情報処理学会
グループウェアとネットワークサービス研究会
2007年11月8日，9日

Refereed Conference paper

無線センサネットワークの災害現場への適用に向けた検討

爰川 知宏[†] 小橋 喜嗣[††] 鄭 懿[†††] 峰野 博史[†††] 陳 恵芳[†††] 水野 忠則[†††]

無線センサネットワークの災害現場への適用について，ケーススタディをもとに適用モデルおよび要求条件の整理を行った．災害時の初動体制として重要な，災害発生後3日間での適用に焦点を当て，実際に適用した場合に求められる要件を，5 つの観点で明らかにした．センサのライフタイムを伸ばす観点から，特に通信方式に着目し，改良型 LEACH プロトコルをベースとした通信処理の効率化アプローチを提案した．性能，運用面に関する基礎評価を実施し，有用性の見通しを得た．

A Study of Wireless Sensor Network Applications for Disaster Sites

Tomohiro Kokogawa[†] Yoshitsugu Obashi[††] Yi Zheng[†††]
Hiroshi Mineno[†††] Huifang Chen[†††] Tadanori Mizuno[†††]

We discussed the usage model and the requirements of wireless sensor network (WSN) applications for disaster sites, based on the case study of past disasters. We classified the five requirements of WSN, focusing on the initial reaction of the disaster countermeasures office, especially in three days after the disaster occurred. To extend the lifetime of WSN, we compared the methods of network architecture configuration, and suggested the modified LEACH based approach. Basic evaluation about the lifetime and operations results showed the availability of the approach for disaster sites.

1. はじめに

人類の発展は災害との闘いの歴史でもある．日本においても，その地理的条件から，大地震や津波，火山活動，さらには台風や集中豪雨といった自然災害に度々見舞われており，国や地方自治体，さらには社会インフラを提供する企業の活動において，災害対策の占める割合は大きい．こうした（自然あるいは人的な）災害の脅威に立ち向かうには，災害の状況を迅速かつ正確に把握し，その情報を活用して対策を検討する必要であり，昨今の情報通信技術の発展への期待は大きい．

災害に遭遇した人々の救出作業や，避難誘導を確実かつスムーズに進めるためには，災害の起きている状況や，その場に巻き込まれた人々の状況を迅速かつ的確に把握することが欠かせない．そのためには，人的リソースの問題や安全性（二次災害防止）の観点から，人間に代わって災害現場の状況を収集する手段として，無線センサネットワーク(以下、WSN)技術は非常に有望と考えられる．しかし，コストや運用面はもとより，性能やバッテリ寿命といった技術面の課題も未だ多く残っており，現実の災害現場での適用には至っていないのが現状である．

本論文では，こうした主に災害への対応を主眼においた，WSN の災害現場への適用に向けた要求条件を明らかにし，そのために必要な要素技術のアプローチと，有用性の基礎評価について述べる．

[†]NTT サービスインテグレーション基盤研究所
NTT Service Integration Laboratories
[††]NTT ソフトウェア(株)
NTT Software Corp.
[†††]静岡大学
Shizuoka University

2. ケーススタディおよび関連研究

2.1 初動対応に関するケーススタディ

(1) 阪神・淡路大震災(兵庫県南部地震)

1995 年に発生した阪神・淡路大震災は，大規模災害現場における課題，とりわけ初動対応における課題を大きくクローズアップした．当時の救出状況の記録によると，災害発生2日目以降の救助者生存率が極めて低くなり，3 日(72 時間)を過ぎるとほぼ救助率がゼロに近くなることが明らかになっている 2)．また，この震災では直後に数万人もの

生き埋め者が発生したが，電話はほとんど利用できず，救助部隊の連携も十分ではなく，さらには火災など二次災害の危険もあったことから，救助活動は非常に難航した 3)．このような状況下において，一人でも多くの被災者を救助するには，如何に迅速かつ広範囲に，被災者やその周囲の状況を把握できるかにかかっている．

(2) 2004 年台風 23 号豪雨

本豪雨は中部から四国にかけ，30ヶ所以上のアメダス観測地点で 24 時間雨量の記録を更新するなど，集中豪雨が広域に渡って発生した．また，死者のうち，洪水および土砂災害に伴うものがそれぞれ 3 割程度を占めており 4)，災害の大きさもさることながら，避難誘導などの初動対応が十分に回らなかったことが被害を拡大させたことを物語っている．

