

# IoT 向け NerveNet によるエッジ処理を用いた即時展開型地震観測システムの研究開発

佐藤剛至<sup>†1</sup> 天間克広<sup>†1</sup> 内田直希<sup>†2</sup> 平原聡<sup>†2</sup>

**概要:** 本研究では、主に大地震後に行われる即時展開が必要な地震観測において、これまで難しかった多地点からの地震センサーデータのリアルタイム取得を可能にするため、新たに IoT 向け NerveNet に接続した即時展開型地震観測システムを開発する。センサーデータとしては比較的大容量の地震センサーデータを、LPWA 等の IoT 向け無線通信上で伝送するために、NerveNet に搭載されるサーバ機能を用いて地震イベントの検知・地震データ切り出し等のエッジ処理を実施することで、LoRa のような低速かつ低消費電力な無線通信上でも地震の発生状況等の即時把握を可能とする。また、開発したシステムは、2018 年春に地震が起きると推定されている岩手県釜石市周辺に設置し、実用性を確認する予定である。

**キーワード:** 耐災害ネットワーク, IoT, エッジコンピューティング, NerveNet

## 1. はじめに

### 1.1 即時展開型地震観測システムの必要性

無線伝送技術の長所の 1 つとして、既存のインフラに頼ることなく、必要な場所で使用できるということがある。そのため、地方部や火山近傍など通信インフラが整っていない場所での大地震の発生や噴火の兆候といった、臨機応変に観測システムの構築が必要な場面において、役立てられると考えられる。また、近年の IoT 技術への社会の要請により、LPWA(Low Power Wide Area)を中心とする、長距離・低消費電力の無線伝送技術が発展し、“モノがインターネットにつながる”社会に近づきつつある。地震・火山観測においては、近年携帯電話利用のテレメータも多用されているが、災害時や基地局故障などの際には使用できないほか、観測の適地である人家から離れた場所や・火山の近傍では利用できない場所が多い。

現在一般的な地震の定常観測点は 10~20km 間隔で設置されているため、図 1 のように、直上に観測点がない場所の浅い部分で起きた地震に関しては、精度良く観測することができない。特に、大地震が起きた直後の余震観測をより正確に実施するためには、図 2 のように定常観測点の間隔を満たす形で臨時的観測点を設置する必要があると考えられている[1]。

### 1.2 現在の対応例

定常地震観測点と臨時観測点を組み合わせる方式が余震観測に於いて非常に重要であることは前述のとおりだが、現在の地震観測システムでは地震後に臨時観測網を設置するのは非常に難しい。通常、地震観測点を設置する際は、土地契約、建柱、電気・通信引き込み工事、電気・NTT 契約、機器設置・調整を経てデータ取得が開始されるため、

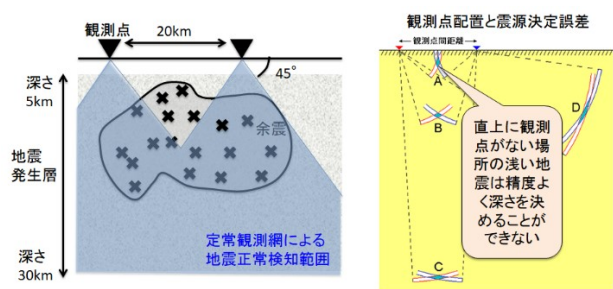


図 1 観測点配置と震源決定誤差

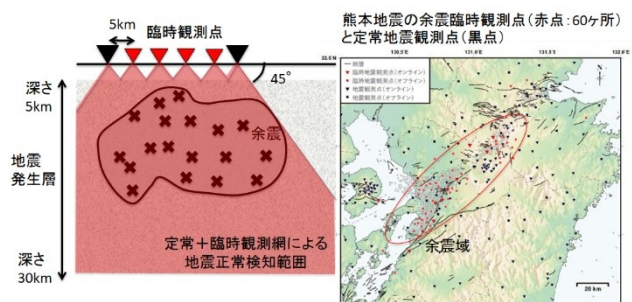


図 2 定常+臨時観測点による地震正常検知

最短でも 2 ヶ月程時間がかかる。また、そもそも被災地では既存インフラや住民の生活の復旧が優先されるため、後回しにされるケースが多い。そのような状況下で、以下のような対応例がある。

