大規模災害時におけるDTN技術を用いた 複合的な船陸間災害情報共有ネットワークの提案と評価 ー可搬型DTN基地局による検討ー

霜田 一将¹・植田 啓文²・木下 峻一³・加藤 浩⁴

Proposal and Evaluation of Hybrid Information Sharing Networks between Ship and Shore by Using DTN Technology for Large-Scale Disasters -A Study on Using DTN Portable Base Stations-

Kazumasa SHIMODA, Hirofumi UEDA,

Shunichi KINOSHITA and Hiroshi KATO

Abstract

By the Great East Japan Earthquake in 2011, some base stations of telephones and cellphones suffered serious damages, so that afflicted people had difficulty communicating with each other. Since ships are equipped with some communication devices including satellite together with an independent electric power, they have a capability to help people to obtain and share important information immediately after a disaster. Therefore, a system for sharing information between disaster victims and supporters and preventing the second accident is required for ships. Previously, there are some literature on WiFi networks between ship and shore. However, nothing on how to construct information sharing networks between a ship and a disaster-stricken area. The purpose of this paper is to propose and evaluate hybrid information sharing networks between ship and shore by using DTN technology for large-scale disasters. We constructed and evaluated those using portable DTN base stations and DTN tablet stations between Ishinomaki port and Ishinomaki port office, Ishinomaki port office and Hiyoriyama park. Those systems were suggested effective to facilitate information sharing between a ship and a disaster stricken area.

Keywords : telecommunication, DTN, DTN portable base stations, large-scale disasters, information support

キーワード: 通信、DTN、可搬型DTN基地局、大規模災害、情報支援

1. はじめに

航海訓練所の練習船は、多人数の実習生を受け入れ長期に渡る実習訓練を可能とする生活設備、供食

設備、医療設備および人員が常時整えられている。

東日本大震災では、海王丸と銀河丸が福島県いわき市小名浜港および岩手県宮古港に着岸し物資輸送、

¹ 正会員 航海訓練所 (〒231-0003 神奈川県横浜市中区北仲通 5-57) shimoda-k7je@kohkun.go.jp

² 非会員 日本電気株式会社 クラウドシステム研究所

³ 非会員 日本電気株式会社 クラウドシステム研究所

⁴ 正会員 放送大学

供食、入浴、健康相談などの救援活動を行った。水道などのライフラインが途絶え、入浴できない状況が続いていたため、練習船を用いた入浴の提供が好評を得た。このように、東日本大震災のような甚大な災害時でも船舶を活用した海上からの救援活動が効果的であることがわかっている⁽¹⁾。

東日本大震災発生直後、被災地では、地震、津波により携帯電話の基地局が被害を受け回線の途絶や、電線などの切断により大規模で長期間の停電などにより通信網が使用できないことや、通信回線の輻輳により使用しにくくなることが発生していた⁽²⁾。従来からのインターネット通信方式である TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol 以下、TCP/IP) では、相互に通信する 2 箇所のエンド・ポイントおよびその間の中継点が必ず存在し、互いに通信でき到達性があることが前提である⁽³⁾。すなわち、通信回線がきわめて断続的、非常に高いロス率、非常に低速である場合では、必ずしも適切な通信方式ではない⁽⁴⁾。前述のような既存の TCP/IP が適用できない断続的な通信環境において、効率的な通信を行う手段として遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay/Disruption/Disconnection Tolerant Network 以下、DTN) 技術⁽⁵⁾が注目されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。DTN とは、連続的な通信状態を想定せず、通信遅延が大きい・頻発するリンクの切断により発生する劣悪な通信環境でも、前述のような TCP/IP の転送能力を克服し、実用的な通信を実現する技術である⁽⁸⁾。

船舶は、電源設備をはじめ情報収集をするために必要となる無線設備、衛星通信設備などを備えており、このような通信環境が安定しない、孤立した状況にあっても比較的容易に情報収集および配信が可能である。前述のような通信環境が安定しないまたは使用できない状況において、船舶を拠点とした海上からの情報支援ができれば、被災者と支援者間の情報共有を促し、安否の確認、円滑な救援活動や二次災害の防止に貢献できる新たな手法として期待できる。

