

博士學位論文

鉍山操業における生産性と安全性向上のための
坑内掘鉍山内モニタリングシステムに関する研究

秋田大学大学院
国際資源学研究科
資源学専攻

池田 啓

2022年3月

Abstract

As modern society becomes more sophisticated, the consumption of metal resources has become essential. There is a worldwide need for technologies to safely and efficiently mine metal resources. In addition, as the deposits to be mined are becoming deeper and lower grade year by year, there is an urgent need to increase minable reserves through technological innovation. Mining science is a discipline and technological system that integrates geology, rock mechanics, civil engineering, disaster prevention engineering, and mechanical engineering, which has developed in its own unique way. On the other hand, ICT (artificial intelligence, big data, data mining, etc.), has shown remarkable development. In the future, smart mining through ICT applications in mining science is expected to lead resource development.

Underground mines are generally located deep underground, mining companies operate under hazards such as poor lighting, confined spaces, rockfall, poor ventilation, wetness, limited communication, and structural complexity. In this context, safety and productivity in underground operations are of primary concern to companies. To solve these problems, various monitoring methods have been proposed to understand the underground environment. By installing a number of sensors in underground mines and acquiring measurement factors such as temperature, humidity, and gas concentration, it is possible to monitor the underground environment.

For this reason, this study develops an underground mine monitoring system to improve productivity and safety in mining operations. The underground mine monitoring system proposed in this study is divided into two parts: the sensing part, which is a differential measurement of in-situ stress and strain, and the data transmission part, which uses ad hoc communication. Multiple sensor units are installed in the mine, and the accumulated data is collected by ad hoc commu-

nication when a miner's smartphone approaches communication area. Next, the data transfer range is pseudo-expanded by passing data through the movements of the miners. Finally, data is transmitted to an office with a communication infrastructure by either miner or going above ground. The data sent to the office on the ground can be checked and edited anywhere in the world via the cloud. In the sensing part, the developed sensor unit is buried in a blank hole after stress release to determine the difference in stress applied from the bedrock from the strain gauge values. In this case, it is necessary to detect the orientation of the sensor unit in order to estimate how much stress is applied and from which direction.

In the communication part, among WSNs (Wireless Sensor Networks), which are scalable and suitable for underground mines, pseudo communication range expansion by miner's movement, Wi-Fi Ad Hoc communication (Wi-Fi Ad Hoc and Wi-Fi Direct) and communication obstacles can be avoided. Focusing on power line communications, we implemented and verified an ad hoc wireless communication system by testing communications from a data logger to a smartphone held by a miner. Based on the results obtained from each research item, the combination of sensor units and ad hoc communication is expected to make it possible to identify signs of rock deformation at a lower cost than previously thought possible, and to dramatically improve safety in the mine.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の目的	1
1.2	本論文の構成	2
第 2 章	既往の研究	4
2.1	本研究における研究領域	4
2.2	スマートマイニング	4
2.3	現状の坑内掘鉱山内モニタリングシステム	8
2.3.1	地下坑内の把握	8
2.3.2	環境モニタリング	8
2.4	現状の坑内掘鉱山内センシングシステム	10
2.4.1	坑内掘鉱山内のセンシング	10
2.4.2	岩盤状態の計測	10
2.5	現状の坑内掘鉱山内通信システム	14
2.5.1	有線通信	14
2.5.2	無線通信	14
第 3 章	坑内掘鉱山内モニタリングシステムデザイン	19
3.1	提案するモニタリングシステム	19
3.2	坑内掘鉱山内の測定要素とデータ量の検討	19
3.3	システムデザイン	22
3.4	まとめ	25
第 4 章	原位置応力センシングシステムの基礎研究	26
4.1	原位置応力計測	26
4.2	センサユニット諸元	26
4.3	センサユニットの姿勢検知	27

4.4	センサユニットにかかる応力の検知	28
4.5	センシングデータの転送試験	29
4.6	まとめ	31
第 5 章	Wi-Fi Ad Hoc 通信を用いた基礎研究	32
5.1	Wi-Fi Ad Hoc 通信を利用した通信システム	32
5.2	Wi-Fi Ad Hoc 通信	32
5.3	無線通信試験における評価指標	33
5.4	線形回帰	34
5.4.1	LR パラメータ表	35
5.4.2	統計表	36
5.4.3	分散分析	38
5.5	Wi-Fi Ad Hoc 通信試験の概要	38
5.5.1	屋内外での通信実験	40
5.5.2	尾去沢鉱山での通信試験	43
5.6	Wi-Fi Ad Hoc 通信試験の結果	44
5.6.1	屋内外での通信結果	44
5.6.2	尾去沢鉱山での通信結果	44
5.7	線形回帰による通信性能の評価	47
5.7.1	屋内外での通信結果に関する考察	47
5.7.2	尾去沢鉱山での通信結果に関する考察	54
5.8	まとめ	62
第 6 章	Wi-Fi Direct 通信を用いた基礎研究	63
6.1	Wi-Fi Direct 通信を用いた通信システム	63
6.2	Wi-Fi Direct 通信	63
6.3	Wi-Fi Direct 通信試験の概要	63
6.3.1	尾去沢鉱山での通信試験	64
6.3.2	実験鉱山 (Witswatersrand 大学) での通信試験	64
6.3.3	Great Nologwa 鉱山での通信試験	68

6.4	Wi-Fi Direct 通信試験の結果	69
6.4.1	尾去沢鉱山での通信結果	69
6.4.2	実験鉱山 (Witswatersrand 大学) での通信結果	69
6.4.3	Great Nologwa 鉱山での通信試験結果	69
6.5	線形回帰による通信性能の評価	73
6.5.1	尾去沢鉱山での通信結果に関する考察	73
6.5.2	実験鉱山 (Witswatersrand 大学) での通信結果に関する考察	83
6.5.3	Great Nologwa 鉱山での通信試験結果に関する考察	90
6.6	まとめ	94
第 7 章	電力線通信と Wi-Fi Direct を用いた複合通信システム	95
7.1	電力線通信	95
7.2	電力線通信試験の概要	96
7.3	電力線通信試験および Wi-Fi direct の結果	101
7.3.1	Wi-Fi Direct の通信試験結果	101
7.3.2	電力線通信性能調査の結果	102
7.3.3	複合通信システムの検討	104
7.4	まとめ	106
第 8 章	結論	108
	謝辞	110
	参考文献	110
	索引	120
	付録	1
	付録 A 線形回帰補足資料	1
	A.1 Wi-Fi Ad Hoc	1
	A.2 Wi-Fi Direct	6

目次

2.1	スマートマイニングの概念図	5
2.2	坑内掘鉱山内の情報化現状	7
2.3	坑内掘鉱山内の情報化	7
3.1	坑内掘鉱山内原位置応力モニタリングシステムデザイン	24
4.1	データログのインストールのイメージ	27
4.2	センサユニットの CAD 図	27
4.3	センサユニットの姿勢検知	28
4.4	荷重応答試験の様子	29
4.5	荷重変位曲線	30
4.6	ひずみゲージ出力値	30
4.7	データの無線通信の制御画面 (スマホ画面)	31
5.1	Wi-Fi の通信方式	33
5.2	アドホック無線通信システムのシステムデザイン	33
5.3	Wi-Fi Ad Hoc 無線通信モニタリングシステムの模式図	41
5.4	Wi-Fi Ad Hoc 無線通信試験の模式図	41
5.5	Wi-Fi Ad Hoc 無線通信試験の様子 (大学構内)	41
5.6	Wi-Fi Ad Hoc 無線通信試験の様子 (建物内部)	42
5.7	Wi-Fi Ad Hoc 無線通信試験の様子 (雄物川河川敷)	42
5.8	尾去沢鉱山の所在地	43
5.9	通信試験場所の模式図	43
5.10	Wi-Fi Ad Hoc 無線通信試験の様子 (尾去沢鉱山)	44
5.11	RSSI と通信距離の実験結果 (屋内外)	45
5.12	通信速度と通信距離の実験結果 (屋内外)	45
5.13	RSSI と通信距離の実験結果 (尾去沢鉱山)	46