#### (1) 衛星通信を用いた対応

図 3 は 3.11 後に金華山観測点で実際に地震データの臨時観測点を設置した例である。衛星通信システム (VSAT) とソーラーパネルを用いることで、電源と通信の契約にかかる時間を削減することが可能としている。

<sup>†1</sup> 国立研究開発法人 情報通信研究機構 耐災害 ICT 研究センター  
Resilient ICT Research Center, National Institute of Information and Communications Technology.  
<sup>†2</sup> 東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター  
Research Center for Prediction of Earthquake and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University



図3 衛星通信を用いた臨時観測点の例

しかしながら、設置が大掛かりになり非常に人的コストがかかること、また消費電力が大きく（～30W）、大学等で常備している VSAT システムは多くても 2 台程度のため、臨時観測点の数が増やしにくく、カバーできる範囲が限定されてしまうという問題が有る。

(2) 携帯網を用いた対応



図4 携帯通信を用いた臨時観測点の例

図4は、熊本地震後に三宝寺でオンライン余震観測を行うために設置した臨時観測点の例である。携帯網（FOMA等）を用いることで、より省電力かつ簡易な臨時観測点を構築できている。しかしながら、携帯電話エリア外では利用できない問題がある。このような臨時観測点を設置する場所は、地震センサの特性上、付近に道路がなく、振動ノイズの少ない山中などにならざるを得ないため、携帯電話エリア外になることも多い。そのような場所では、携帯電話網を用いた臨時観測も利用しにくい。

1.3 現状のまとめと本研究の方針

従来のスタンドアロンな観測システムは、安価かつ即時展開は可能であるが、データを収集するために定期的にそれぞれの設置場所まで赴き、手動でデータを回収する必要がある。この問題を解決するために観測システムのオンライン化が必要であるが、従来の災害発生直後のオンライン観測技術は、設置が大掛かりで消費電力も大きく、保有端

末数の関係で観測点が増やしにくい衛星システムや、設置箇所の特性や被災の関係で圏外が多く、箇所が増えたらランニングコストが増加する携帯電話網システムがあり、双方とも問題を抱えている。（図5左）

そこで本研究では、IoT 向け NerveNet を用いた即時展開型地震観測システムを開発することで、低消費電力な自営網形成機能による携帯電話網に依存しない柔軟な観測点追加を可能とする。（図5右）

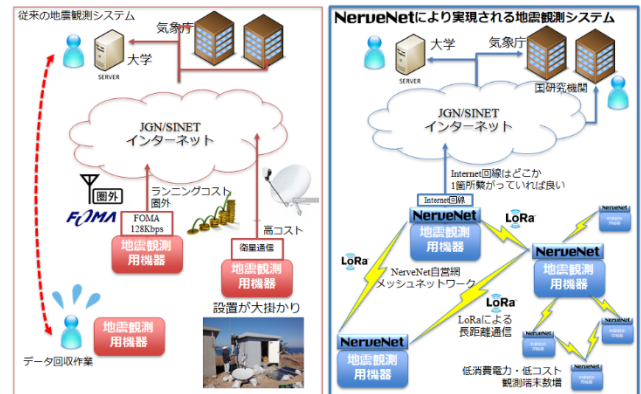


図5 従来の臨時観測システムと、本研究で開発する観測システムの比較

また、後述するが、本研究で扱う地震センサが出力するデータ量、及び研究者が必要とするデータ量は、温度や気圧といった他の一般的なセンサデータと比べて非常に大きく、出力されるすべての地震センサデータを LoRa のような転送レートの低い無線通信を用いて転送するのは現実的ではないため、本研究では転送するセンサデータを最小限に抑えるため、センサノードが自律的に判断しセンサデータを選択・加工するエッジ処理を実施することで、より現実的なシステムを開発する。

