論 説

スマートマイニングのための Wi-Fi アドホックによる地下坑内通信技術

池田 啓¹⁾・川村 洋平²⁾・トンゴル ゼドリック²⁾・伊藤 豊²⁾・ジャン ヒョンドウ³⁾

Development of Underground Space Communication Systems Using Wi-Fi Ad Hoc for Smart Mining

Hajime IKEDA¹⁾, Youhei KAWAMURA²⁾, Zedrick Paul L. TUNGOL²⁾, Yutaka ITO²⁾
and Hyongdoo JANG³⁾

Abstract : As the world's finite resources are getting depleted, technological innovation has become more indispensable to the mining industry for it to keep up with both rising demand and decreasing mineral abundance. Hence this study discusses the development of new resource development technology, termed "smart mining" by combining mining and Information and Communications Technology (ICT). With "smart mining", nearly all aspects of a mining operation can be improved, such include efficiency and safety. One of such applications of this concept is in open pit mines, where a communication system can be created using satellite technology. In underground mines however, where satellite signals cannot penetrate, optical fiber cables have been used for mine automation and monitoring. However, such physical connections are prone to wear and inevitable breakage in an underground environment. It is against this backdrop that a new monitoring system using Wireless Sensor Networks (WSNs) was then incorporated with the aim to subvert these issues. Several studies have used WSNs to create a monitoring system using various wireless communication technologies. This study therefore proposes a monitoring system that uses Wi-Fi ad hoc wireless communication. Evaluation of results from experiments that test the system's capabilities have shown that it is sufficient for underground mine monitoring applications. Moreover, this study believes that in addition to improving underground monitoring systems, Wi-Fi ad hoc wireless communication systems could also be used for other implementations of "smart mining".

Key words : Smart Mining, Monitoring System, Wi-Fi ad hoc, WSNs, Underground

1. はじめに

現在、世界の鉱山において鉱物資源を安全・効率的に採掘（開発）するために情報化や機械化が盛んに進められている。鉱物資源は有限であることから、技術革新による可採埋蔵量の増加がより必要不可欠となっている。鉱山操業に大きく関係する学問および技術体系である採鉱学は様々な分野の融合領域である。鉱山操業への技術は、より高い安全性および効率性が求められている（World Economic Forum, 2017 ; Khanzode *et al.*, 2011 ; Saleh and Cummings, 2011）。そして、採鉱学とわが国の強みである ICT（Information and Communications Technology）の融合複合技術による新たな資源開発技術（スマートマイニング）がこれを達成する。なかでも、多くの大手資源企業は自動

化技術の導入を検討している（Hainsworth, 2001）。しかしながら、自動化技術が実用化されている鉱山現場のほとんどが露天掘り鉱山となっている。露天掘り鉱山が地表に面していて衛星を経由した通信システムを利用することができることが主な理由となっている。一方、坑内掘りが行われている地下鉱山では、地下深くに位置していることから、自動化のための通信システムとして Leaky Feeder のような通信インフラを必要とする無線通信が用いられている。しかしながら、通信インフラには様々なデメリットがあるため、新たな通信システムの整備が求められている（Kawamura *et al.*, 2014 ; Moridi *et al.*, 2014）。

地下坑内に通信システムを整備することは地下鉱山操業に関連する様々な危険の解消につながる。通信システ

2017年12月26日受付 2018年2月8日受理

日本情報地質学会・地質情報整備活用機構 共催シンポジウム 2017（2017年11月、東京）で一部講演。

1) 秋田大学 Faculty of International Resource Sciences, Akita University, Akita, Japan, 010-8502, E-Mail: ha2ikeda@gmail.com

2) 秋田大学大学院 Graduate School of International Resource Sciences, Akita University, Akita, Japan, 010-8502.

3) カーティン大学 Western Australian School of Mines, Curtin University, Kalgoorlie, Australia, WA 6430.