一方で，河川の氾濫で甚大な被害を受けた兵庫県豊岡市の場合，他県からの応援を含め 100 隊(約 300 名)に渡る救助隊を組織し，それにより 2 日間で 600 名以上の救助に成功し，被災規模に比べ死傷者数を最小限に抑えることができている 5)．この例からも，災害時の初動での十分な救助・避難誘導体制がとりわけ重要であることがわかる．

表 1 経過時間に則した通信ニーズの推移

経過	現場の状況	主な通信ニーズ
30 分後	災害対策本部の設置	・職員の参集 ・点的な情報収集 ・関連機関間での情報共有
60 分後	災害対策本部における点的な情報の収集・整理・分析	・面的な情報収集 ・被害状況の確認 ・住民対応 ・被災地への人員派遣
90 分～ 3 日後	災害対策本部の本格始動	・広域な被災情報の集約 ・現場へのフィードバック ・広域な応援要請
3 日～ 1 週間後	復興作業着手	・救援物資の受け入れ，配分

2.2 災害現場における通信ニーズ

総務省では，2006 年より「安全・安心な社会の実現に向けた情報通信技術のあり方に関する調査研究会」を開催し，安心・安全なユビキタスネット社会の実現に必要な技術要件，研究開発課題，実現方策等についてとりまとめた1)．その中で，被災者への安否・災害・避難情報の配信，被災監視，被災情報収集といった観点で，WSN やアドホックネットワーク，電子タグなどの技術への期待が持たれている．

また，災害・危機発生の経過時間に即したニーズの推移についても4つの観点から示しており，表 1 にまとめる．2.1 のケーススタディと同様に，特に災害対策本部の初動にあたる，災害発生後 60 分から 3 日後にかけて，面的な情報収集や救助活動に向けた現場への情報のフィードバックが迅速に求められることがわかる．

2.3 WSN のフィールド適用に関する動向

WSN の屋外での本格的なフィールド実験としては，UC Berkley を中心としたウミツバメの生態調査への適用 6)，西宮市における環境取得実験 7) など幾つかの事例は見られるものの，固定的にセンサを設置した上で，長期的な環境のモニタリングを目的としており，災害現場での人命救助など緊急性を要する用途を想定していない．NASA ジェット推進研究所の SensorWeb では，森林火災や火山の監視を目的とした計測システムの検討を進めている 8)が，低解像度のセンサを広範囲に点在させることで，定点観測的に広域の災害状況を把握することを目的としたものである．

3. WSN に求められる要件

災害現場における救助活動への利用に焦点を当てた上で，WSN に求められる要件を整理する．

3.1 適用モデル

本論文では WSN を，災害現場において，被災者の有無やその状態，および被災状況や二次災害の危険性に関する情報収集を行うための手段として位置づける．すなわち，初動対応において，被害が大きいか，あるいは被災範囲が広範囲に及び，リソース(人員，インフラ)を十分に確保できない地域に対し，本格的な救助活動を開始するまでの間，必要な情報収集を行うために利用されることを想定する．

また，予め事前設置されたインフラとしてではなく，災害発生後に初めて現場に設置されることを想定する．それは以下の理由による．

- 災害がいつ，どこで起きるのかがわからない状況で大量のセンサノードを事前設置するのは，コスト的にも運用的にも現実的でない
- 事前設置されたセンサノード自体が災害によってダメージを受ける可能性がある

想定する適用モデルを図 1 に示す．現地災害対策本部が設置され，ヘリコプター等を用いた最初の現場視察が行われた際に，現場の状況から

調査あるいは救助活動にすぐに着手できないと判断した場合に，該当地域にセンサノードおよび情報収集用のノードを設置する．多くの場合，交通手段の遮断や二次災害の危険などから，人手によるノードの計画的な設置は困難と予想され，その場合はヘリコプター等を利用した散布設置を行わざるを得ない．情報収集ノードはWSNを構成するセンサノードより収集された情報を対策本部へ送信する役割を持つ．これにより，対策本部ではそこで集められた情報をもとに，救助活動計画を検討することができる．