2. NerveNet について

NerveNet[2] は、基地局装置同士が相互に接続することでメッシュ状のネットワークを構成し、その基地局装置の上では Web サーバ、データベース・サーバ、DHCP サーバ、DNS サーバ、SIP プロキシ等の機能が分散で動作することで、単体としてもユーザ端末に対して情報サービスを提供でき、かつ複数台の基地局装置が接続されれば、それらが相互に相手を発見し、連携することで、情報サービスエリアを簡単に拡大できるネットワークシステムである。

2.1 市販の NerveNet 基地局

現在市販されている NerveNet 基地局装置のハードウェア及びスペックを図6及び表1に示す。



図6 市販 NerveNet 基地局外観

表1 市販 NerveNet 基地局のスペック

Type	NPS-108AC
Network Interface	IEEE 802.3at(PoE+) Ethernet (10/100/1000 base-T) 5 ports
Operation Temp./Humidity	-10 ~ 50°C / 20 ~ 85%
Power input/consumption	DC12V / 25W average (100W max)
Protection class	IP65
Weight	5.5kg
Other interfaces	Serial ATA, PCI-E, USB, SD, Serial
Storage	2.5 inch SSD 8GB (default)
OS	Debian Linux 8
RAM	4GB
CPU	Intel Atom

基地局間のネットワークはレイヤ2のVLANで構成され、メッシュ状の接続構成とリンク切断時の動的経路切替えを可能とするために、メッシュ状のトポロジ上に複数の異なるツリー形状のVLANを複数構築しておき、基地局は宛先に応じて適切なVLANを選択して通信を行う仕組みを持つ。市販されているNerveNet基地局装置は、屋外運用を想定して開発されているため、防水防塵性、耐久性に優れる。また、基本的には高出力で大型の無線機やアンテナと組み合わせることを想定しているものであり、可搬性が重視される用途には適さない。

## 2.2 Raspberry Pi NerveNet

NerveNetにおけるVLANを用いた基地局間メッシュ構成アーキテクチャと互換性を持つNerveNet基地局機能を、ハードウェアに依存しない形で、汎用ハードウェア上に構成するために、Linux kernel及びモジュールにより標準的に組み込まれているiproute2[3]によってサポートされているvethを用いて、vlan毎に閉じた名前空間を作成し、その中でbrctlコマンドにより作成したブリッジデバイスを利用してvlan毎にブリッジ処理を行うことで、VLANスイッチと同様の機能を実装した。この実装により、Raspberry Piのような組込みの小型PC上でもNerveNet基地局装置のVLANスイッチ機能を実現することを可能

とし、かつ既存ハードウェアを用いた基地局装置とも互換性や相互接続性を保ちながら、ネットワークを構成することが可能となった。試作したRaspberry Pi NerveNet(図7)は、信頼性や耐久性は市販のものに比べると劣るが、小型軽量かつ省電力での稼働が可能であり、大容量リチウムイオンバッテリーとソーラーパネルによるオフグリッド運用を視野にいれることができる点で、IoT分野に応用することが可能であると言える。

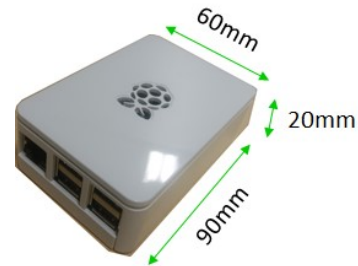


図7 試作した Raspberry Pi NerveNet 外観

## 2.3 IoT向けNerveNetを用いたシステム試作

Raspberry Pi NerveNetに基づき、安価かつ省電力なメッシュネットワークを構築するために、NerveNet基地局間の無線リンクとして省電力かつ広域通信可能なLPWA(Low Power Wide Area)のうち、特に普及が進みつつあるLoRa(Long Range)無線規格に準じた無線機を用いる事を考える。本研究で開発する即時展開型地震観測システムの転送データに関する要件は以下を設定した。

- 転送するデータ量

地震観測で必要とされている9.6Kbps[4]を基準とする。ただし、実際に解析する必要があるのは地震発生前後のデータのみであり、必ずしも全測定データが必要とは限らない。