ムを利用したモニタリングシステムは、条件が絶えず変化している地下坑内の採掘において生産性と安全性を高める上で重要なシステムである。このモニタリングシステムは地下坑内にいくつものセンサを設置し、気温、湿度、およびガス濃度などといった測定要素を取得し、坑内環境の把握を達成できるシステムである (Diao *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2014)。そしてこのモニタリングシステムは地下鉱山の自動化を進める上でなくてはならないものである。

地下鉱山モニタリングシステムに無線センサネットワーク (WSNs) を利用することで地下の崩壊や機械の誤動作による有線通信における通信線の破損問題を緩和し運用機能が安定する (Akyildiz and Stuntebeck, 2006; Saraswala, 2013; Chehri *et al.*, 2009)。地下鉱山の企業は環境モニタリングや作業者の位置把握やコミュニケーションシステムを目的として WSNs を利用している。WSNs は Bluetooth, Ultra Wide Band, および ZigBee や Wi-Fi などが挙げられる。それぞれに接続端末数、通信速度、および通信距離などの違いがある。また、WSNs は柔軟なネットワーク構成を持ち、障害に対するサポートが容易である。WSNs はある通信ルートでデータの伝達が失敗した場合、他の通信可能なルートでネットワーク機能を維持することを可能にする。したがって、WSNs は、環境条件の測定、鉱山従事者の位置の監視、および地下通信システムとして利用されてきた (Ralston *et al.*, 2014)。そして、Wi-Fi アドホック無線通信はアクセスポイントまたはルーターを必要とせずにデバイス間の P2P (peer to peer) 接続を直接確立すること、使用機材の動き (スマートフォンを所持した鉱山従事者の移動) を情報伝達の手段として使用することができる。

本研究では地下鉱山の変化する坑内環境に対処すべく Wi-Fi アドホック無線通信を利用したモニタリングシステムを構築することを目的としている。具体的には提案するモニタリングシステムにて使用される無線通信の RSSI と通信速度を計測している。地下鉱山 (秋田県にある史跡尾去沢鉱山) モニタリングシステムの Wi-Fi アドホック無線通信試験を行い、安定的に通信が行える通信距離と通信速度をデータの分析により求めた。受信信号強度 (RSSI)、通信速度および通信距離といった性能指標の測定と解析を検討した。得られた結果によって、この技術が地下鉱山の採掘作業の情報化に適しているかどうかを判断することができる。

2. スマートマイニングとその現状

2-1. スマートマイニングとは

更新性資源の積極的利用が望まれる現代ではあるが、非更新性資源への需要は依然高い。このような限りある鉱物資源を安全・効率的に採掘 (開発) する技術の開発が世界的に求められている。また、採掘対象の鉱床はより深く、より低濃集なものだけが残ることからも、技術革新による可採埋蔵量の増加が必要不可欠となっている。

採鉱学は地質学、岩盤力学 (工学)、土木工学、防災工学、機械工学の融合領域にある学問および技術体系であり、独自の発展を遂げてきた。一方で我が国では ICT (ソフトコンピューティング、人工知能、ビッグデータ、データマイニング等) が目覚ましい発展を見せている。この技術は汎用性および他技術との親和性が非常に高く、様々な分野がその応用に注目をしている。

本研究では、我が国の強みであるこれらの技術を学際的アプローチにより採鉱学に適用し、世界で通用する (求められる) 新たな資源開発技術 (これをスマートマイニングと名付ける) を創出・構築することを目的としている。第1図にスマートマイニングの概念図を示す。鉱山の開発 (掘削) そのものは機械により行われるが、その意思決定 (Decision)、操業 (Operation) および計画 (Planning) は人により行われている。スマートマイニングは、鉱山開発 (鉱山)、鉱山操業 (人) および ICT を結合するものである。つまり、スマートマイニングとは、個別の具体的な研究を指すものではなく、今後、鉱業界でますます必要とされるであろう高効率で安全性を保障する「ICTと採鉱学の融合複合技術」である。

第1図 スマートマイニングの概念図

2-2. スマートマイニングの活用例

重機メーカーによる大型トラックおよびドリル機器の自動化や遠隔地からの衛星を経由した運転状況の監視技術、運行管理システム等の実用化を受け、資源メジャーの中には、これらの技術を導入することにより独自の技術開発を推進し、鉱山現場での安全対策や積極的なコスト削減を図っているが、資源メジャー以外でも多くの大手資源会社が自動化技術の導入を検討している。また、今後自動化技術は、AI (特にディープラーニング) の導入により更に進んだシステムの開発が進むものと予想される。

鉄鉱石鉱山、非鉄金属鉱山および大規模土木作業現場では、小型カメラ技術の進歩 (例えば小型 4K ビデオカメラ) およびディープラーニングを利用した画像認識性能の向上により、ドローンを活用した現場の 3次元モデルによる採掘・作業計画を実現しており、これら技術も日進月歩で進化している。

スマートマイニングの分野ではすでに学術側よりも産業側からのアプローチが盛んであり、コマーシャルの技術が多数実用化されている。以下に実用化されている代表的な取り組みを示す。

Komatsu Ltd.

