なる水防法の改正に基づき、大規模地下街や要配慮者利用施設等において策定が義務化された避難確保計画及び浸水防止計画に注目した。計画策定の際には、大量の止水板設置や入場規制実施の最適化が重要となるが、対応者が内水氾濫に伴い、非常体制へ移行する際の意思決定を迅速に行うためのツールとして、LPWA無線通信規格の一つであるLoRaWAN™を

用いたセンサーが有効であることを示している。また、LoRaWAN™の有効性を実証するために、横浜市西区の横浜駅近くのビルにLoRaGW（ローラゲートウェイ：LoRa基地局）を、河川や排水溝等に複数のセンサーをそれぞれ取り付け、2018年8月8日～12月16日までの131日間に渡るケーススタディを実施し、水位上昇に伴うセンサー検知の信頼性を付近の潮位計の記録等と照らし合わせることで確認した。このケーススタディでは、風雨やゴミの影響が誤検知に繋がった事例が散見されたことから、これらの解決を今後の課題として整理している。ただし、神戸港における陸隔遠隔監視システムでは次章にて後述するマグネット式接点センサーを介して開閉状況を確認するため、整備にあたって特段の支障はない。

福岡市は、2017年7月から2020年3月にかけて、西日本電信電話株式会社及び株式会社エヌ・ティ・ティ・ネオメイトらと共に、福岡市内にLoRaGWを複数配置することで「Fukuoka City LoRaWAN™」という名のLPWAネットワークを構築し、IoT実証実験用に企業や団体への提供を行った⁹⁾。福岡市は防災のみならず、子供や高齢者の見守り、農業、交通、設備機器等、様々な用途への実証可能性を明らかにした。

以上の既往研究等から、LPWAは神戸港における陸隔の遠隔監視システムへの適用有用性が確認された。

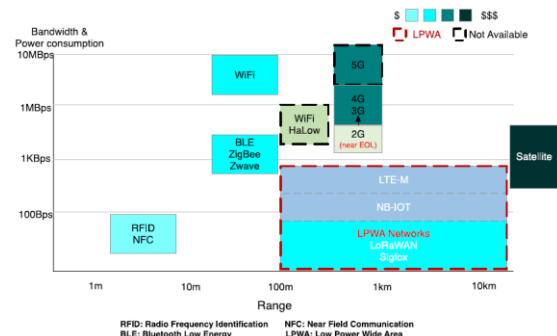


図-5 各無線通信手法の通信速度と電波伝達距離⁹⁾

5. 神戸港における陸隔遠隔監視システムの概要

本章では、前章で確認されたLPWAの有用性を前提とした神戸港における陸隔遠隔監視システム（以下、監視システム）について概説する。監視システムの構成図を図-6及び図-7に示す¹⁰⁾。なお、これらは図-2に示す操作システム構成図から監視システム部分を抜粋したものに相当する。監視システムは各陸隔に取り付けたリードスイッチ内蔵マグネット式接点センサーの陸隔開閉感知情報を、図-8に示すアンテナ内蔵型LoRaWAN™通信モジュールを起点とし、神戸市内に設置されたLoRaGW（ARIT T.108に定める特定小電力無線局）へ、免許不要無線帯域である920MHz帯を利用したLoRaWAN™環境を利用することで開閉情報が伝送される。なお、センサーからLoRaGWへのデータ伝送が失敗した場合に備え、

MAC再送が5秒間隔で8回実施される。

次に、LoRaGWからインターネット網を通じて神戸市役所本庁舎に設置されたLoRaGWサーバーに開閉情報が伝送され、特定のIPアドレスに従い、DMZである仮想化サーバー（APサーバー）に開閉情報が伝送される。なお、LoRaGWサーバーではNAT機能を有する複数のファイアウォール（FW）やUTMを関所として設けることで、IP（第3層プロトコル）上で神戸市LANをインターネットを通じて侵入する不正なアクセスから守ると共に、L3スイッチを介して正しいデータ伝送を実現している。

APサーバーまで伝送された開閉情報は、神戸市職員が所有する指定のタブレットで確認することができる仕様となっており、職員は常に陸開の開閉情報を確認することができるため、監視事務所の設置が不要となり、経済的かつ確実な陸開の開閉状況の確認が可能となる。実際のタブレット画面の例を図-9に示す。

陸開へのLoRaWAN™通信モジュールの設置例を図-10に示す。実際の設置作業は、電波調査結果や陸開の形式等、各所の実情に合わせて行った。なお、電波調査は監視システムにおける物理層プロトコルの具体的な仕様を決定する際に極めて重要であり、災害という一刻を争う事象における開閉情報の伝送確率向上に大きく寄与するものである。また、監視システムでは気象状況や陸開周辺の多用な環境に対応するため、神戸市内各所にて複数のLoRaGW設置を進めており、監視システムの頑健性向上を図っている。