これまで、船陸間でのネットワーク構築では、無線 LAN を用いた手法⁽⁹⁾が検討されていたが、大規模災害発生時を想定し、船舶を含めた通信を行う 2 点間の接続が常に存在しないまたは不安定な通信状態に対する検討は極めて少ない。

本研究では、前述のような通信環境において船舶を用いた情報支援に着目し、船舶と孤立した劣通信

図1 蓄積運搬型方式

環境間において、2 点間の接続が常に存在しないまたは不安定な通信状態における、タブレット型の DTN 端末と可搬型の DTN 基地局を使用したネットワークを構築する目的として通信実験を行った。これにより、船舶で利用できる既存のインフラとそれに依存しないインフラの複合的な船陸間災害情報共有ネットワークの提案と評価を行う。

2. DTN とは

前述のように TCP/IP は、トランスポート層プロトコルであり、相互に通信する 2 点間のエンド・ポイントでの動作が基本となっている⁽³⁾。また、無線を用いた TCP/IP においては、輻輳によるパケットロス、無線リンクによる雑音やフェージングによるパケットロスなど本質的な技術課題がある⁽¹⁰⁾。DTN とは、通信遅延が非常に大きい、物理リンクの切断の発生により、連続的な通信状態を想定していない環境でも通信を可能とする技術である。図1に示すように、ソースノードは、宛先と通信できなくとも通信可能なノードの中で宛先にデータを届けられそうなノードを中継ノードとし、そのノードに対しデータを送信する。中継ノードは、データを蓄積し、運搬している途中で、宛先に届きそうなノードと遭遇するとデータを転送する。これを繰り返すことにより、宛先にデータを転送することを可能とする。また、ノードの移動により、遭遇したノードすべてに情報を伝達し、隣接ノードの保有情報を調査し、保有していないデータがあれば、隣接ノードから取得することを可能とする。DTN では、このような情報伝達技術を、蓄積運搬型方式⁽¹¹⁾と呼んでいる。

3. 船陸間災害情報共有ネットワークの提案構成

図2 船舶を拠点とし、複数の人間が徒歩または車両で被災地に入り、情報支援を行うことを想定した構成

本研究では、船舶を拠点とし、DTN 通信を可能とするタブレット端末（以下、DTN タブレット端末）を人が所持し避難所・被災地（孤立または劣通信環境）を巡回することで、第2章で述べた中継する端末としてデータを蓄積し転送する蓄積運搬型方式による構成、情報共有の即時性を重視し、広範囲でDTN通信を可能とする可搬型の基地局（以下、可搬型DTN基地局）を利用した構成およびそれらを複合した3つの構成を述べ、船陸間災害情報共有ネットワークを提案する。

3.1 DTN タブレット端末を用いた構成

船舶を拠点とし、複数の人間が徒歩または車両で被災地に入り、情報支援を行うことを想定した構成を図2に示す。

船内で、既存のインフラである無線通信設備や衛星通信設備を用いて被災地で有益となる気象情報・安否情報などを収集する。取得した情報を支援者Aが所持するDTN タブレット端末に保存する。既存のインフラ以外のエリアである被災地で活動する支援者が所持しているDTN タブレット端末には、避難所などで得られた安否情報や口コミ情報（不足している物資や要望）などを適時保存する。

避難所1に到着した支援者Aは、船舶で得られた情報を支援者Bが所持しているDTN タブレット端末と近距離無線通信機能で接続し、蓄積運搬型方式により情報共有を行う。それと同時に、支援者Bが所持している既存のインフラ以外で得られた新たな情報の共有を行う。また、避難所内に限らず、巡回途中、別のDTN タブレット端末所持者（支援者C）とすれ違う際に近距離無線通信機能で接続することで、