・機械稼働管理システム「KOMTRAX」

建設機械に取り付けた機器から、車両の位置や稼働時間、稼働状況などの情報を提供するシステムで、保有車両の稼働率向上や維持費の低減等、機械のライフサイクルでのサポートに貢献する。

・鉱山機械管理システム「KOMTRAX Plus」

KOMTRAX Plus は、鉱山向け大型機械の管理システムで、遠隔地からでも衛星通信経由で、ほぼリアルタイムに車両の「健康状態」、「稼働状態」を把握できる。

・無人ダンプトラック運行システム

高精度 GPS や障害物検知センサ、各種コントローラー、無線ネットワークシステム等を搭載したダンプトラックを中央管制室で運行管理し、完全無人稼働を実現させている。

・土木・建築現場 ICT ソリューション「スマートコンストラクション」

情報通信技術 (ICT) を活用した効率的な施工を実現する新事業である。ドローンを活用した現場の3次元モデリングからはじまりクラウドによるデータ管理で自動化・最適化を実現するトータルシステムである。

Hitachi Construction Machinery Co., Ltd.

・ダンプトラック自律走行システム (Autonomous Haulage System: AHS)

運用に向け豪州で試験中である。

・鉱山運行管理システム (Fleet Management System: FMS)

ダンプトラックや鉱山機械の配車や走行を最適化するツールとして運用中である。FMS クラウド化によって遠隔管理が可能である。

Caterpillar Inc.

・鉱山マネジメント「Cat Mine Star System」

このシステムは、リアルタイム運行管理、機器健康状態管理システム、自律装置システムなどの組合せによる。

DATAMINE

・「SIROVISION」

露天や坑内において撮影された画像から正確な測量を行うことができるシステムである。3次元モデルによる岩盤情報のマッピングと地質分析が可能である。非鉄金属鉱山では採掘計画等に実用化されている。

SIROVISION は豪州 CSIRO で開発され、DATAMINE 社が商用化している。

ADAM Technology

・「3DM Analyst」

画像解析によるマッピングシステムであり、多くの鉱山会社が採用している。ドローンによる空撮からのマッピングも実用化されており、豪州の炭鉱でも導入されている。

Rio Tinto

・無人トラックの運用

Rio Tinto の鉄鉱石鉱山 (Western Australia 州 Pilbara 地域) でコマツの無人トラックが運用されている。

3. 地下鉱山の通信システムのシステムデザイン

3-1. スマートマイニングと地下鉱山の通信システム

スマートマイニングを進めていく上で通信システムは非常に重要な役割を担っている。現在、運転技術の監視技術や重機の自動化が進んでいる鉱山現場は露天掘り鉱山である。なぜなら、露天掘り鉱山は地表に面していて衛星を経由した通信システムを利用することができるからである。一方、坑内掘りが行われている地下鉱山では、地下深くに位置していることから新たに通信システムを整備する必要がある。したがって、通信システムの開発が急がれている。地下鉱山の通信システムの主な用途は監視、連絡手段、鉱山従事者や重機の場所の把握である。監視 (モニタリング) は、環境監視と運用監視に分かれている。環境モニタリングには、塵や煙の検出、有毒ガスの濃度、温度、湿度の測定、岩石の応力のモニタリングが含まれる。一方、作業モニタリングには、重機の脱線の検出、重機および換気システムの自動化が含まれる。また遠隔地で地下鉱山の状況を把握できることは生産性と安全性の向上につながる。現在、地下鉱山内部の状況を把握することに地下鉱山の企業は費用を費やすようにしている。だが、使用しているネットワークは費用対効果を考えると地下鉱山に適しているものがない。そのため、スマートマイニングを取り入れようとする地下鉱山の企業によっては、新たな通信システムの導入は必要不可欠である。第2図に Wi-Fi アドホック無線通信システム全体の概念図を示す。第2図に描かれているように以下に記すステップでスマートマイニングを実現させる。