- 転送するデータ形式

地震観測システムで一般的に用いられているWINフォーマット[5](バイナリ形式)を用いる。LoRa規格における転送速度は292bps~37.5Kbpsとされており、本システムの要件はクリアしている。また、多くのLoRa製品では外部IFとしてシリアル通信が採用されており、バイナリで表現されたWINフォーマットは転送可能である。IoT向けNerveNetを用いて試作したシステムを図8、図9に示す。



図 8 IoT 向け NerveNet を用いた試作システム外観

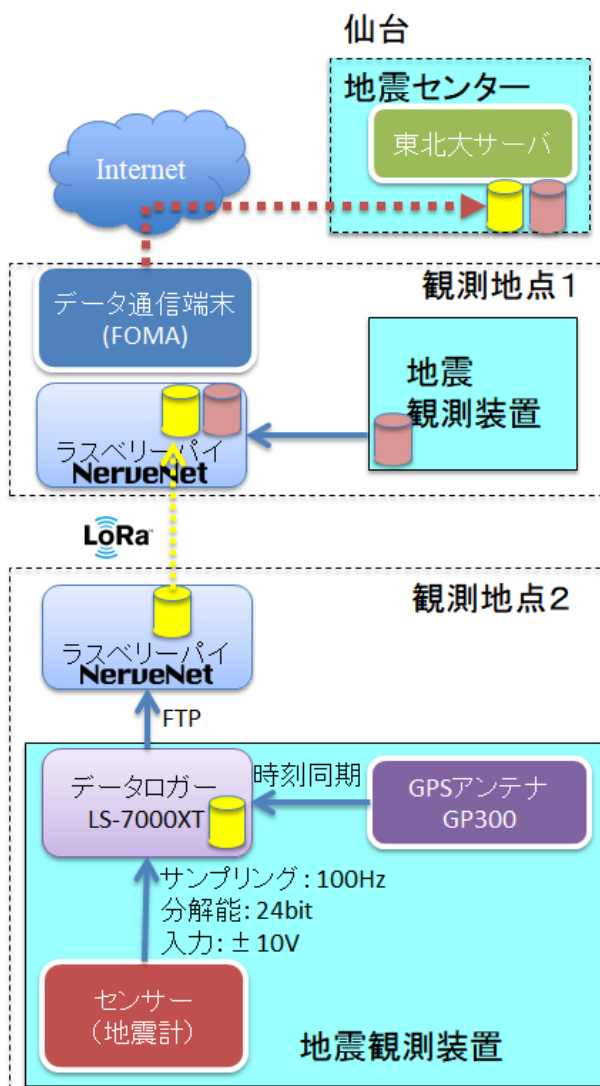


図 9 試作システムの構成図

ちなみに、LoRa を用いた IoT 向け NerveNet は来年度製品版として販売される予定であり、より信頼性の高いハードウェアやソフトウェアで構成される予定である。本研究では、フィージビリティ・スタディの一環として、製品版の販売に先行して LoRa によるデータ転送等の機能の一部を実装し、フィールド実験を経て評価することを目的としている。

### 3. 実験と評価

#### 3.1 実験フィールドについて

実験フィールドには、岩手県の釜石市をターゲットにして実験を進めている。岩手県釜石市では以下の図の様に、2018 年春~夏に、人間社会に影響を及ぼさない程度の地震（震度 3 程度）が起きると推定されており（図 10[6]）、ここにシステムを予め設置し待受観測を行うことで、実用性を確認する。現地には東北大地震研が既に 10 点規模のオフライン地震観測網を作る予定があり、この観測網は実際に大地震時に展開されるものと同等の観測点間隔(数 km)や機器構成を持つため、現在実現していない大規模機動オンライン観測網の即時構築のテストのため最適である。また、本観測は日本で初めての本格的な中規模地震の待ち受け観測であり、科学的にも重要である。