図3 船舶と避難所との間を長距離無線で接続し、広範囲で情報支援を行うことを想定した構成

蓄積運搬型方式によりお互いに新しい情報を共有することができる。支援者Aは、避難所2に移動後、支援者Dと情報共有を行い新たな情報を取得する。支援者Aは、巡回途中または巡回終了後に、船舶に戻り、既存のインフラである衛星通信などを経由させ、関係機関などに情報を発信することを可能とする。

それぞれのDTN タブレット端末は、単独で中継機能を持ち情報共有の拠点となることができる。これにより、既存のインフラに依存せず、2点間の接続が常に存在しなくても、船舶を拠点とした災害情報共有ネットワークによる情報共有を可能とする。

3.2 可搬型DTN基地局を用いた構成

第3章1節で述べたようなDTN タブレット端末のみの構成の場合、船内で取得した新しい情報を各端末に配信するためには、これらの情報を取得しているDTN タブレット端末を所持する支援者とすれ違うまたは情報源である船舶に戻る必要があるため、情報伝達に時間を要するという運用上の課題が考えられる。そこで、船舶と避難所との間を長距離無線で接続し、広範囲で情報支援を行うことを想定した構成を図3に示す。

船上および各避難所に長距離通信を可能とする可搬型DTN基地局を設置する。可搬型DTN基地局は、電源装置、無線装置、アンテナおよびモニター兼データ処理装置で構成されている。船内で取得した情報を船上の可搬型DTN基地局Aを経由し、避難所1に設置した可搬型DTN基地局Bへ配信する。可搬型DTN基地局はモニター画面を備えており、取得した情報の閲覧が可能であるとともに、避難所で得られ

図4 DTN タブレット端末と可搬型 DTN 基地局を併用した複合構成

た情報の保存を可能とする。

これにより、船上の可搬型 DTN 基地局 A の通信範囲内にある可搬型 DTN 基地局とであれば、即時性の高い情報共有を可能とする。また、可搬型 DTN 基地局 B を、可搬型 DTN 基地局 C との通信可能範囲内まで移動することで、蓄積運搬型方式による情報共有も可能とする。船上では、衛星通信を利用し情報の発信や取得ができる。すなわち、船上の可搬型 DTN 基地局 A と直接接続することで、DTN タブレット端末のみの構成と比較し、広範囲に即時性の高い船陸間災害情報共有ネットワークを構築することが可能となる。

3.3 DTN タブレット端末および可搬型 DTN 基地局を用いた複合構成

DTN タブレット端末と可搬型 DTN 基地局を併用した複合構成を図4に示す。船上の可搬型 DTN 基地局 A と避難所1の可搬型 DTN 基地局 B は、直接通信が可能であるが、避難所2は、電源や設置場所が確保できないなどの事情により可搬型 DTN 基地局を設置できず、直接通信する手段がなく孤立通信環境であると想定する。この場合、支援者 A は、可搬型 DTN 基地局 B で取得した情報を DTN タブレット端末に保存し、避難所1から避難所2へ徒歩または車両で移動する。支援者は、避難所1を拠点とすることで情報源の船舶に戻らずに、蓄積運搬型方式による情報共有が可能である。

DTN タブレット端末と可搬型 DTN 基地局を用いた複合構成は、効率的な支援者の動線、広範囲への即時性およびタブレット端末の機動性を併せ持つ船陸間災害情報共有ネットワークの構築を可能とする。

図5 可搬型 DTN 基地局の配置図

この地図は国土地理院の地図閲覧サービスを利用したものである。

表1 可搬型 DTN 基地局の無線仕様

周波数	260MHz 帯
空中線	無指向性
利得	0dBi
空中線電力	5W

4. 通信実験と評価

第3章で提案した船陸間災害情報共有ネットワークを、DTN タブレット端末と可搬型 DTN 基地局を用いてフィールド上に構築し、通信実験を行い評価した。

4.1 通信実験概要

2013年10月22日～24日、宮城県石巻市の石巻港にて通信実験を行った。使用した可搬型 DTN 基地局の無線仕様を表1に示す。周波数は、波長が1～10mで、山や建物の陰にもある程度回り込んで伝えることができる VHF 帯の 260MHz を採用した。アンテナは、動揺のある船上に可搬型 DTN 基地局の設置を想定していること、避難所にアンテナを設置する際にアンテナの向きの調整が不要なことなどから無指向性を使用した。