ステップ1

データロガーが周囲のセンサからデータを集積して保持している。そしてデータロガーの通信範囲内に入ったスマートフォンと Wi-Fi アドホック通信を行う。

ステップ2

スマートフォンを持った鉱山従事者が移動して他端末

の通信範囲に入った際に自動でWi-Fiアドホック通信が行われる。このステップ2は繰り返され、データが複製される。そして、複製されたデータを所持したスマートフォンが増えていく。

ステップ3

データを所持したスマートフォンのうち一つが地上のデータセンターに近づいた際にWi-Fiアドホック通信をする。つまり、地下鉱山の情報を地上へと回収することができる。地上まで送られたデータは通常のインフラを使用し世界中で確認が可能になる。

ステップ4

地下から送られてきたデータを解析する。採掘状況の把握にも応用できる。

ステップ5

例として坑内の気温のデータを取得し、グラフを作成している。このように通常インフラの整備されていない地下鉱山の状況が世界中で確認できるようになる。また、このシステムでは地上からの連絡も地下鉱山内へと送ることができる。

3-2. 既往の地下鉱山の通信システムのシステムデザイン

地下鉱山の通信システムを構成する通信技術には有線あるいは無線による通信技術が用いられるようになっている。有線通信には断線の危険性が増えることや通信線の再配備の手間などといった特徴がある。これに対してWSNsでは、アクセスポイントの数を減らし、センサそのものがP2P接続を可能とする。そして、それぞれに接続端末数、通信速度、および通信距離などに違いがあり、目的とするデータの種類と量に応じて選択する必要がある。第3図に

第2図 Wi-Fiアドホック無線通信システム全体の概念図

既往の地下鉱山通信システムのシステムデザインを示す。Ultra Wide Band (UWB)、Bluetooth、およびWi-Fi (インフラストラクチャ)とZigBeeの通信システムのシステムデザインを模式図として示す。これより、接続端末数、通信距離および通信速度と消費電力という特徴からUltra Wide Band、Bluetooth、およびWi-Fi (インフラストラクチャ)とZigBee通信システムを比較していく。

Ultra Wide Band

通信距離が10mと短い接続端末数が100個と非常に多い。また、通信速度が100MBと最も早く、消費電力も30mWである。以上の特徴よりUltra Wide Bandは地下鉱山内の全範囲に設置することは難しいが、狭い範囲で詳細なモニタリングや通信速度を生かしたモニタリングを行いたい際に使われている。しかしながら、Ultra Wide Bandだけで地上までデータを転送とした場合10m毎に設置する必要があり費用対効果が悪くなってしまふ。

Bluetooth

通信距離が10mと短い接続端末数が7個と非常に少ない。また、通信速度が1MBと他と比べ遅く、消費電力は1～100mWである。そしてサーバーとアクセスポイント間の通信は有線通信である。以上の特徴よりBluetoothは無線通信と有線通信の両面を持つが地下鉱山通信システムに利用する場合は利点を生かし切れない通信技術である。

Wi-Fi (インフラストラクチャ)

通信距離が100mと長く、接続端末数が30個とBluetoothと比べ多くなっている。また、通信速度が11MBと他と比べ早い、消費電力は500～1000mWである。そしてサーバーとアクセスポイント間の通信は有線通信である。以上の特徴よりWi-Fi (インフラストラクチャ)はBluetoothと比べ無線通信の利点を生かすことが出来てはいるが、アクセスポイントと有線の配線が必要ということが問題である。

ZigBee

通信距離が100mで接続端末数が65,536個と多い。また、通信速度が0.25MBと4つのうちで最も遅いが、消費電力は20～40mWである。しかしながら、サーバーへの通信も有線通信を使用せず、無線通信のみで通信を行うことができる。以上の特徴よりZigBeeは通信速度が著しく遅いが地下鉱山内の全体に設置することで地下鉱山内の環境をモニタリングすることが可能だといえる。