LoRaWAN™による電波伝送状況を確認するため、2019年度に遠隔監視整備した陸開の内、簡単のため神戸市兵庫区内の陸開に設置されたセンサーを対象とした電波調査結果を基に、開閉情報伝送状況を定量的に観察した。対象とする陸開の位置、名称及び近傍LoRaGWの位置、名称を図-11に示す。LoRaGWと各陸開に取り付けられたセンサー間での電波調査の結果を図-12に示す。また、電波調査判定基準を表-1に示す。これらより、全てのセンサーからの開閉情報がLoRaGW及び各種サーバーへ高い確率で伝送されることが改めて確認され、同時に神戸市職員が指定のタブレット等を通じて陸開の開閉状況を確認することが可能となることが裏付けられた。なお、具体的な整備は本調査結果に基づき実施されたことを付記しておく。

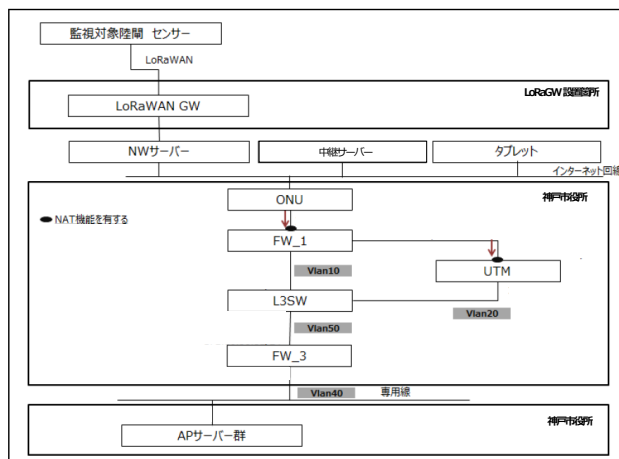


図-7 陸開の遠隔監視システム構成図2

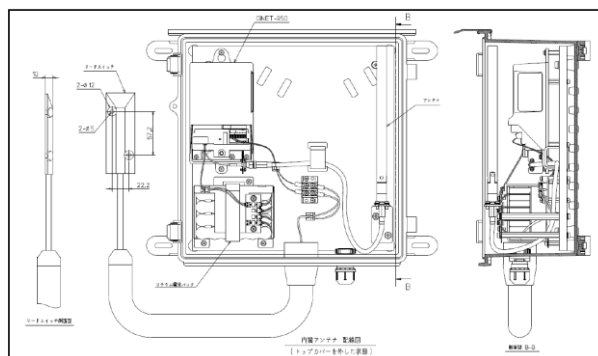


図-8 アンテナ内蔵型LoRaWAN™通信モジュール

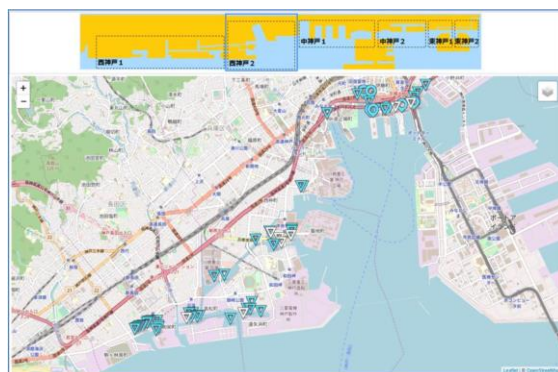


図-9 実際のタブレット画面の例



図-10 LoRaWAN™通信モジュールの設置例

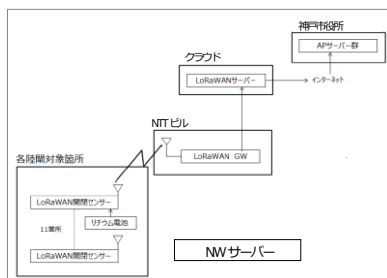


図-6 陸開の遠隔監視システム構成図1



図-11 本稿で対象とする陸閥及びLoRaGWの位置・名称

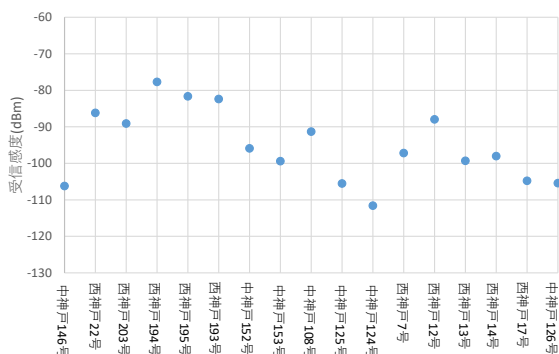


図-12 電波調査結果

表-1 電波調査判定基準

判定	受信感度平均値 (dBm)	解説
-	-122未満	接点情報を1回送信で成功する確率が低い、電波の緩慢なレベル変動により、一時的に再送を行っても通信が成功しない場合がある。
△	-114未満	接点情報が1回送信で成功する確率が高くなる。電波の緩慢なレベル変動の影響を受けにくい。
○	-114以上	接点情報が1回送信で成功する確率が高い。電波の緩慢なレベル変動の影響を殆ど受けずに、安定した通信が可能。
◎	-105以上	非常に良好な通信が可能。

6. まとめ

本稿では、南海トラフ巨大地震に伴うレベル2津波対策事業の一環として神戸市が整備を進めている、神戸港における陸閥の遠隔操作・監視システムについて概説した。操作システムは、J-Alert受信から60分以内に全ての対象陸閥を、南海トラフ巨大地震発生後でも確実に自動閉鎖できるものであり、2024年度の整備完了を予定している。また、監視システムは、LPWAの無線通信規格の一つであるLoRaWAN™を採用することで、陸閥の閉鎖状況を確実に確認できるものであり、整備コストを安価に抑えることも可能であるため経済的である。これらのシステムは指定のタブレット等を通じて陸閥の閉鎖状況を確認し、遠隔操作対象陸閥については任意の時間、場所において神戸市職員による開閉操作が可能であるため、神戸市は津波防災IoTを構築した点で新規性を有する。また、神戸市では兵庫県南部地震から24年目の2019年1月17日に、久元喜造市長主導の下、陸閥の遠隔操作・遠