図5に可搬型 DTN 基地局の設置点を示す。情報の発信・受信の拠点となる船上の可搬型 DTN 基地局を想定し、石巻港岸壁（標高約 4.6m）に可搬型 DTN 基地局（想定船上局）を設置した。次に、船上の可搬型 DTN 基地局（想定船上局）から約 0.7km の地点にある石巻港湾合同庁舎屋上（標高約 20.0m）を避難所1と想定し、可搬型 DTN 基地局（想定避難所1）

図6 実効スループットとパケットロス率
(ケース 1)

図7 実効スループットとパケットロス率
(ケース 2)

を設置した。また、可搬型 DTN 基地局 (想定船上局) から約 3.9km の地点に位置する日和山公園 (標高約 46.5m) を避難所 2 と想定し、可搬型 DTN 基地局 (想定避難所 2) を設置した。各可搬型 DTN 基地局には DTN タブレット端末を配置した。

4.2 実験 1: 実効スループット・パケットロス率・RSSI の計測

可搬型 DTN 基地局間の実効スループット、パケットロス率および RSSI (Received Signal Strength Indicator 以下、RSSI) の関係を計測する目的とし通信実験を行い評価した。4Kbit のデータを 1 秒間隔で送信し、実効スループットおよびパケットロス率を計測、RSSI も同様に 1 秒間隔で計測した。計測する可搬型 DTN 基地局間を、次のようにケース 1 およびケース 2 とし、各避難所に可搬型 DTN 基地局を固定した運用を想定し、実験を行った。

- ・ ケース 1
可搬型 DTN 基地局 (想定船上局) と
可搬型 DTN 基地局 (想定避難所 1) 間
- ・ ケース 2
可搬型 DTN 基地局 (想定避難所 1) と
可搬型 DTN 基地局 (想定避難所 2) 間

図 6 および図 7 は、ケース 1 およびケース 2 の経過時間を横軸とした、実効スループットとパケットロス率の計測結果である。また、図 8 は、経過時間を横軸とした、それぞれの RSSI の計測結果である。

計測した RSSI の中央値について、比較した。ケース 1 は -64dBm で、ケース 2 は -80dBm と 16dBm の差がみられた (図 8)。ケース 1 はアンテナ間の距離が約 0.7km であるのに対し、ケース 2 では約 3.9km とアンテナ間の距離に約 5.6 倍の差がある。受信電力

図8 RSSI の比較

は、アンテナ間の距離の 2 乗で減衰するため、比較的大きな差が現れたと考えられる。

ケース 1 では、安定した実効スループットが得られ平均で 1.7kbps、パケットロス率は 0% であった。しかし、ケース 2 では、パケットロス率が高まると実効スループットは低下し、何度か 0kbps を示した。パケットロス率は常に 100% を示すことはなく、実効スループットは平均で 1.2kbps とケース 1 より 0.5kbps 低い計測値となった。これらのことから、ケース 2 は、正常にデータ通信を行うために必要となる受信電力のしきい値付近に位置し、パケットロス率の変動も大きいことから、距離的に通信の限界地点での劣通信環境下にあったと推察される。

4.3 実験 2: 画像データの共有

避難所に設置する可搬型 DTN 基地局間では地理的条件などによりケース 2 のような RSSI が低く、パケットロス率が高くなるなどの劣通信環境となることも考えられる。ケース 2 を用いて、二次災害防止などの観点から避難所で必要となる情報の 1 つであり、船舶に搭載されている衛星通信設備や無線通信設備で情報収集が可能な天気図を画像データ (40Kbytes) として送信し、劣通信環境下での情報共有の可否について通信実験を行い評価した。