以上、4つの既往の地下鉱山の通信システムでは、アクセスポイントを利用する必要があり、有線通信も利用しなければいけない場合も多い。あるいは、ZigBeeのように

著しく遅い通信速度でなら地下鉱山の通信システムへの活用が可能であるが、スマートマイニングのための通信システムとしては不十分である。

第3図 既往の地下鉱山通信システムのシステムデザイン

3-3. 提案する地下鉱山の通信システムのシステムデザイン

本研究では地下鉱山のネットワーク部分に Wi-Fi アドホックモードを提案する。第4図に Wi-Fi アドホック無線通信システムのシステムデザインを示す。Wi-Fi 対応のセンサを置き、データロガーへとデータを集約させる。そうしてデータロガーに集約させたデータを鉱山従事者の動きで回収する。その後、鉱山従事者はデータの入ったスマートフォンを持ち地上のサーバーの近くへと移動することで通信システムの一役を担う。Wi-Fi アドホックモードとは、IEEE 802.11 無線 LAN の動作モードのひとつで、端末同士で P2P (peer to peer) 通信を実現する。第5図に Wi-Fi アドホックモードのイメージを示す。端末同士がバケツリレー方式で通信をすることで自身の圏外にいる端末のデータも共有できる。このように通信遅延時間が多い通信のことを DTN (Delay Tolerant Networking) という。また、端末の動きによってデータの共有もできる。Wi-Fi アドホックモードはマルチホップ通信をネットワークに活用し、バケツリレー方式でデータを伝達させることで通信範囲を拡大できる技術である。さらに、Wi-Fi アドホックモードはほとんどのスマートフォンが対応しているため、鉱山従事者のスマートフォンにアプリケーションを入れるだけでシステムへの導入が可能である。既存のデバイスを流用できること

は、経費削減につながるといえる。

このシステムによる無線通信は準リアルタイムでの通信である。地下坑内で働く鉱山従事者の動きを利用し地下鉱山からデータを回収することで地下鉱山全体に通信機器を設置する必要がなく設備投資の無駄も減る。実際、地下鉱山では採掘する階層が変化していき、広がっていくことから最小限の範囲に機材を設置したいと地下鉱山の企業は考えるためである。そのため、このシステムの通信性能次第ではスマートマイニングを取り入れようとする地下鉱山の企業が地下鉱山に導入したいと考えると推測できる。

4. Wi-Fi アドホック無線通信試験

4-1. Wi-Fi アドホック無線通信試験における評価指標

無線通信をする際に電波が安定してつながるかどうかわかることは重要である。無線通信は距離が遠くなるほど電波減衰が起きる。それにしただがって、通信速度は遅くなる。そのため RSSI (Received Signal Strength Indication) と表される受信信号強度や通信速度を計測することで電波が安定

第4図 Wi-Fi アドホック無線通信システムのシステムデザイン

第5図 Wi-Fi アドホックモードのイメージ

につながるかどうか判断できる。RSSIは式(1)で表される。式(1)の導出に式(2)~(4)を使用した。

$$\text{RSSI} = \text{TxPower} + \text{GTA} + \text{GBA} - 10 \log(12.00 \times 10^8 \pi d / f)^2 \quad (1)$$

$$\text{RSSI} = \text{TxPower} + \text{GTA} + \text{GBA} - L \quad (2)$$

$$L = 10 \log(4 \pi d / \lambda)^2 \quad (3)$$

$$\lambda = 3.00 \times 10^8 / f \quad (4)$$

ここで、RSSIは受信信号強度、TxPowerは送信電力(dBm)で表したものである。さらにGTAとGBAは等方性放射器に対する送/受信アンテナの絶対利得(dBi)であり、Lは自由空間伝搬損失(dB)である。そして λ とdはそれぞれ波長(m)と距離(m)、fは周波数(MHz)である。

式(1)よりRSSIはTxPowerが一定の時に二点間の距離が広がるほど小さくなる事が分かる。式(2)より送/受信のアンテナの絶対利得もRSSIの数値に影響を与える。式(3)、(4)より自由空間では、電波減衰量は距離の二乗と波長の二乗に比例する。しかしながら、実際の環境では、地球からの反射波が干渉を引き起こし、伝搬損失に関連する他の要因が現れる。従って、地下鉱山内では式(1)で表されるような単純に損失を計算することはできない。しかしながら、測定値から得られる傾向を用いて実際の値を推定することは可能である。また、周辺環境が伝搬損失に寄与していることを考慮して、様々な環境での通信試験を行った。