5.14	通信速度と通信距離の実験結果 (尾去沢鉦山)	46
5.15	RSSI と通信距離の相関グラフ (屋内外)	48
5.16	LR: RSSI(秋田大学構内)	49
5.17	LR: RSSI(建物内部)	49
5.18	LR: RSSI(雄物川河川敷)	50
5.19	通信速度と通信距離の相関グラフ (屋内外)	51
5.20	LR: 通信速度 (秋田大学構内)	52
5.21	LR: 通信速度 (建物内部)	52
5.22	LR: 通信速度 (雄物川河川敷)	53
5.23	RSSI と通信距離の相関グラフ (尾去沢鉦山)	54
5.24	LR: RSSI(直線)	55
5.25	LR: RSSI(曲がり角)	55
5.26	RSSI と距離との相関グラフ (尾去沢鉦山)	57
5.27	LR: 通信速度 (直線)	58
5.28	LR: 通信速度 (曲がり角)	58
6.1	南アフリカ共和国での実験場所	65
6.2	実験鉦山の模式図	65
6.3	実験鉦山での実験の様子 (直線経路)	66
6.4	実験鉦山での実験の様子 (矮小空間)	66
6.5	実験鉦山での実験の様子 (シャフト)	67
6.6	Great Nologwa 鉦山での実験の様子	68
6.7	RSSI と通信距離の実験結果 (尾去沢鉦山)	70
6.8	通信速度と通信距離の実験結果 (尾去沢鉦山)	70
6.9	RSSI と通信距離の実験結果 (実験鉦山)	71
6.10	通信速度と通信距離の実験結果 (実験鉦山)	71
6.11	RSSI と通信距離の実験結果 (Great Nologwa 鉦山)	72
6.12	通信速度と通信距離の実験結果 (Great Nologwa 鉦山)	72
6.13	尾去沢鉦山 Wi-Fi Direct RSSI 結果	74
6.14	LR: RSSI(直線)	75

6.15	LR: RSSI(曲がり角)	75
6.16	尾去沢鉱山 Wi-Fi Direct Throughput 結果	76
6.17	LR: 通信速度 (直線)	77
6.18	LR: 通信速度 (曲がり角)	77
6.19	尾去沢鉱山 Wi-Fi Direct RSSI 結果スマートフォン間	78
6.20	LR: RSSI(直線) スマートフォン間	79
6.21	LR: RSSI(曲がり角) スマートフォン間	79
6.22	尾去沢鉱山 Wi-Fi Direct 通信速度結果スマートフォン間	80
6.23	LR: 通信速度 (直線) スマートフォン間	81
6.24	LR: 通信速度 (曲がり角) スマートフォン間	81
6.25	実験鉱山での RSSI 測定結果	83
6.26	LR: RSSI(直線・実験鉱山)	84
6.27	実験鉱山での通信結果のヒートマップ (直線)	84
6.28	LR: RSSI(矮小空間・実験鉱山)	85
6.29	実験鉱山での通信結果のヒートマップ (矮小空間)	85
6.30	LR: RSSI(シャフト・実験鉱山)	86
6.31	実験鉱山での通信結果のヒートマップ (シャフト)	86
6.32	実験鉱山での通信速度測定結果	87
6.33	LR: 通信速度 (直線・実験鉱山)	88
6.34	LR: 通信速度 (矮小空間・実験鉱山)	88
6.35	LR: 通信速度 (シャフト・実験鉱山)	89
6.36	Great Nologwa 鉱山での通信結果 RSSI	90
6.37	LR: RSSI(直線・Great Nologwa 鉱山)	91
6.38	Great Nologwa 鉱山での通信結果通信速度	92
6.39	LR: 通信速度 (直線・Great Nologwa 鉱山)	92
7.1	Wi-Fi Direct と PLC 複合通信システムの全体的な流れ	97
7.2	Wi-Fi Direct と PLC 複合通信システムのデータ転送システムの設計	98
7.3	Wi-Fi Direct での通信の通信の様子	98
7.4	PLC での通信の通信の様子	99

7.5	Wi-Fi Direct の実験箇所	99
7.6	PLC の実験箇所	99
7.7	使用した機材	100
7.8	尾去沢鉱山での PLC 通信実験結果	103
7.9	尾去沢鉱山での PLC 通信実験結果 (箱ひげ図)	103
7.10	提案する複合通信システムの様子	107

表目次

2.1	鉱業の変遷	6
2.2	レーザースキャニングの製品の諸元	13
2.3	Wi-Fi と他の無線通信規格との比較	15
3.1	測定データの一覧	20
5.1	RSSI と通信距離の LR データ抜粋 (屋内外)	50
5.2	通信速度と通信距離の LR データ抜粋 (屋内外)	51
5.3	RSSI と通信距離の LR データ抜粋 (尾去沢鉱山)	56
5.4	通信速度と通信距離の LR データ抜粋 (尾去沢鉱山)	59
5.5	通信可能データ量	61
6.1	RSSI と通信距離の LR データ抜粋 (尾去沢・データログ)	74
6.2	通信速度と通信距離の LR データ抜粋 (尾去沢・データログ)	76
6.3	RSSI と通信距離の LR データ抜粋 (尾去沢・スマートフォン)	80
6.4	通信速度と通信距離の LR データ抜粋 (尾去沢・スマートフォン)	82
6.5	RSSI と通信距離の LR データ抜粋 (実験鉱山・データログ)	87
6.6	通信速度と通信距離の LR データ抜粋 (実験鉱山・データログ)	89
6.7	RSSI と通信距離の LR データ抜粋 (Great Nologwa 鉱山・データログ)	91
6.8	通信速度と通信距離の LR データ抜粋 (Great Nologwa 鉱山・データ ログ)	93
7.1	複合通信システムの内訳	98
7.2	提案する通信システムの設備投資コスト	107
A.1	LR パラメータ:RSSI(屋内外)	1
A.2	LR 統計値:RSSI(屋内外)	1
A.3	ANOVA:RSSI(屋内外)	2