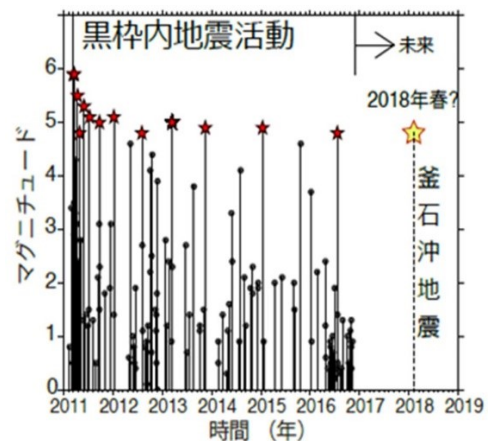


図 10 推定される釜石沖地震

#### 3.2 実験

本研究における実験は以下の様に段階を踏んで実施している。各実験に関して、実験内容、実験結果、評価実験環境、評価結果等を示す。

##### 3.2.1 観測点候補地調査（釜石市，2017/8/21~22）

本実験は釜石待受観測システム構築のための予備実験であり、実際に現地で地震観測システムを設置する場所を視察し、観測点候補間の LoRa 通信が可能かどうかを調査することを目的とした。予め、地震観測に適した観測点候補の中から、地形・標高図を確認した上で LoRa 通信可能と思われる観測点候補をいくつか仮定し、実際に現地に調査システムを持ち込んで実験を行った。



図 11 観測点調査用システム



図 12 観測点調査の様子

本調査実験では、ハンドヘルド可能な形に納めた LoRa モジュールとシリアル通信ソフトウェアをインストールしたスマートフォンを USB 接続した調査システム(図 11)を用いて、2 地点間で連絡を取り合いつつ適宜パラメータを調整しながら、以下の 6 地点間で調査を実施した(図 12)。地点間導通調査結果(図 13)は以下の通り。なお、通信速度については LoRa の規格上選択可能なパラメータ(伝送レート・スペクトラム拡散率等)に基づき推測される通信速度であり、実測値ではない。

- ① 鷲ノ巣崎-釜石大観音(約 5km)  
通信可, 5.4kbps モード
- ② 尾崎-釜石大観音(約 6km)  
通信可, 147bps モード  
通信路間に隆起した地形があり、見通しを妨げている。
- ③ 鷲ノ巣崎-尾崎(約 6km)  
通信可, 3.9kbps モード
- ④ 尾崎-尾崎白浜地区(約 700m)  
通信可, 21kbps モード
- ⑤ 候補地 6-候補地 6 付近の平地(約 900m)  
通信可, 12.5kbps モード  
携帯電波圏外地点である。
- ⑥ 候補地 6 付近の平地-候補地 11(約 6km)  
通信可, 147bps モード  
谷の間を抜ける地形、直接の見通しが無いため性能低
- ⑦ 候補地 4-吉里吉里(約 7km)

通信不可

地震計設置場所が深い森に挟まれていることが理由と推測



図 13 観測候補地点間の導通調査結果

釜石市の地形と地震計設置場所の特性上、起伏が激しくかつある程度木が生い茂っている場所になるため、殆どの地点間では森などで直接見通しはなかったが、通信自体は概ね可能であるとわかった。ただし、伝送レート・拡散率を通信距離優先のパラメータに変更する必要があり、通信速度に関しては推定値ではあるがリアルタイム通信可能な性能まで達しないと予想される。

観測点候補地のうち、③鷲ノ巣崎-尾崎間と④尾崎-尾崎白浜地区間の性能に着目し、尾崎白浜地区を鷲ノ巣崎と尾崎の中継点とすれば要件を満たせる可能性があると考え、次の通信実験では鷲ノ巣崎-尾崎白浜地区中継-尾崎の実験環境でより詳細な調査を実施することにした。

### 3.2.2 観測点候補地通信実験(釜石市, 2017/12/20~21)

本実験では、実際に使用する地震観測センサと試作した IoT 向け NerveNet を組み合わせ、更に大容量リチウムイオンバッテリーとソーラーパネルを用いることで、より実システムに近い状態で実験を実施した(図 14,15)。転送するデータも、実際に使用する地震観測センサから出力されるものを実際に LoRa 無線機で転送を試行した。

本実験は、実データを実環境に近い構成で転送し、実現可能性を確認することを目的として実施した。結果として、システムはバッテリーとソーラーパネルを用いることで晴天時であれば長時間稼働し続けることが可能であることがわかった。しかしながら、通信速度については鷲ノ巣崎-

尾崎白浜中継地間の性能が思ったほど出ず (5.4kbps モード), また中継地-尾崎間はアンテナトラブルやパラメタ設定の問題により, 実効速度を測定することができなかった.