本研究ではRSSIが-80dBmを超える時を安定した無線通信が確立されるとした。また通信速度は単位時間あたりのデータ転送量であり、システムの通信完了に必要な時間および遅延を決定するのに役立つ。そして周囲の環境によっても電波減衰は変わってくるため、周囲や遮蔽物の性質および地形によって通信試験を行うことが必要である。

4.2. Wi-Fiアドホック無線通信試験の概要

本研究の初期段階として、Wi-Fiアドホックモードに対応した通信機器とスマートフォンを使用し、データの送受信試験を行った。

Wi-Fiアドホック無線通信モニタリングシステムを第6図に示す。Wi-Fiアドホック無線通信モニタリングシステムは複数の子機(カメラ)で撮影した画像を親機(データロガー)に転送してスマートフォンが近づいて通信距離に入った際にデータを転送し、パケットリレーのように他のスマートフォンに転送していくというシステムである。本研究で画像データをデータロガーで送ることとしたのはデータ容量をコントロールし易いためである。

通信試験は、秋田県の閉鎖銅鉱山である史跡尾去沢鉱山で行った。第7図に尾去沢鉱山の所在地を示す。第7図は国土地理院より引用し作成した。尾去沢鉱山は鉱脈型銅鉱床と呼ばれる脈状の銅鉱脈を採掘した鉱山であり1978年に閉山した。第8図に通信試験場所の模式図を示す。鉱山トンネルは高さ約2m、幅2mで、アーチ状の天井と周囲の岩が露出していた。鉱山内の湿度は90%に達した。鉱山内の測定では、直進経路と105°の曲がり角経路を通る通

第6図 Wi-Fiアドホック無線通信モニタリングシステムの模式図

信の2つのケースが考慮された。

通信試験のために、画像データはデータロガーに送られ、事前に保管した。次に、データロガーからスマートフォンにデータを送信した。スマートフォンで受信したデータは通信性能を調べる指標とした。装置は、坑道の中心線に沿って配置し通信試験を行った。地下坑内におけるWi-Fiアドホック通信の性能を評価するには、通信距離と通信速度、およびデータの安定性で評価する必要がある。これらの値は、RSSIおよび通信速度を測定することによって判断される。通信距離と通信速度は、直線と曲がり角の両方の通信試験の結果より計算した。

データロガーとカメラはともに、Raspberry Pi 3とGW-300S KATANA モジュールを使用し、IEEE 802.11 a/ac/b/g/n規格を使用することとした。さらに送信電力を最大にして通信試験を行った。またカメラにはカメラモジュールとしてSony IMX219PQ センサを使用した。このモジュールの解像度は、1MBのサイズの画像ファイルを取得して送信するために削減された。この通信試験に使用された

第7図 尾去沢鉱山の所在地

第8図 通信試験場所の模式図

スマートフォンは、IEEE802.11 a/ac/b/g/n の多入力多出力 (MIMO) 対応の iPhone 6s である。

第9図に Wi-Fi アドホック無線通信試験の様子を示す。第9図に示すように、データロガーとスマートフォンは地上から1mの高さに固定し、スマートフォンをデータロガーから5m間隔で実験を開始させた。第10図に Wi-Fi アドホック無線通信試験の模式図を示す。第10図に示すように通信試験を5m間隔で接続が切れるまで行った。次に、移動させた後にデバイス間で通信を行い、RSSIと通信速度を測定した。各測定地点で、データを100回送信して通信の安定性を適切に評価した。

通信速度は、データ送信から得られた画像ファイルサイズを、ファイルの転送に費やした時間で割ることによって計算された。これを式(5)に示す。

$$\text{通信速度} = \frac{FS}{ST} \text{ (MB/s)} \quad (5)$$

ここで、FSは画像ファイルサイズ (MB)、STは転送時間 (s) である。

通信試験で得られた値から安定した接続が確立できるデータロガーとスマートフォンとの通信距離を考察する。

5. Wi-Fi アドホック無線通信試験結果

尾去沢鉱山坑内の直線と曲がり角における RSSI と通信速度の相関グラフを第11図に示す。RSSIが-80dBm以上 (安定した接続の基準) である場合はほとんどの場所で少なくとも、2~2.5MB/sあるいは16~20Mbpsの通信速度が可能であることが判明した。つまり、RSSIを測定するだけで通信速度の推測ができるといえる。