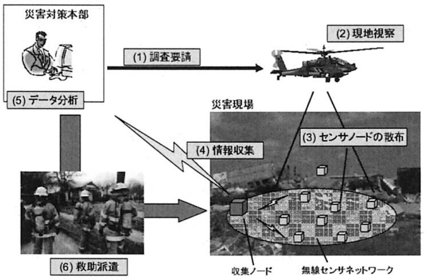

図 1　災害現場におけるWSNの適用モデル

3.2 要件

3.1 で述べた適用モデルを前提とした場合，WSNには以下の機能が要求される．

(1) センサのライフタイム（バッテリ寿命）

災害での救命率は，発生後 72 時間(3 日間)の初動対応がとりわけ重要であることから，少なくとも 3 日間は情報を送り続けられる必要がある．

(2) 搭載されるセンサ機能

災害状況の正確な把握と確実な人命救助のためには，単機能のセンサでは限界があり，複数のセンサの組み合わせ，あるいは高音質マイクやビデオカメラといった，得られる情報量の多い機器も併用が必要なシーンが多く想定される．

(3) センサの設置条件

人命救助を目的とした場合，確実に被災者を発見できるようにするには，高密度（数 m～数十 m 程度の間隔）でのセンサ設置が必要となる．また，容易に災害現場に近づけず計画的に設置できない場合，ノード数を十分に増やした上で空中散布といった運用も考えられ，ノード間が接近しすぎて同一事象に対し複数のセンサが同時反応するなど，必要以上に冗長性が高くなる可能性がある．

(4) データ処理

センサの配置間隔や災害の規模によっては，同一の事象に対して複数のセンサが同時に反応し，似たような情報が大量に送られる可能性がある．それによるネットワークの輻輳やデータ処理の遅延は，緊急を要する災害救助活動において大きな問題となる．

(5) ノードの大きさ

空中散布による落下時の衝撃による故障，破損や被災者へのダメージを防ぐために，センサノードはなるべく小型，軽量であることが望まれる．

また，一度設置（散布）されたセンサノードは事実上回収不可となる．そのため，環境負荷が小さく，かつ低コストであることも合わせて求められる．

3.3 要件実現における課題

上記で述べた要件には相反するものも多く，全てを同時に解決するのは困難である．例えば，端末を小型化すればバッテリサイズも小さくなり，ライフタイムが短くなる．また，センサが高機能化し通信量も増えればそれだけ電力消費量も多くなる．

上記を踏まえ，要件を実現するための課題を整理すると，以下の通りとなる

- 端末の小型化が必要なため，バッテリ容量はあまり大きくできない．一方，高度なセンサを搭載する必要があるため，センサノードの消費電力は大きくならざるを得ず，ノード全体としての省電力化が必要である．
- 比較的狭いエリアに大量のセンサを配置し，かつ各センサからのデータ量が大きくなることが想定されることから，データの輻輳や冗長化が懸念されるため，通信の効率化が必要である．また，同時に大量のセンサノードおよびデータを扱うことから，運用の簡素化も重要である．

4. アプローチ

4.1 消費電力の分析

センサノードの消費電力は大きく以下の部分で構成される．

- センサ部
- データ処理部(マイコン，メモリ)
- 通信部（送信，受信）

光センサなど単純なセンサが用いられるケースでは，センサ部分の消費電力はわずかであるが，Web カメラなど高機能なセンサを用いた場合は，消費電力は無視できないレベルになる．さらにセンサ部は基本的に常時稼動が必要であることから，運用的な省電力化は困難である．データ処理部についても同様で，高度なセンサや複雑な通信処理を行えば，その分消費電力は増大する．一

方，通信部についてはネットワークの構成方法によっては通信頻度や総通信量が大きく変わることから，通信方式の効率化による省電力化が最も期待できる．

4.2 通信方式

WSN の通信方式の代表的なものとして，以下の 3 つの方式がある(図 2).