想定避難所 1 から想定避難所 2 へ転送開始後、約 5 分で転送が完了し、受信側の可搬型 DTN 基地局で天気図が受信できたことを確認した。実験 1 から、ケース 2 では、実効スループットが 1.2kbps であるため、4 分 30 秒程度で天気図の転送は完了すると予測された。しかし、劣通信環境下の影響により何度かリトライが行われ、予測より 30 秒程度多く転送時間を要したと推察される。想定避難所 2 に設置した可搬型 DTN 基地局で受信し、DTN タブレット端末で天気図を閲覧している様子を図 9 に示す。送信タイムアウトは発生せず、転送が正常に完了し、天気図の閲覧ができることを確認できた。

図 9 劣通信環境下での情報共有

5. 考察

本研究では、大規模災害が発生した際に想定される孤立した劣通信環境下で、船舶を拠点とした情報共有について提案および評価した。

DTN タブレット端末を用いた構成では、大規模災害発生直後の劣悪な陸路においても、支援者は DTN 通信が可能な小型軽量のタブレット端末を所持し避難所を巡回することで情報共有の可能性を示した。エンド・ポイントの接続状態がない場合は、即時性のある情報共有はできないものの、その間を徒歩や車両により運搬することで、無線でのネットワーク構築時に発生する事前の電波伝搬調査やアンテナの設置などの煩雑さを減らし、無線で直接接続できない避難所までの情報共有の可能性を示した。また、使用した DTN タブレット端末では、市販されている多くのスマートフォンにも搭載されている Android OS を採用した。これにより、被災者が所持しているスマートフォンまたはタブレット端末が DTN タブレット端末として利用できる可能性を生み、より詳細で広範囲での情報共有の可能性を持たすことができたと考える。

可搬型 DTN 基地局を用いた構成では、2 点の基地局間の実効スループット、パケットロス率および RSSI の関係を計測する目的とし通信実験を行い評価した。実験 1・ケース 1 では、パケットロスもなく安定した通信が行えることを確認したものの、受信電力は距離の 2 乗に反比例し、減衰するため、ケース 2 では安定した通信を行える RSSI を下回り、パケットロス率が上がったものとする。実験 2 では、実際に船舶で取得できる天気図のデータを用いた実験により、地理的条件などで通信する 2 点間でパケットロス率が高い劣通信環境下においても、ファイ

ルを断片化し送出可能な DTN 技術を用いることにより情報共有の可能性があることを示した。IEEE802.11b/a/n などの無線 LAN では、使用する周波数が 2.4GHz 帯または 5GHz と高周波であるため、長距離通信を行う場合、2 点間でアンテナの指向性をお互いに合わせるなど、ネットワーク構築の前に電波伝搬調査が必要となることが多い。しかし、本研究で使用した可搬型 DTN 基地局を用いた通信実験から、3km 程度の 2 点間であれば、パケットロス率の変動が強く、通信が安定しない状態の中でもファイルの転送が実現できた。これにより、事前に基地局間で厳密な電波伝搬調査を必須とせず、無指向性のアンテナの採用とファイルを分割し送出を可能とする DTN 技術により、迅速なネットワーク構築の可能性が示された。このことは、錨泊中または海面を移動することで発生する船舶特有の揺れによる強いパケットロス率の変動の中でも、船上に可搬型 DTN 基地局を設置することで、船舶と避難所を結ぶネットワーク構築の可能性が示唆された。

提案した構成の中でも、可搬型 DTN 基地局を船上に設置し、各避難所に設置した可搬型 DTN 基地局間を無線で接続する構成を、DTN タブレット端末を併用する複合的な構成とすることで、地理的条件などにより無線で接続することが難しい山間部などへも情報の伝達を可能とし、より広範囲への情報の拡散が見込める船陸間災害情報共有ネットワークとなった。

著者らが提案する手法は、大規模災害発生後に、船舶を拠点とすることで船舶に搭載されている設備で接続・利用できる既存のインフラと、それに頼らないインフラの複合的であり、迅速に船陸間災害情報共有ネットワークを構築できる可能性を示すこと