次に通信距離を判断するために RSSI と距離との相関グラフを第12図に示す。このとき直線経路と曲がり角経路に加え参考値として自由空間の値もグラフに示した。自由空間の値は式(1)の送信電力と送/受信のアンテナの絶対利得を考慮せずに求めた。第12図において、直線での通信試験から得られたデータは、100mにおける RSSI が-80.3dBmであり、その後は-80dBm前後で変動する。不均質な岩壁が波の反射に影響を及ぼした地下鉱山の性質に起因する可能性がある。したがって、自由空間伝播損失がこの状況では適切な推定値ではないことが分かる。傾向線を使用することにより、システムの通信距離は直線的な経路で95mであると結論付けられる。また、曲がり角での通信試験の場合、第12図は、20mにおける RSSI が-83.6dBmであり、それよりさらに減少することを示している。傾向線を使用すると、曲がり角経路で通信距離が15mであると結論付けられる。しかしながら、通信が可能だった距離も短かったため試行できた回数も少なかった。

全体の結果に基づいて、データロガーを曲がり角に設置するか、または95mごとの直線で設置すれば十分であると結論づけられる。このとき、通信速度は16~20Mbpsである。そして回収するスマートフォンを所持した鉱山従事

第9図 Wi-Fi アドホック無線通信試験の様子

第10図 Wi-Fi アドホック無線通信試験の模式図

第11図 RSSIと通信速度の相関グラフ

第12図 RSSIと距離の相関グラフ

者が時速20km/hの速度の重機に乗り、通信範囲内を通過する33.9s間で67.8～84.8MBのデータの通信が可能である。この一度に通信可能なデータ総量は取得したいデータのサンプリング周波数、頻度によるが、テキストファイルのみならず画像ファイルも確実に送ることができるため十分な転送可能量といえる。さらに、鉱山従事者の動きを管理することや、中継地点（データロガー）を設置することでより安定的に通信が可能である。このWi-Fiアドホック無線通信は、地下鉱山坑内環境において安定したネットワークを構築するのに適していると考えられている。

6. おわりに

地下鉱山での通信手段の確保はスマートマイニングの活用に繋がる。これにより、環境モニタリング、鉱山従事者の位置把握、採掘運用及び通信システムの利用が可能になる。現在、地下鉱山の情報化においてWSNs（ワイヤレスセンサネットワーク）が用いられるようになってきた。WSNsを用いられるように移り変わったのは有線より初期コスト、ランニングコストが安く抑えられることや柔軟なネットワークを構成できるといった利点があったからである。BluetoothやUWBやZigBeeなどの研究が主になされてきているが、本研究ではWi-Fiアドホックモードに着目した。Wi-Fiアドホックモードには以下のような特徴がある。第一にアクセスポイントを必要とせずデバイス間のP2P（peer to peer）で直接接続できる。第二にスマートフォンを持った鉱山従事者の移動が情報伝達の手段になる。これらの特徴によって地下鉱山の情報化に適していると考えられる。

この通信システムの提案をする際にWi-Fiアドホックモードの性能を測る必要がある。そのため、史跡尾去沢鉱山を通信試験地として電波減衰の調査試験を行った。通信試験の際にIEEE802.11nを使用し、端末の出力を最大にした状態でデータロガーとスマートフォンを通信させた。通信試験場所として直線と曲がり角を選択した。通信試験ではRSSIと通信速度を測定することで安定的にデータ通信

可能な距離と通信速度を判断した。

通信試験の結果として安定的な無線通信を行う（-80dBm以上）には、直線でデータロガーから95m離れた地点で16～20Mbpsの通信速度で通信できる。また曲がり角ではデータロガーから15m離れた地点で16～20Mbpsの速度で通信できる。さらに、RSSIが-80dBm以上のほとんどの地点で他のWSNsと比べても十分早い16～20MB/sの通信速度が可能ということが分かった。そして、重機の移動速度を20km/hとした際に回収可能なデータ量は67.8MBであった。この一度に通信可能なデータ総量は取得したいデータのサンプリング周波数、頻度によるが、テキストファイルのみならず画像ファイルも確実に送ることができるため十分な転送可能量といえる。また、鉱山従事者の動きを管理することや、中継地点（データロガー）を設置することでより安定的に通信が可能である。他のWSNsと比べてもWi-Fiアドホック無線通信が地下鉱山のモニタリングシステムに適した十分な通信性能を持っていることが明らかになり、今後の地下鉱山操業に有効なWi-Fiアドホック無線通信システムが構築できた。この通信システムが地下鉱山のモニタリングシステムだけでなく他のスマートマイニングの実現にも貢献する。