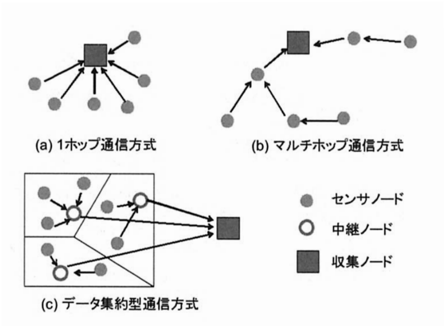

図 2 ネットワーク構成方式

1 ホップ通信方式は，センサノードは特定のノードにデータを送信すればよいので，トポロジは単純となり，低コスト化や長寿命化がはかりやすい．一方，一つのノードからのデータを到達可能な距離は限られており，設置の自由度が限られる．また，データ収集ノードに全てのトラフィックが集中するため，帯域上のボトルネックが発生しやすい．

マルチホップ通信方式は，電波が到達可能なノード間をバケツリレー式にデータを送れるようにアドホックネットワークを構成することで，本来電波が届かない距離のノード間での通信を可能にするものである．一方で，データ中継の際に電力を多く消耗するため，ライフタイムが稼げない．また，経路制御が複雑になるため，通信が行えるようになるまでに多く時間を要する懸念がある．

データ集約型通信方式は，各ノードを独立に扱うのではなく，領域を区切ってその領域単位で情報を集めて中継ノードへ送信し，その中継ノードが集めたデータをまとめて収集ノードへ送信する方式である．これにより，各ノードの通信負荷を減らし，系全体としてのライフタイムの向上と通信の効率化が期待できる．代表的なアプローチとして LEACH9)があるが，LEACH を改良し，メタデータを用いることでライフタイムを向上させる方法（改良型 LEACH）が筆者らのグループより提案されている 10)．図 3 に改良型 LEACH の動作を示す．例えば映像センサの場合，各ノードは検知した実映像データの代わりに，最大光量などサイズの小さい基礎的なデータをメタデータとして中継ノードに送付する．それをもとに中継ノードは実データを要求するノードを指定することで，同一イベントに対する各ノードから送信されるデータの総量を削減できる．センサ数が膨大，あるいは各センサが送信するデータサイズが大きい場合に，特にライフタイム向上効果が期待できる方式である．

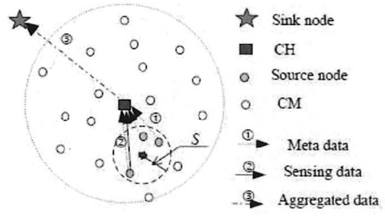

図 3 改良型 LEACH プロトコル

5. 評価

改良型 LEACH を適用した場合について，性能評価とともに，運用面の定性比較を行った．

5.1 性能評価

改良型 LEACH を用いた性能測定を実施する．センサノードには MICAz 11)を用い，1 台の中継ノードと，簡易な光センサを搭載した 16 台のセンサノードで構成される．センサノードは 0.5m 間隔で設置した．収集ノードには PC を用い，中継ノードとはシリアル接続している．メタデータは光センサからの出力を含め計 30 バイト長とし，実センシングデータは，接続された光センサが簡易なものであるため，90 バイトのダミーデータを送信する設定とした．各センサのイベント検知間隔は 0.5 秒とした．すなわち，0.5 秒おきに各センサノードより中継ノードに 30 バイトのメタデータが送信される．中継ノードからのセンシングデータ(90 バイトのダミーデータ)の要求は 5 秒間隔で実施した．また，センサノードの状態については，メタデータ中にセンサの電圧値を含めておくことで記録を行った．

LEACH 及び改良型 LEACH プロトコルでは，通信部の消費電力は通信量，通信回数に比例するとの前提で構築されている．しかし実際のセンサノードでは，非通信時においても受信待ち受けを行っており，その状態での消費電力も無視できない程度に大きい．その影響を減らすため，通信が完了したら一旦通信部の電源を落とし，一定時間経過後に再起動するという方式で実装を行った．これは使用したハードウェア(MICAz)の制約によるものであり，実際の災害現場にて使用する機器に実装する場合は，理論の前提条件と実装上の制

約について十分留意する必要がある.

ライフタイムはセンサノードの電圧が低下し，動作不能になるまでの時間と定義した．上記条件において，測定結果を図 4 に示す．従来方式に比べ，改良型 LEACH を用いた場合，1.2 倍程度のライフタイムの増加がみられ，改良型 LEACH の有効性が示された.