図 14 鷲ノ巣崎観測点



図 15 尾崎白浜中継地

### 3.2.3 LoRa 性能評価実験 (仙台市, 2018/2/2)

仙台の NICT 耐災害 ICT 研究センター屋上と片平キャンパスにて LoRa の性能評価実験を実施した (図 16). この実験では, 前述の通信実験の反省を踏まえ, よりスムーズに 2 地点間の LoRa 通信に於けるパラメタを変更可能なように, 相手端末の設定をリモートで自動調整するような仕組みを導入するなどの工夫を行った.

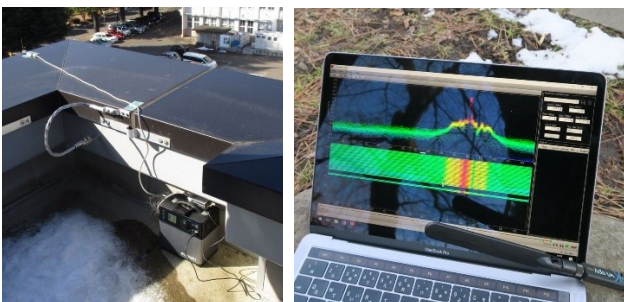


図 16 屋上設置の LoRa システムと実験中の様子

本実験では, 前回の釜石フィールド実験で十分に評価することができなかった LoRa 無線機のパラメタに応じて変化する実際の転送速度について測定し評価することを目的とした. 実験環境は表 2 の通り.

表 2 LoRa 性能評価実験の設定

帯域幅	500,250,125
拡散率(Spread Factor)	6,8,10
CDR(エラー訂正)	2
Optimise(拡散データ最適化)	ON
転送データ量(1パケット)	127Byte
転送パケット数	100

転送速度は, 予め RTC で時刻を同期した 2 端末間で, LoRa パケット送信側で送信開始時刻を保持し, パケットを転送した後, 受信側はデータ受信完了時刻を保持し, 差分時間を計測することで転送データ量÷転送時間によって算出した.

実験結果は図 17 の通り.

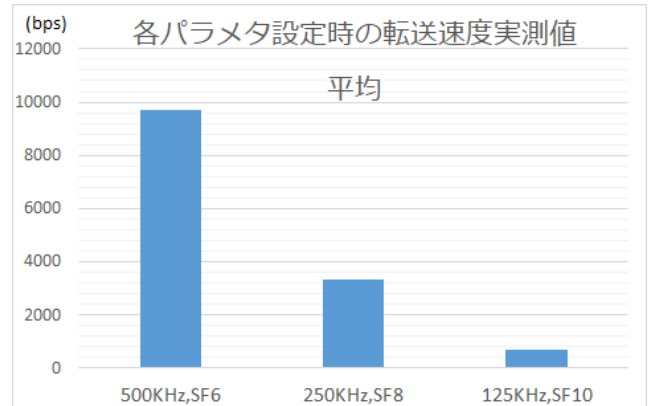


図 17 [500KHz,SF6],[250KHz,SF8],[125KHz,SF10] それぞれにおける転送速度の実測値平均

最も転送速度が出るパラメタの組み合わせである 500KHz,Spread Factor(SF)6 であっても, 転送速度は 10Kbps 弱という結果になった. 公式ホームページ等で配布されているデータシート等では, 同じ設定で理論上は 20Kbps 以上の転送速度を発揮するとあるが, これはおそらく本評価において利用した IoT 向け NerveNet の処理速度や, LoRa モジュールを接続するための USB シリアル変換, もしくは測定に利用したプログラムの実装方法などに影響を受けている可能性がある. いずれにしろ, 現時点で IoT 向け NerveNet を用いた LoRa 転送はグラフの性能のとおりである.