謝辞：本論文の投稿の機会をいただいた日本情報地質学会に感謝いたします。

文 献

- Akyildiz, I. F. and Stuntebeck, E.P. (2006) Wireless underground sensor networks. *Ad Hoc Networks*, vol. 4, pp. 669-686.
- Chehri, A., Fortier, P. and Tardif, P. M. (2009) UWB-based sensor networks for localization in mining environments. *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 5, pp. 987-1000.
- Diao, J., Zhang, G., Hu, H., Zou, Z. and Zhang, B. (2015) Design and application of electrical fire monitoring system in mining industry. *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 25, no. 2, pp. 305-310.
- Hainsworth, D. W. (2001) Teleoperation User Interfaces for Mining Robotics. *Autonomous Robots*, vol. 11, no. 1, pp. 19-28.
- Hu, H., Gao, J. and Yao, Y. (2014) Land deformation monitoring in mining area with PPP-AR. *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 207-212.
- Kawamura, Y., Dewan, A. M., Veenendaal, B., Hayashi, M., Shibuya, T., Kitahara, I., Nobuhara, H. and Ishii, K. (2014) Using GIS to develop a mobile communications network for disaster-damaged areas. *International Journal of Digital Earth*, vol. 7, no. 4, pp. 279-293.
- Khanzode, V. V., Maiti, J. and Ray, P. K. (2011) A methodology for evaluation and monitoring of recurring hazards in

- underground coal mining. *Safety Science*, vol. 49, no. 8, pp. 1172-1179.
- Moridi, M. A., Kawamura, Y., Sharifzadeh, M., Chanda, E. K. and Jang, H. (2014) An investigation of underground monitoring and communication system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 43, pp. 362-369.
- Ralston, J. C., Reid, D., Harfrave, C. O. and Hainsworth, D. W. (2014) Sensing for advancing mining automation capability: A review of underground automation technology development. *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 24, no. 3, pp. 305-310.
- Saleh, J. H. and Cummings, A. M. (2011) Safety in the mining industry and the unfinished legacy of mining accidents: Safety levers and defense-in-depth for addressing mining hazards. *Safety Science*, vol. 49, no. 6, pp. 764-777.
- Saraswala, P. P. (2013) A survey on routing protocols in ZigBee network. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 471-476.
- World Economic Forum (2017) Digital Transformation Initiative: Mining and Metals Industry. <http://reports.weforum.org/digital-transformation/wp-content/blogs.dir/94/mp/files/pages/files/wef-dti-mining-and-metals-white-paper.pdf> (accessed: 2018/01/16)

要 旨

スマートマイニングのための Wi-Fi アドホックによる地下坑内通信技術

池田 啓・川村 洋平・トンゴル ゼドリック・伊藤 豊・ジャン ヒョンドゥ

世界の鉱山において鉱物資源を安全・効率的に採掘（開発）するために情報化や機械化を進めることが求められている。採鉱学と我が国の強みである ICT を組み合わせることで新たな資源開発技術（スマートマイニング）を創出・構築することを提案する。スマートマイニングを導入することでより安全・効率的に採掘することが実現する。現在も大手資源企業が多数実用化している。しかしながら、地下鉱山では自動化技術の導入以前に新たな通信システムを整備する必要がある。地下鉱山に通信システムを導入することでモニタリングシステムの導入も可能である。本研究では Wi-Fi アドホック無線通信を使用したモニタリングシステムを提案し、通信システムの通信性能を評価し十分な通信性能を持つことを明らかにした。そして Wi-Fi アドホック無線通信を用いた通信システムはモニタリングシステムだけでなく、他のスマートマイニングの実現にも貢献する。

キーワード：スマートマイニング, モニタリングシステム, Wi-Fi アドホック, WSNs, 地下鉱山