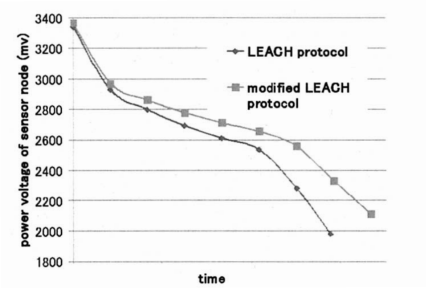

図 4 性能測定結果

5.2 運用面の定性比較

本提案プロトコルを実装したセンサノードを実現場で運用することを想定し，事前準備からセンシングデータ取得に至る運用面の比較を行う.

運用面で課題となりうる処理としては，以下が想定される.

- 事前設定：ノード個別の事前設定の要否
- ノードの設置：センサノードや収集ノードの設置場所への制約事項
- 通信確立：各センサノードと収集ノード間の通信確立への時間および作業量
- データ収集：収集ノードで集められたデータに対する処理量や制約
- 状況変化への対応：一部ノードの機能停止や(土砂崩れなどに伴う)位置変化への対応

が挙げられる.

1 ホップ通信，マルチホップ通信，および提案方式(改良型 LEACH)それぞれを適用したセンサノードを用いた場合について，運用面の訂正比較を行った結果を示す.

(1) 事前設定

1 ホップの場合，共通の収集ノードへデータを送信できればよいので，センサノード個々の設定を個別に設定する必要はない.

マルチホップの場合も最終的な収集ノードは共通であり，中継ノードとしての振る舞いを決定する経路設定は基本的にアドホックに行われるため，ノード個別の事前設定は必要ない.

改良型 LEACH の場合，クラスタリング処理の実装方法に依存するものの，基本的にはクラスタ生成や中継ノード選定はアドホックに行われるため，事前設定は必要ない.

(2) センサ設置

1 ホップの場合，全てのセンサノードが収集ノードと通信距離以内に存在する必要があるため，途中に遮蔽物などがあった場合に収集ノードの設置場所の選定が難しい.

マルチホップの場合，基本的に収集ノードと各センサノードの位置関係を考慮する必要性は低いものの，ある程度の密度で均等にノードが配置されていないと，密度が薄い部分でノード故障が発生した場合に，そのノードが中継していたセンサノード群との通信断が生じるリスクが高くなる.

改良型 LEACH の場合は，中継ノードと収集ノードの間の通信形態が 1 ホップかマルチホップかに依存する.

(3) 通信確立

1 ホップの場合，各センサノードの通信先は収集ノードだけであり，高速に通信を確立できる.

マルチホップの場合，隣接ノード間でアドホックに経路を作っていくため，全センサノードの通信経路が確立するまでに時間を要する.

改良型 LEACH では，(i)クラスタの設定，(ii)中継ノードの決定，(iii)収集ノードとの通信経路確立とさらに手順を要するため，通信開始までの時間はさらに長くなる.

(4) データ収集

1 ホップの場合，各センサノードからのデータが直接収集ノードに送られるため，収集ノードの処理能力が問題となる．また，センサノードが高密度で設置されていた場合，似たようなデータが大量に送られてくるため，被災地が広範囲に渡っている場合，多量の冗長なデータに埋もれて重要な事象を見落とす恐れがある.

マルチホップの場合も基本的に 1 ホップの場合と同等の課題を持つが，それに加えて，中継ノードを兼ねるセンサノードの処理能力が問題となる．すなわち，中継ノード上でデータが輻輳し，その結果，収集ノードへデータが到達するのに大きな遅延を生じたり，あるいはデータの欠落を生じたりして，災害状況の正しい把握が行いづらくなる可能性がある.

改良型 LEACH では，中継ノードの段階で選別されたデータのみが収集ノードに届くため，データの冗長性は低く，輻輳等へのリスクも少ないことが期待される．一方で中継ノードでのデータ選別の段階で重要なデータが欠落する懸念があるが，3.2(3)で述べたような，ノード設置に必要以上に高い冗長性が生じるような運用を想定した場合には大きな問題にならないと考える.