また, この転送速度は, 地震観測データのリアルタイム伝送に必要な 9.6Kbps とほぼ同値だが, 実際のフィールドでは同じ性能を常に発揮するとは考えにくい. 更にこの組み合わせでは, 通信距離が 1km 以上離れると通信ができなくなるのが考えられるため, 本研究で構築する即時展開型地震観測システムの展開範囲を狭めてしまうおそれがあるため, LoRa によるリアルタイム伝送は困難であると言える.

### 3.3 考察

これまでの実験を踏まえ, 当初検討していた地震観測データのリアルタイム伝送に必要な 9.6Kbps, LoRa 規格の性質上難しいと考えられる. 本研究で扱う地震センサが出力するデータ量, 及び研究者が必要とするデータ量は, 温度や気圧といった他の一般的なセンサデータと比べて非常に大きく, 出力されるすべての地震センサデータを LoRa のような転送レートの低い無線通信を用いて転送するのは現実的ではない.

そこで本研究では、転送するセンサデータを最小限に抑えるため、IoT 向け NerveNet のコンピューティングリソースを活用し、センサノードが自律的に判断、または地震速報等をトリガーとして時間周辺の地震データをサーバからセンサノードに向けてリクエストするなどして、センサデータを選択・加工して転送する手法にフォーカスを当てて開発して行くことを検討しており、今後の方針としている。いわゆるエッジ処理により転送データ量削減は十分に実現可能と考えられる。

また、実現するシステムの性質上、臨時・即時的にセンサネットワークを構築する必要があり、LoRa のようなパラメタの変更で大きく性能が変わる無指向性シリアル通信無線デバイスを用いてセンサ網を作る場合

- ① 地図等で大まかな見通しの取れる場所を机上決定
- ② 現地で電波強度等を見つつ微調整しながらシステムを設置

という手順を取る必要があると考えているが、その際、LoRa 通信モジュール同士のパラメタ設定を同じ値にする必要がある。その為、相手端末の設定をリモートで自動調整するような仕組みを導入したが、このように本システムの開発を通して、IoT システムの社会実装に資するようなノウハウが蓄積されつつ有るのは収穫であった。

#### 4. おわりに

本論文では、現在開発中の IoT 向け NerveNet を活用した即時展開型地震観測システムについて紹介し、本システムを実現するためのフィールド実験について説明した。

本研究は、スマート IoT 推進フォーラムのテストベッド分科会で検討されている IoT キャラバンシステムのテストベッドのプロトタイプとなるように開発を行っている。このキャラバンシステムは、ある限られた地域・期間に情報通信ネットワークの即時展開を可能とし、地震・火山だけでなく、災害時の医療データ共有や農業・気象等多様なセンサデータの収集など、IoT 技術実証・社会実証を促進する基盤となることを目標としている。本研究で実際のユーザとともにフィールド実験を行うことで、IoT キャラバンシステムの実現に向けた効果的なフィードバックが得られると考えているため、引き続き本システムの実現に向けた研究開発を進めていく。

#### 参考文献

- [1] “大学合同臨時地震観測によって決定された島弧－島弧型日高衝突帯付近の震源分布と震源メカニズム解”. 勝俣 啓ら, 地震研究所集報, Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo Vol.77(2002) pp. 199-223).
- [2] M. Inoue, M. Ohnishi, C. Peng, R. Li, Y. Owada, “NerveNet: A Regional Platform Network for Context-Aware Services with Sensors and Actuators,” IEICE Trans. Commun., Vol.E94-B, No.3, pp.618-629, Mar. 2011.
- [3] “iproute2 official website”,  
<https://wiki.linuxfoundation.org/networking/iproute2>
- [4] “微小地震観測網 SATARN システムの現状と概要”, 大見士郎ら, 京都大学防災研究所年報, 第 42 号, B-1, 平成 11 年 4 月
- [5] “win-微小地震観測網波形験測支援のためのワクステーション・プログラム (強化版)”, ト部卓, 東田進也(1992), 地震学会講演予稿集, No.2, P41
- [6] “くり返し発生する地震と地震の準備過程” 内田直希, 丸善出版 パリティ Vol.33 No.01 2018-01