A.4	LR パラメータ: 通信速度 (屋内外)	2
A.5	LR 統計値: 通信速度 (屋内外)	3
A.6	ANOVA: 通信速度 (屋内外)	3
A.7	LR パラメータ:RSSI(尾去沢鉱山)	4
A.8	LR 統計値:RSSI(尾去沢鉱山)	4
A.9	ANOVA:RSSI(尾去沢鉱山)	4
A.10	LR パラメータ: 通信速度 (尾去沢鉱山)	5
A.11	LR 統計値: 通信速度 (尾去沢鉱山)	5
A.12	ANOVA: 通信速度 (尾去沢鉱山)	5
A.13	LR パラメータ:Direct RSSI(尾去沢鉱山)	6
A.14	LR 統計値:Direct RSSI(尾去沢鉱山)	6
A.15	ANOVA:Direct RSSI(尾去沢鉱山)	7
A.16	LR パラメータ:Direct 通信速度 (尾去沢鉱山)	7
A.17	LR 統計値:Direct 通信速度 (尾去沢鉱山)	7
A.18	ANOVA:Direct 通信速度 (尾去沢鉱山)	8
A.19	LR パラメータ:Direct スマートフォン間 RSSI(尾去沢鉱山)	8
A.20	LR 統計値:Direct スマートフォン間 RSSI(尾去沢鉱山)	8
A.21	ANOVA:Direct スマートフォン間 RSSI(尾去沢鉱山)	9
A.22	LR パラメータ:Direct スマートフォン間 通信速度 (尾去沢鉱山)	9
A.23	LR 統計値:Direct スマートフォン間 通信速度 (尾去沢鉱山)	9
A.24	ANOVA:Direct スマートフォン間 通信速度 (尾去沢鉱山)	10
A.25	LR パラメータ:Direct RSSI(実験鉱山)	10
A.26	LR 統計値:Direct RSSI(実験鉱山)	11
A.27	ANOVA:Direct RSSI(実験鉱山)	11
A.28	LR パラメータ:Direct 通信速度 (実験鉱山)	12
A.29	LR 統計値:Direct 通信速度 (実験鉱山)	12
A.30	ANOVA:Direct 通信速度 (実験鉱山)	13
A.31	LR パラメータ:Direct RSSI(Great Nologwa 鉱山)	13
A.32	LR 統計値:Direct RSSI(Great Nologwa 鉱山)	14

A.33	ANOVA:Direct RSSI(Great Nologwa 鉦山)	14
A.34	LR パラメータ:Direct 通信速度 (Great Nologwa 鉦山)	14
A.35	LR 統計値:Direct 通信速度 (Great Nologwa 鉦山)	15
A.36	ANOVA:Direct 通信速度 (Great Nologwa 鉦山)	15

第 1 章 序論

1.1 本研究の目的

現代社会がより高度化するにあたり、金属資源の消費は不可欠である。日本はかつて世界有数の銀や銅の産出国であったが、資源の枯渇化や人材費および環境対策費の上昇等により採算が取れなくなり、閉山が相次いだ。そして、日本は金属資源が乏しいことからほぼ全量を海外からの輸入に依存している。安定供給を確保するためには、採鉱技術や資金の提供による産出国との関係強化が不可欠である。現在、金属資源を安全・効率的に採掘（開発）する技術が世界的に求められている [1, 2]。また、採掘対象の鉱床は年々、深部化と低品位化が進むことから技術革新による可採埋蔵量の増加が必要不可欠である。採鉱学は地質学、岩盤工学、土木工学、防災工学、機械工学の融合領域にある学問及び技術体系であり、独自の発展を遂げてきた。一方、我が国の強みである ICT(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。今後、ICTを採鉱学に適用した新たな資源開発技術群 (スマートマイニング) が資源開発を先導していくと期待されている。

世界のスマートマイニングの市場規模は、2019 年には 92 億 5670 万 USD、2027 年には 240 億 4760 万 USD と、13.0% の年平均成長率で成長すると予測されている。IoT・AI (人工知能)・機械学習 (ML) などの導入・活用により、作業の自動化や人件費・リスク削減、生産性の向上などが実現可能となっていて、それが市場成長の大きな要因となっている。スマートマイニングには、採掘の生産性を向上させ、運用時間とコストを削減するためのハードウェアとソフトウェアの統合が含まれる。鉱山会社は、最先端のソフトウェアやソリューションを提供することで、生産性の向上を重視している。これらのソフトウェアやソリューションは、機器、人員、作業と統合され、安全性の向上と採鉱作業からの高い材料抽出を実現する。これらの技術は、坑内掘鉱山および露天掘鉱山の両方の採掘作業に適用される。特に露天掘鉱山では、自律走行トラックをはじめとするスマートマイニングの普及は目覚ましい。しかしながら、立地環境を要因として坑内掘鉱山でのスマートマイニングの普及は露天掘鉱山ほど進んでいな

いのが現状である。

一般に坑内掘鉱山は地下深くに存在することから地下鉱業の企業は照明不良、狭いスペース、落石、通気不良、濡れ、通信の制約、構造の複雑さなどの危険性のもとで操業している。その中で、地下操業における安全性と生産性は企業にとって最大の関心事である。それらを解決するために坑内環境を把握するための様々なモニタリング手法が提案されている。坑内掘鉱山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することで坑内環境の把握が可能となる。

このため本研究では、鉱山操業における生産性と安全性向上のための坑内掘鉱山内モニタリングシステムの開発を行った。拡張性のある坑内掘鉱山に適した WSNs (Wireless Sensor Networks) の中でも鉱山従事者の動きによる疑似的な通信範囲拡大する Wi-Fi のアドホック通信 (Wi-Fi Ad Hoc 及び Wi-Fi Direct) と電力線通信に着目し、データログから鉱山従事者の持つスマートフォンへの通信試験を行い、アドホック無線通信システムの実装と検証を行った。また、センシング対象の一例として原位置岩盤応力のセンシングシステムを考え、位置推定と原位置応力を計測し、前述の通信システムでの実証と検証を行った。これらの通信システムとセンシングシステムを複合させたモニタリングシステムの構築を目的とした。本論文では、「実鉱山での通信性能の調査」、「原位置応力の計測センサユニットの開発」、「坑内掘鉱山内モニタリングシステムの実証試験」に関して行った一連の研究結果と得られた知見を述べる。

1.2 本論文の構成

本論文の構成は以下のものである。第 1 章では、序論として本研究の目的及び本論文の構成などを述べる。第 2 章では、研究対象としている坑内掘鉱山内の通信、センシング、モニタリングに関する既往の研究を整理したうえで、本研究の優位性と位置づけを明らかにする。第 3 章では、現状のスマートマイニング技術群の調査と坑内掘鉱山内情報化の課題と解決策を調査するとともに、提案する坑内掘鉱山内モニタリングシステムのシステムデザインを行い、本研究の概要を述べる。第 4 章では、原位置応力のセンシングシステムに関する基礎研究結果を述べる。第 5 章では、Wi-Fi Ad Hoc 通信を用いた通信システムを用いて、坑内掘鉱山環境における通信の確立に関する基礎研究結果を述べる。第 6 章では、Wi-Fi Direct 通信を用いた通信システムを用

いて、坑内掘鉱山環境における通信の確立に関する基礎研究結果を述べる。第 7 章では、電力線通信と Wi-Fi Direct 通信を用いた通信システムを用いて、坑内掘鉱山環境における通信の確立に関する基礎研究結果を述べる。第 8 章では、全体を通しての結論を述べる。

第 2 章 既往の研究

2.1 本研究における研究領域

第2章では、本論文の理解を助けるため、関連する既往の研究について説明する。まず、第1章で提示したスマートマイニングについて実例と研究段階の技術に関して説明し、そのあと本論文における主要な関連研究領域である坑内掘鉱山内におけるモニタリングシステムとセンシングシステム、そして通信システムに関して説明する。

2.2 スマートマイニング

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 [3]。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 (ソフトウェア、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。図2.1にスマートマイニングの概念図を示す。図2.1に示すようにスマートマイニングの3大要素はモニタリングと予測、そして自動化であり、相互に関わることで鉱山操業を改善する。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) および鉱山重機 (機械) を ICT で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