隔監視に関するデモンストレーションを行い、メディアを通じて地域に本事業について発信した。

神戸市では2020年1月より順次上記システムの運用を開始しており、南海トラフ巨大地震に伴い神戸港海岸への来襲が危惧されるレベル2津波に対応する体制を構築し、津波災害リスクの低減を図っている。しかし、真の津波防災リスクの低減は上記のようなハード整備だけでは十分ではない。真の津波防災リスクの低減を実現するためには、神戸市職員や地元企業等の社員、地域の方々等、閉鎖作業者が可能な限り身の安全を確保しつつ、確実な陸閥閉鎖に向け、津波避難訓練や陸閥閉鎖訓練等を通じて津波防災意識を高めるなど、ソフト面での対策も継続的に実施することが重要である。

異動に伴う対応

著者は2020年5月21日付で、神戸市港湾局海岸防災課から神戸市港湾局ウォーターフロント計画課に人事異動しているため、本稿の内容は著者の前所属での業務内容に関連したものとなっている。なお、同課は2021年4月1日付の組織改正に伴い、神戸市港湾局ウォーターフロント再開発推進課となっている。

謝辞：本稿は、神戸港における陸閥・水門の遠隔操作・監視化に係る設計・整備にご尽力いただいた西日本電信電話株式会社、株式会社エヌ・ティ・ティ ネットワーク、大井電気株式会社、オムロン ソーシャルソリューションズ株式会社、株式会社ニュージェック、本稿に対する助言を頂いた広島大学大学院先進理工系科学研究科所属の布施正暁准教授、その他関係する全ての方々のご協力の下完成しました。ここに深く御礼申し上げます。

参考文献

- 国土交通省国土技術政策総合研究所，国総研プロジェクト研究報告第52号，2016
- 神戸市みなと総局（現：神戸市港湾局），神戸港南海トラフ巨大地震に伴う津波対策計画，2015
- 岩手県，岩手県 水門・陸閥自動閉鎖システムパンフレット，2017
- 静岡県清水港管理局ほか，清水港防災ステーションシステムガイド，2007
- 株式会社ニュージェック，神戸港水門・陸閥等遠隔操作・監視設備工事実施設計書，2018-2020
- Fei Gu et al., Survey of the low power wide area network technologies, Journal of Network and Computer Applications, 149, 102-159, 2020
- Dae-Young Kim et al., Adaptive data rate control in low power wide area networks for long range IoT services, Journal of Computational Science 22, 171-178, 2017
- 小林亘ほか，LPWAを用いた市街地でのリアルタイム浸水モニタリングに関する研究，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.75, No.1, 36-47, 2019
- 福岡市経済観光文化局，Fukuoka City LoRaWAN™ホームページ，2017
- 西日本電信電話株式会社，神戸港水門陸閥監視システム設計及び整備業務詳細設計書，2019-2021