(5) 状況変化への対応

1ホップの場合，通信経路は固定的なため，機能停止や位置変動で電波圏外に離れたノードは他のノードへ影響は与えないため，特に対応は必要ない．

マルチホップおよび改良型LEACHの場合，中継ノードとして振舞うノードに機能停止や位置変動があった場合，再度経路情報を再構成する必要があるため，それにともなう通信断や処理遅延が断続的に発生する懸念がある．

以上より，改良型LEACHを適用した場合，データ収集の段階で運用コストを大きく抑えることが，他の方式に比べ期待できる．一方で，通信確立への手順が複雑なため，環境変化の程度に応じた通信手順の簡略化を検討する必要がある．

表2 運用面の定性比較

	1ホップ	マルチホップ	改良型LEACH
事前設定	不要	不要	不要(実装依存)
ノード設置	制約大	制約小	制約小(実装依存)
通信確立	短時間	長時間要	長時間要
データ収集	冗長性大 収集ノードでの輻輳大	冗長性大 中継ノードでの輻輳大	冗長性小 輻輳小
状況変化	対応不可	経路変更が頻発	経路変更が頻発

6. まとめ

本論文では，WSNの災害現場への適用について，要求条件の整理を行った．災害時の初動体制として重要な，災害発生後3日間での適用に焦点を当て，実際に適用した場合に想定される要件を，過去の災害対応の教訓などをもとに明らかにした．主にセンサのライフタイムを伸ばす観点から，通信方式に着目し，改良型LEACHをベースとした通信処理の効率化アプローチを提案し，性能および運用面から基礎評価より，その有用性についての見通しを得た．

実用化を考える上ではクリアすべき課題はまだ多く残されている．一つにはハードウェア機能の制約の元で，プロトコルをどこまで理論に近い状態で実装できるかが課題である．特に，消費電力の大半が通信量に比例することを前提とした改良型LEACHにおいては，非通信時の電力消費を抜本的に削減することは必須であり，効率的なスリープモードの実装などが求められる12)．また，端末の小型化，高機能センサの搭載，ノード台数の大幅な追加といった，より実際の環境に近づけたフィールド実験を行うことで，机上レベルでは判明しづらい運用上の課題や性能のボトルネック要因についても今後検討していく必要がある．

参考文献

1) 総務省，「安心・安全な社会の実現に向けた情報通信技術のあり方に関する調査研究会」最終報告書 (平成19年3月).

2) 兵庫県警察本部，震災当日の救助・捜索状況，阪神・淡路大震災警察活動の記録 都市直下型地震との闘い, pp. 71-75 (1996).

3) 阪神・淡路大震災教訓情報資料集, http://www.iijnet.or.jp/kyoukun/

4) 牛山素行, 2004年台風23号による人的被害の特徴，自然災害科学, Vol. 24, No. 3 (2005).

5) 台風23号豪雨災害に伴う兵庫県豊岡市における緊急消防援助隊の活動状況: http://www.fdma.go.jp/neuter/topics/kinkyu/23.pdf

6) R. Szewczyk, E. Osterwell, J. Polastre, M. Hamilton, A. Mainwaring and D. Estrin, Habitat Monitoring with Sensor Networks, Comm. ACM, Vol. 47, No. 6, pp. 34-40 (2004).

7) 総務省近畿総合通信局，センサネットタウンに関する調査検討会報告書 (平成17年4月).

8) S. Chien, B. Cichy, A. Davies, D. Tran, G. Rabideau, R. Castano, R. Sherwood, D. Mandl, S. Frye, S. Shulman, J. Jones and S. Grosvenor, An Autonomous Earth-Observing Sensorweb, IEEE Intelligent Systems, May/June 2005, pp.16-24 (2005).

9) W.R Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks, IEEE Trans. on Wireless Communications, Vol.1, No.4, pp.660-667, October (2002).

10) H. Chen, H. Mineno and T. Mizuno, A Meta-Data-Based Data Aggregation Scheme in Clustering Wireless Sensor Networks, In Proc. of International Workshop on Mobile Location-Aware Sensor Networks (MLASN), pp.43-49, Nara, Japan, May (2006).

11) MICAz, http://www.xbow.com/

12) 鄭懿，陳恵芳，峰野博史，爰川知宏，小橋喜嗣，水野忠則，無線センサネットワークにおけるクラスタリングプロトコル向けスリープモードの検討, DICOMO2007 シンポジウム, 2C-3, July (2007).

13) 爰川知宏，小橋喜嗣，鄭懿，峰野博史，陳恵芳，水野忠則，無線センサネットワークの災害現場への適用に関する考察, DICOMO2007 シンポジウム, 5D-3, July (2007).