すまず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。スマートマイニングと同様に、Industry4.0 を鉱業分野に当てはめた技術群を Mining4.0[3, 4] や DigiMine[5] と呼ばれている。世界的に、スマートマイニング及び情報化は進みつつあるが、露天掘鉱山と比べて坑内掘鉱山では導入が進んでいない [6]。スマートマイニングによってもたらされる画期的な解決策の例として、IoT による膨大な有益データの取得を行い、人工知能を用いたデータ解析および意思決定を行うことが挙げられる。これにより鉱山操業の自動化や省人化が進み、マテリアルフローと鉱山重機の運用の最適化が進む。近年では、ドローンや 3D レーザー技術を使用した鉱山測量などの自動化だけでなく、鉱山従事者を対象とした VR トレーニングなどが導入されている。

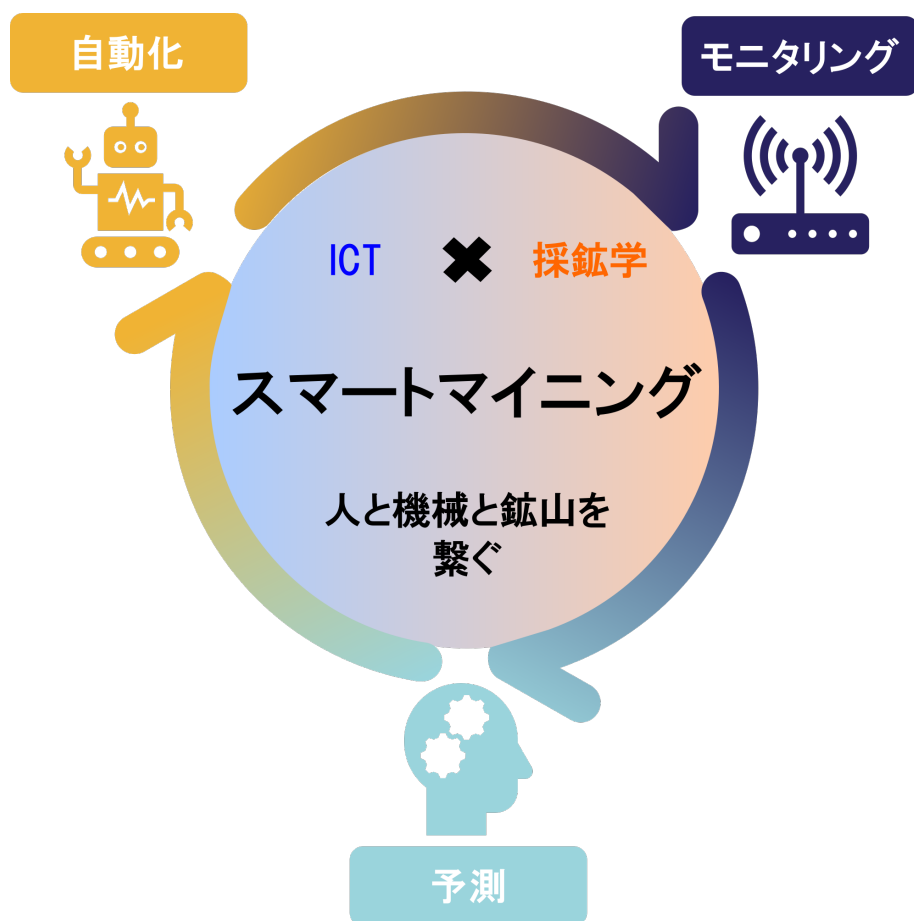


図2.1 スマートマイニングの概念図

例えば、機器の性能や鉱山従事者の安全性をリアルタイムで監視することもできる [7-11]。要素技術として IoT[5, 12-14]、ビッグデータ解析 [15]、機械間通信 (M2M)、

データ分析のための人工知能 [16, 17]、鉱山重機 (掘削機、掘削リグ、ダンプトラックなど) に搭載されたスマートセンサ [18–20]、観測用ドローン [21, 22] があげられる。最終的にスマートマイニングにより、掘削と発破、掘削と積み込み、輸送プロセス、測地学的測量、計画と運営管理から人間を完全に排除することになる。同時に、採掘作業のプロセス管理における最適な調整と柔軟性により、世界市場や国内市場における原材料の価格や需要がどのようなレベルであっても、収益性の高い採掘が保証されることになる。鉱業の変遷を表2.1に示す。図2.2、2.3に坑内掘鉱山内の情報化の現状を示す。

表2.1 鉱業の変遷

時代	産業の発展	技術革新	鉱業
18～19 世紀	Society2.0	<ul style="list-style-type: none"> ・ 石炭 ・ 蒸気機関 ・ 天然ガス 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 機械化の開始
19～20 世紀前半	Society3.0	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電気 ・ ライン生産 ・ 石油 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 機械化
20 世紀後半	Society4.0	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自動化 ・ アナログ計算機 ・ 制御システム 	<ul style="list-style-type: none"> ・ モニタリング
21 世紀前半	Society5.0	<ul style="list-style-type: none"> ・ デジタル化 ・ IoT ・ AI 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 無人化 ・ 遠隔制御 ・ デジタルツイン