ができた。これにより、被災者と支援者間の情報共有を促し、安否の確認、円滑な救援活動や二次災害の防止に貢献できる提案となったと考える。

6. おわりに

本研究では、大規模災害発生時を想定し、船舶と被災地を結ぶ船陸間災害情報共有ネットワークの提案と評価を目的として、石巻港、石巻港湾事務所および日和山公園間で通信実験を行った。その結果、船舶と DTN 技術の融合により、新たな船陸間ネットワークの提案と可能性を示すことができたと考える。

船舶は、多くの物資を一度に運ぶことができることから、大規模災害時などに救援物資の輸送などで活躍できる。また、大規模災害発生時を想定し、船舶を拠点とした情報共有に着目した研究は少なく、船舶を WiFi スポットのように情報支援の拠点とする著者らの今回の提案が、船舶の新たな活用を生むきっかけになればと考える。

船上に開設できる無線局は、電波法などにより目的や通信の相手方が定められている。船上に開設できる無線局を実験局として取得したものの、様々な事情により無線局免許状の移動範囲が宮城県周辺と定められた。これにより、本研究では、実験場所の制約を受けることとなった。そのようななか、2013 年 10 月の実験予定日では、石巻港に台風が襲来し、実船上に可搬型 DTN 基地局を開設しての通信実験を行うことができなかった。その後、2014 年度も航海訓練所所属練習船が石巻港に入港する機会があったものの、本船側の実習計画・運航計画と本研究の実験計画の調整がうまくいかず、実船を用いた通信実験を断念せざるをえなかった。

電波法などの改正により船陸間で使用できる新たな周波数の解放も見込まれる。今後は、船陸間で使用できる周波数も含め検討を行い、実船を用いた船陸間での DTN 通信実験の実現を目指すこととした。

謝辞

本研究にご協力を頂きました石巻港湾事務所および航海訓練所研究調査室の職員の皆様に謝意を表します。最後に、本実験に関係されました関係機関の皆様に感謝いたします。

参考文献

(1) 阪根靖彦：東日本大震災における航海訓練所練

習船の救援活動，日本マリンエンジニアリング学会誌，第 47 巻，第 2 号，p. 189, 2012. 3.

- (2) 総務省：東日本大震災における情報通信の状況，平成 23 年度版情報通信白書，p. 2, 2012. 7.
- (3) W. Richard Stevens：詳細 TCP/IP，p. 256，ソフトバンク株式会社，1997. 3.
- (4) 永田晃・山村新也・鶴正人：DTN 技術がもたらす大域情報流通基盤，電子情報通信学会総合大会講演論文集，2011 年通信 (2)，p. 123, 2011. 2.
- (5) The Delay-Tolerant Networking Research Group：<https://sites.google.com/site/dtnresgroup/>，2014. 1.
- (6) 山崎康広・植田啓文・小倉一峰・山垣則夫・藤田範人：災害時利用を想定した DTN 分散型情報共有システムの開発とそのフィールド実証実験，電子情報通信学会 信学技報，p. 31, 2013. 5.
- (7) 植田啓文・藤田範人：DTN におけるノード分布推定に基づくコンテンツ複製配置方式，電子情報通信学会 信学技報，pp. 49-54, 2009. 5.
- (8) 陶山優一・横田裕介・大久保英嗣：移動端末を用いた災害情報システムにおける DTN ルーティング手法，電子情報通信学会 信学技報，p. 118, 2009. 1.
- (9) 浦上美佐子・松野浩嗣・岩崎寛希：海上無線 LAN を利用した小型船舶対象の安心ネットワーク構築，日本航海学会論文集 (111)，pp. 174-180, 2004. 9.
- (10) 山本幹・松田崇弘：無線 TCP の研究動向，電子情報通信学会，信学技報 (2003-111)，p. 48, 2003. 11.
- (11) 金田知展・中村嘉隆・高橋修：DTN を用いた災害時通信システム構築法の提案，情報処理学会，シンポジウムシリーズ，2013 巻，2 号，p. 964, 2013. 7.