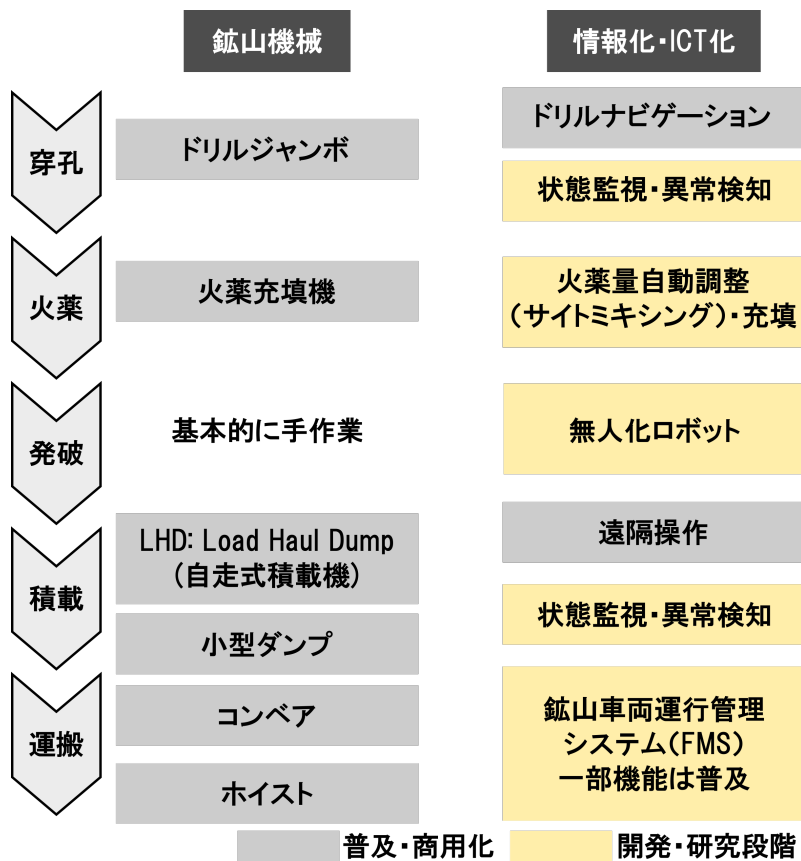


図2.2 坑内掘鉱山内の情報化現状



図2.3 坑内掘鉱山内の情報化

2.3 現状の坑内掘鉱山内モニタリングシステム

2.3.1 地下坑内の把握

通信システム、およびセンシングシステムは独立した技術体系である。これらの技術を有機的に融合して現場で求められるモニタリングシステムを作り上げていく事がこれからより求められる技術体系である。比較的インフラが整備しやすい工場や機械制御においては当然の技術となっている反面、通信技術が発展途上である地下坑内においてはその導入が大幅に遅れている。坑内掘鉱山内モニタリングの主な用途は監視、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、重機および通気システムの自動化が含まれる。また遠隔地で坑内掘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、坑内掘鉱山内部の状況を把握することに地下鉱業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坑内掘鉱山に適しているものがない。そのため、地下鉱業の企業によっては、通信環境を整えることを躊躇している場合も多い。以下に地下坑内を対象とした四つのモニタリングシステムを紹介する。どれも研究段階の技術ではあるが、実際の地下坑内にて実証試験を行っている。

2.3.2 環境モニタリング

埋め戻した空間の地盤沈下の予兆モニタリング

埋め戻しを使用する採掘は、特に建物、ダム、河川、鉄道などといった地表インフラ付近での採掘において地盤沈下を軽減するための効果的な選択肢の一つである。その性能を評価するうえで埋め戻しに使用したセメントや廃岩などの変形を継続的に長期間の監視を行うことは安全性を保障するうえで重要である。Zhao らは、河北省の Tangshan 炭鉱の地下700 mの深さにおいて埋め戻した周囲の変形を監視するためのリアルタイム監視システムを確立した [23]。監視項目は変位である。変位センサは屋根と床の間に垂直に配置された。また、床に固定された正方形の鉄板の上に応力センサを取り付け、イーサネットのデータケーブルは損傷防止のために鋼鉄管によって保護

されている。このモニタリングシステムにより埋め戻した周囲の地盤沈下の状態を検知するデータの伝送が可能である。

Real-Time Roof Monitoring System for Underground Coal Mines

CSIRO の Shen らは、地下炭鉱のためのリアルタイムルーフモニタリングおよびルーフ落下警報システムの開発をしている。センサによってルーフの応力・変位および崩壊の前兆をリアルタイムで光ファイバーケーブルを介して表面に転送される。ウラン鉱山での実験でこのモニタリングシステムが坑道の変化の挙動と安定性を監視するのに効果的であることが実証された。

円錐型ボアホール監視法

岩盤内の応力の測定と監視は、地盤力学を採掘する上で非常に重要な作業である。採掘深度が増加し、地質学的条件および採掘条件が悪化するにつれて、岩盤応力および長壁式石炭採掘による応力変化を決定および監視するための適切な方法が必要とされている。岩盤内の応力状態の詳細な知識は非常に有用である。Soucek らは円錐形ボアホール監視 (CCBM: Compact Conical Borehole Monitoring) 法を用いて岩盤応力評価をした [24]。計測機先端内部には 6 枚のひずみゲージが貼られており、縦方向と接線方向のひずみを測定できる。これにより炭鉱開発に伴う応力解放後の応力変化をモニタリングすることが可能となる。応力解放後のゼロを基準してその後の差分応力が得られている。しかしながら、そのデータは無線通信などによりリアルタイムで伝送されるシステムではない。

RFID ひずみ計測システム

Radio Frequency Identification (RFID) ひずみ計測は無線電波の一つ RFID を構造物や岩盤の点検に利用する計測方法である。通信部 (RFID タグ) とセンサ部 (ひずみゲージ) を対象に設置し、対象表面から RFID タグに与えた電磁波でセンサが起動することで、ひずみの計測が行える技術である。RFID の通信には専用のリーダライタとパソコンが必要となる。これにより、非接触で容易にひずみの計測が可能とされて

いる。適用例として坑道の覆工コンクリート応力やダム構造物内の鉄筋応力の計測に利用されている。太平洋セメント(株)はこの技術を利用して鉄筋コンクリート内の鉄筋に生じるひずみを測定している。

2.4 現状の坑内掘鉱山内センシングシステム

2.4.1 坑内掘鉱山内のセンシング

坑内掘鉱山において地上の工場に進むようなスマート化が重要関心事である。鉱山内のセンサ項目として数多くの観測対象があり、大きく分けて生産性と安全性の2つに関係するデータがある。本研究では、安全性を向上させることのできるデータの一例として岩盤状態の計測に焦点を当てた。

2.4.2 岩盤状態の計測

接触型計測

接触型計測とはセンサを直接非測定物に取り付けて測定する方法であり、一般的に手軽であることから多く用いられる。接触法の中にロックボルトの軸力測定、吹付けコンクリート応力測定、地中の変位測定、伸び計、電気抵抗ひずみ計測、AE法および磁気張力センサなどがある。AE法だけは直接的な応力・ひずみ計測ではなく岩盤破壊挙動のイベントを計測することにより間接的に岩盤の状態を推察する手法である。

ロックボルトの軸力測定

支保に使用するロックボルトに発生している軸力の大きさとその分布状況を局所ひずみ、あるいは平均ひずみより把握する。これにより、ロックボルトの支保効果を把握し、ロックボルトの長さや耐力の妥当性を判断することを目的としている。

三井住友建設(株)は、神戸大学の芥川ら[25]の提唱する On-site data Visualization (OSV) の概念による光る変位計である Light Emitting Displacement Sensor (LEDS) の機構を基に新しいロックボルト変位計 (GENESIS-RBM) を開発した。実際の地山において局所的な不連続面挙動を評価できるかどうかを検証するために亀裂挙動も非実験を実施し、実用に耐える制度で計測が可能と実証された。

吹付けコンクリート応力測定

吹付けコンクリート施工時に応力計や土圧計などの計器を埋没させ測定する方法である。吹付けコンクリートに生じる応力と背面土圧の大きさ及びその分布状況を把握することで、坑道などの安全性を判断することを目的としている。

吹付けコンクリート施工時に埋没させる応力計の一例として東横エルメス (株) のコンクリート有効応力計 GK-N-202 がある。これにより周辺地山の挙動に伴うコンクリート部に生じる内部応力状態を把握する。

地中の変位測定

地表からドリリングを行い、変位計を埋没させて測定を行う方法である。これにより坑道の掘削による周囲の岩盤の変位に応じて地表面に生じる沈下の大きさや範囲を把握することで周囲の岩盤及び坑道の安全性を評価することを目的としている。

新川電機 (株) は、3 軸重力加速度センサ (MEMS) を用いた 3D 地中変位計 (Shape Accel Array) を開発し変位 (変状)・温度を測定することが可能である。この 3D 地中変位計は地すべり、護岸、橋梁、トンネル、鉄道、液状化対策などといった様々な用途で利用されている。また、建設現場では、リアルタイムモニタリング、常時立ち入りが難しい場所には遠隔監視システムによる遠隔モニタリングが可能とされている。また、実際の設置の一例として鉛直に設置する場合掘削したボーリング孔内に、ガイド管を入れ、その中に変位計を入れセメントなどで充填する。データの回収は PC あるいはデータログに接続することで行う。

伸び計

ひずみは、二つの評点における間隔の変化より求められる。この二点間の変位を精度良く測定するために様々な種類の変位計がありそのひとつとして伸び計が使用されている。

電気抵抗ひずみ計測

電気抵抗ひずみ計測とは、金属抵抗線または箔、半導体など、電気抵抗が作用するひずみによって変化する現象を利用した計測方法である。被測定物にひずみゲージを貼付し、物体のひずみと同じひずみがゲージに生じることで、これを抵抗変化として検出する。この手法は、手軽かつ安価であることから最も一般的に使用されている。大きなひずみの測定には適さないが、構造物や岩盤に多くのひずみゲージをつけることから同時に多数の地点をモニタリングすることが可能である。

AE法

Acoustic Emission (AE) 法とは、岩石などの材料が圧縮や曲げなどにより変形や亀裂が発生するような力を受けたときに材料が内部に蓄えていたひずみエネルギーを弾性波として放出する現象と言われている。AE法は、この弾性波を材料の表面上に設置したAEセンサで検知し、信号処理を行うことにより材料の破壊仮定を評価する手法のことである。AEセンサと加速度センサの大きな違いは、圧電素子の材質や測定周波数帯である。AEセンサの圧電素子は高周波数帯域の信号取得に有効な感度を備えているのが特徴といえる。つまりAEセンサで取得した波形は特定の物理量を持たない振幅であるが、センサの共振周波数を積極的に活用することで微小なクラック減少を捉えることが可能となる。AE法により得られる結果はある閾値を超えたイベントの回数が主である。このAE法により建造物や斜面の崩落予期をする。またロックバースト予測を目的としたモニタリングが可能となる。センサに使用される材料は圧電セラミックスであり、信号取得の基本は圧電効果となっている。

磁気張力センサ

坑道支保のために使用されているケーブルボルトの張力を計測することで安全性を評価することを目的としている。住友電工(株)は磁気張力センサ(SmART Cell)を用いて坑道天盤の変位によるケーブルボルトの張力変化のモニタリングを釧路コールマインで実証実験している。これにより岩盤崩落や山跳ねの予知、事前補強に役立つと期待されている。

非接触型計測

非接触型計測とは、空間にある基準を設けてその地点から非測定物の変位量を計測する方法であり、代表例として、レーザースキャニングやカメラシステムによる 3D フォトメトグラフィーが挙げられる。

レーザースキャニング

レーザースキャニングは、対象範囲にレーザー光を照射し、対象物からの反射光をとらえ、その飛行時間 (TOF: Time Of Flight) の原理を用いて距離を計測するものと照射波と反射波の位相差で距離を計算する位相差方式 (PD: Phase Detection) の 2 種類のタイプが主流である。通常、地形計測などの広範囲の測定を必要とする屋外では、TOF 方式のスキャナーを用いられることが多い。表2.2にレーザースキャニングの製品の諸元を示す。高精度な計測法である反面、レーザーのキャリブレーションにノウハウが必要であることや、機材が大型化することが欠点として挙げられる。

表2.2 レーザースキャニングの製品の諸元

	ScanStationC10	HDS7000	Focous3D
方式	TOF	PD	PD
波長	532 nm	1.5 μ m	905 nm
クラス	3	1	3
最大距離	300 m	187 m	153.49 m
スキャン速度	50,000 Pt/s	1,016,727 Pt/s	976,000 Pt/s
重さ	13 kg	9.8 kg	5 kg

カメラシステム (3D フォトメトグラフィー)

オーストラリアの CSIRO は、Sirovision と名付けたカメラシステムを開発している。坑内用及び露天採掘用のステレオ写真による坑内坑道や露天掘ピットの岩壁面の精密な 3D 画像を作成する地質学・地質工学マッピング／解析システムが開発されており、岩石の性状が自動で判別され、断層や亀裂も自動で検出される。また、坑内に

特化したものとして Adam Technology がステレオカメラシステムを開発し、実際の坑内で情報収集に用いられている。

このように非接触計測は簡便に有用な情報を可視化できる技術として期待されているが、微小な岩盤ひずみを計測するには不向きである。また、応力を直接計測することはできない。しかしながら、画像の強みとして近年急速に技術革新がなされる機械学習 (AI) や画像情報処理技術との親和性が非常に高いことから、より一層の進化が期待できる。

2.5 現状の坑内掘鉱山内通信システム

2.5.1 有線通信

ダイヤル式やページング式の電話は、磁気式に比べて発達した有線通信システムである。最近では、光ファイバーケーブルを使用することで、データの信頼性を確保し、データの質、量、速度を向上させている。無線通信と比べ、通信の安定性や回線容量が比較的大きいといったメリットがある。また、敷設工事が必要であることから初期投資とメンテナンスコストが高くなることや断線による通信の断絶が想定されるデメリットがある。これらの特徴から拡張性のある坑内掘鉱山内で使用するにあたって有線通信から徐々に無線通信を利用するようになっている。

2.5.2 無線通信

地下採掘作業における WSN

WSN は、過去 50 年以上にわたり、様々な産業分野での問題解決や消費者へのコミュニケーションの提供に貢献してきたことから、コンピュータサイエンスの分野で最も重要な技術の 1 つである [26, 27]。特に、この技術は、土壌モニタリング [26, 27]、環境モニタリング [28, 29] などの研究に使用されている。これらの研究では、安価でありながら十分な精度を備えた大量のセンサノードを用いたシステムの実現が示されている。これらのノードは、特定の環境品質を測定し、測定データを他のノードに無線で送信することができる。Akyildiz らは、環境中の周囲の品質を感知する WSN の優れた能力に加えて、対応するシステムは低消費電力で高いコスト効率を実現してい

ると述べている [26, 27, 30]。さらに、システムは設定が簡単で、確実にデータを送信することができる。

WSN の主な特徴は、無線通信機能である。この特徴により、過酷な地下環境における物理的な通信回線の設置に特有の困難さを回避することができ、WSN は鉱山作業に非常に有用なシステムとなってる [31]。例えば、Buratti ら [32] は、WSN が過去 20 年間のガス検知や鉱山崩壊予測の開発に貢献したことを検証している。また、WSN は、専門的な知識がなくても、複数のノードを無線接続で自動的に設定し、自律的なネットワークとして構成することができる。すべてのノードは、近くのノードへのルーターとして、また自分のデータの送信者として機能する。これにより、地下の環境ではケーブルの損傷により故障する可能性が高い有線ネットワークに比べて、より堅牢な監視・通信システムをサポートするネットワークになる。さらに、WSN は柔軟なネットワーク構成を管理することができ、データ送信に失敗した場合には、代替の通信ルートを決めることで障害に対処することができる。また、このようなシステムでは、採掘作業を中断することなく、ネットワーク障害の診断、修理、管理を行うことができる。1 つの WSN に含まれるセンサノードの数は、数百から数千に及ぶ。表 2.3 に、WSN を代表とする Wi-Fi と他の無線通信規格との比較をまとめた。Wi-Fi は Bluetooth と ZigBee と比べ、通信速度が速く、通信距離も自由空間で 100 m 程度である。ZigBee は通信距離と接続端末数が長所であるが、通信速度が他と比べ著しく遅いことからテキストデータなどの少量のデータを送ることが限界である。

表 2.3 Wi-Fi と他の無線通信規格との比較

名前	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
通信距離 (m)	100	10	50-500
通信速度 (MB/s)	11	1	0.25
接続端末数	32	7	65,536
電池寿命	数時間	数日	数か月から数年

Karaki は、このノード規模であれば、WSN が坑内掘鉱山のすべての監視と通信範囲を供給できることを検証した [33]。このようなネットワークでは、システムは、坑内

掘鉱山の特定の場所で特定のイベントが発生するたびにそれを検出し、その後、ネットワークノードを通じて対応するデータを送信することができる。この機能は、地下作業に WSN を使用するもう一つの有益な理由である。坑内掘鉱山における WSN の 3 つの主な用途は、監視、通信、位置情報である。モニタリングは、環境モニタリングとオペレーションモニタリングに分けられる。環境モニタリングには、粉塵や煙の検出、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などがある。一方、オペレーションモニタリングには、鉱山重機の脱線の検知、重機の自動化、通気システムなどがある。

ZigBee

ZigBee は、IEEE 802.15.4 規格をベースにした計測制御と通信のための WSN 規格である。これまでの研究で ZigBee 技術が採用された背景には、いくつかの特徴がある。まず、1 つのネットワークに多数の端末を接続することができるため、複雑な地下環境でも柔軟なネットワークを構築することができる。また、マルチホップ機能を使えば、端末同士や地上へのデータ転送も可能である。例えば、川村 [34] やモリディ [35] は、このような特徴を持つ ZigBee 通信システムを坑内掘鉱山で調査した。この研究の目的は、信頼性が高く、効果的な通信システムを提案することである。実際、ZigBee ネットワークは、地理情報システムのサポート、地下事故の防止、地上オペレーター、緊急通信、鉱山内の作業員間の統合システムの構築に使用することができる。坑内掘鉱山における通信システムは、安全性と効率性を向上させ、プロセスを最適化するのに役立つことを検証した [35]。さらに、Leakey Feeder システムや ZigBee の特性など、坑内掘鉱山の通信ネットワークの現在の技術や今後の動向についても考察した。Chehri ら [36] は、ZigBee ネットワークが温度の監視、火災の検出、湿度やガス濃度の測定などに利用できることを検証している。また、Chen ら [37] は、CC2430 ZigBee モジュールを使用して、ZigBee を鉱山内の作業員や機器の監視に使用できることを実証した。これらの作品は、坑内掘鉱山の監視に ZigBee ネットワークが適していることを裏付けている [38]。ZigBee は遅く、画像などのデータを送るのに時間がかかりすぎる。

Leakey Feeder

Leakey Feeder 通信システムは、拡張アンテナとして機能して、電波を放射および受信するケーブルからなる [39]。このケーブルは、その全長に沿って無線信号がケーブルの内外に漏洩することを可能にするために、その外側導体にギャップまたはスロットを有するという意味合いの「Leakey」である。このような信号の漏洩のため、信号を許容レベルに戻すために、ラインアンプは通常 350-500 mごとに定期的に挿入する必要がある。坑内掘鉱山内では Leakey Feeder は鉱山従事者間の無線通信や緊急連絡に使用される。他にも、鉱山従事者の位置確認や地上からの連絡にも活用されている。そして、データの転送にも優れていることから採掘現場の生産状況のデータ配信を可能とする。

Walkie-talkie

Walkie-talkie は携帯型の双方向無線トランシーバである。主な特徴として、半二重（一度に受信あるいは送信のどちらかのみ）のチャンネルと、送信を開始するプッシュトークスイッチがある。通常、トランシーバーは VHF および UHF 域で動作する。炭鉱では、それらは一般的に Leakey Feeder ケーブルとラインアンプのサポートと共に使用される。Walkie-talkie の長所としてワイヤレス携帯通信であること広範囲で通信が行えること、さらにはロングウォール採掘法でも使用可能ということが挙げられる。しかしながら、短所として坑道の形状に大きく影響を受けることと敷設に費用がかさむことが挙げられる。

Wi-Fi Ad Hoc

Wi-Fi Ad Hoc は、WSNs の利点に加え、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一対一 (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) を情報伝達的手段として使用することができる (DTN: Delay Tolerant Network)。Wi-Fi インフラストラクチャには、ホストできる端末の数に制限がある。さらに、このシステムを実装するためには、ルーターや補助配線などの追加機器が必要であり、初期コストと維持費が増加する。

それに対し、Wi-Fi Ad Hoc は P2P で通信をするため、バケツリレーのように無数の端末へとデータの転送が可能である。Wi-Fi Ad Hoc が機器と機器のセットアップだけで十分であるため、コストを最小限に抑えることができる。またスマートフォンは Wi-Fi Ad Hoc に対応しているため、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しやすいことも Wi-Fi Ad Hoc の利点である。

Wi-Fi Direct

Wi-Fi を利用したアドホック通信には、前述の Wi-Fi Ad Hoc の他に Wi-Fi Direct がある。Wi-Fi Direct は Wi-Fi Ad Hoc と同様に Wi-Fi インフラストラクチャとは異なりルーターや補助配線などを必要とせず機器同士が直接つながり通信を実現させる。Wi-Fi Direct は Wi-Fi Ad Hoc の長所を引き継いだ上に、問題とされていた設定の煩雑さおよびセキュリティ面などを改良した通信規格とされている。また、一番の特徴としては、Wi-Fi Direct につながるスマートフォンがアクセスポイントとして活用できることにある。これにより、通常の Wi-Fi に対応する通信端末も接続が可能となる。

次世代移動通信 5G

現在の移動通信は LTE に代表される 4G が主流となっている。移動通信各社は急速な社会の IoT 化に対処すべく次世代移動通信である 5G を開発している。オーストラリアの移動通信会社である Telstra もこの 5G を開発中であり、そのアプリケーションとして地下坑内無線通信への導入を検討している。非常に高価な導入コストが予想されるが、来たるべき坑内掘鉱山の自動化に寄与するものとみられている。

第3章 坑内掘鉱山内モニタリングシステムデザイン

3.1 提案するモニタリングシステム

第3章では、第2章で行われた既往の研究と本研究との住み分けを明確にすることを目的とした。まず、坑内掘鉱山内情報化に対する現状と課題を明らかにするとともにその解決策である本研究の提案するモニタリングシステムデザインを述べる。そして、そのモニタリングシステムで転送する測定要素とデータ量の検討をすることで第5-7章で調査する通信性能を判断するために役立てた。

3.2 坑内掘鉱山内の測定要素とデータ量の検討

坑内掘鉱山で測定する要素、測定回数、そして1日の総データ量を試算した。まず、測定要素を坑内環境データと岩盤情報データに大別した。それぞれの細目を以下に示す。温度と湿度と煙、粉塵、火災検知とガス濃度(メタン、酸素、二酸化炭素、一酸化炭素)に分かれる。A(一日のデータ量)を以下の式(3.1)のように定義した。

$$A(\text{Byte}) = (ch) \times (sr) \times (sf) \times (T) \times 1/8, \quad (3.1)$$

ここで、 ch はセンサのチャンネル数、 sr は測定部分の分解能 (bit)、 sf はサンプリング周波数 (Hz) である。 T は一日の秒数 (s) であり、86,400sである。一日の総データ量は計測するセンサのチャンネル数、測定器の分解能 (主に縦軸) およびデータの測定間隔 (主に横軸) を掛け合わせることで求めるとした。式 (3.1) の計算式を用いて測定要素毎に総データ量を試算したものを表3.1にまとめた。サンプリング周波数は0.05 Hzとした。表3.1より、測定データは温度や湿度、煙の検知やガス濃度が挙げられ1日の総データ量は1地点で4.3–7.6KB程である。

表3.1 測定データの一覧

測定要素	分解能 (bit)	単位	データ量 (KB)
気温	10	°C	5.4
湿度	10	%	5.4
煙検知	10	mg/m ³	5.4
メタンガス	8	ppm	4.3
酸素	10	ppm	4.3
一酸化炭素	9	ppm	4.9
二酸化炭素	14	ppm	7.6

温度

坑内掘鉱山に必要な温度測定の範囲を 0–80°Cとし、測定可能な最小の値を0.1°Cとした場合、分解能は10 bitとなる。サンプリング周波数は0.05 Hzとした。

湿度

湿度測定の範囲を 0–100 %とし、測定可能な最小の値を0.1 %とした場合、分解能は10 bitとなる。サンプリング周波数は0.05 Hzとした。

煙、粉塵、火災検知

作業環境の有害物質から鉱山従事者を、吸引及び粉塵爆発から保護する目的で測定対象とした。分解能は10 bitとした。サンプリング周波数は0.05 Hzとした。

ガス濃度

坑内掘鉱山のガス計測の要素を、メタン、酸素、二酸化炭素、一酸化炭素、の4つとした。

メタン

可燃性ガスであり、爆発の危険性があるため測定対象とする。メタンのガス濃度における爆発範囲は5.0–15.0%である。この場合測定可能な最小値は0.1%でも問題ない。そのため測定範囲を0–20%とし、分解能を8 bitとした。サンプリング周波数は0.05 Hzとした。

酸素

主に酸欠防止のために測定する。坑内掘鉱山内の正常な酸素濃度を通常の大気中と同じ21%に設定するため、測定範囲を0–25%に設定した。この場合、測定可能な最小値は0.1%程度でも問題ない。分解能は8 bitとした。サンプリング周波数は0.05 Hzとした。

一酸化炭素

300 ppm以下では軽度の頭痛の症状が現れ、400 ppm以上で数時間曝露されると循環・呼吸系に影響が出始める。そのため測定対象とした。測定範囲は深刻な影響を与え始める0–400 ppmとした。測定可能な最小値は1 ppmとし、分解能は9 bitとした。サンプリング周波数は0.05 Hzとした。

二酸化炭素

空間における濃度が高くなると頭痛やめまいなど毒性があるため測定対象とした。空間における二酸化炭素の濃度は0.1%、つまり1,000ppmを超えると眠気が出てきて作業効率が悪くなる。そのため測定範囲を0–1%と設定した。分解能は14 bitとした。サンプリング周波数は0.05 Hzとした。

以上の測定項目の1日の総データ量の試算をまとめると、1地点における坑内環境データの1日の総データ量は約37.3KBとなった。さらに、データログの通信範囲内の50地点で測定とした場合、ひとつのデータログには約1.9MBのデータが蓄積されることとなる。その後はすれ違いにより、複数のデータログから重複しないように回収が可能とする。この結果と第5章の通信試験の結果から、提案したモニタリングシス

テムを実際に稼働している鉱山に適用した場合、適用可能であるかを判断していく。

3.3 システムデザイン

本研究で提案する坑内掘鉱山の岩盤応力モニタリングシステムは原位置応力・ひずみの差分測定であるセンシング部分とアドホック通信 (Wi-Fi Direct) を利用したデータ転送部分の二つに分けられる。図3.1に岩盤応力モニタリングシステムデザインを示す。図3.1で示すように本研究で提案するモニタリングシステムはアドホック通信機能の付いたセンサユニットを坑道の上部に穴を開け埋めることとした。実験にはアドホック通信機能の付いたセンサユニットとスマートフォンを使用した。センサユニットはアドホック通信機能の付いたデータログに有線接続した。そして、センサユニットにはひずみゲージを3面の内側にそれぞれ貼り、9軸センサ (LSM9DS1) を内部に固定している。点在したセンサユニットは応力解放後のブランクホールに埋めることで岩盤から加わる応力の差分をひずみゲージの値から求めることとした。このとき、どの向きからどれだけの応力が加わるかを推定するためにセンサユニットの姿勢検知も必要であると考え。センサユニットを複数地下空間に埋めることで坑内掘鉱山全体の応力状況を継続的に確認できると考えた。

図3.1に示すようにまず初めにセンサユニットから鉱山従事者は計測データを取得する。次に、通信範囲内に入った他の鉱山従事者あるいは、ほかのセンサユニットから計測データを受け渡すことが可能である。最後にいずれかの鉱山従事者が坑内掘鉱山から外に出ることで、地上のインフラの整った事務所などへと計測データを伝達し終える。地上の事務所へ送られたデータはクラウドなどを介することで世界中のどこでも確認、編集が可能となる。

坑内掘鉱山では、鉱山の生産性と安全性を向上させるために、鉱山操業や情報に基づいた重要な意思決定に役立つさまざまなデータがある。一般に、移動中に双方向の通信が必要な場面では、無線通信システムが望ましい。しかしながら、地下の鉱山では、障害物、湿気、岩壁などにより、無線通信にとって厳しい環境となる [40]。地下の環境は、無線通信技術が普及している地上の環境、例えば建物の中や屋外の自由空間の環境とは異なる特性を持っている [41, 42]。例えば、坑内掘鉱山では、立坑などの限られた空間に、危険なガスや物質、腐食性の水、粉塵などが集中している可能性が高

い [43–46]。また、坑道は必ずしも直線ではなく、ほとんどの場合、分岐や曲がり角が多く存在する。このような通信にとって過酷な地下環境では、電波の挙動が地上環境とは大きく異なるため、電波の減衰を調べる必要がある。このような伝搬の課題に対処することに加えて、無線通信は3つの目標を満たす必要がある。I) 緊急時に鉱山従事者を保護・救助しながら動作すること、II) 作業中に鉱山従事者と連絡を取り合ったり追跡したりするために作業エリア全体をカバーすること、III) 鉱山内のモニタリングや警告を支援することの3つの目標である。モニタリングは、環境モニタリングと操業モニタリングに分けられる。環境モニタリングには、粉塵や煙の検出、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などがある [47]。

一方、運用監視には、重機の脱線の検知、重機や通気システムの自動化などがある [48–51]。また、坑内掘鉱山の状態を遠隔地から監視できるようになれば、生産性や安全性が向上する。それゆえ、鉱山管理者が遠隔地で鉱山活動を準リアルタイムで追跡することを支援できる技術への投資が盛んに行われている [52]。しかしながら、効率的な地下通信技術のコストが高いため、データ通信の観点から坑内掘鉱山の急速なデジタル化は敬遠されている。

筆者らはこれまで、ZigBee や Wi-Fi Ad Hoc を用いた通信システムを研究してきた [52–55]。その結果、他の WSN に比べて坑内掘鉱山に適していることがわかり、ZigBee を用いたシステムは、温度、湿度、ガス濃度などの環境データのセンシングや、換気扇の電源操作、緊急時のメッセージ送信などに対応できるように設計された [56]。センサノードの配置を検討し、スループットやパケット配信率 (PDR) などをもとに比較した [55]。アプリケーションとして、西オーストラリアの坑内掘鉱山全体の環境データ読み取り、換気扇制御、テキストメッセージの送受信を実演した。これにより、提案された ZigBee ベースの通信システムが正常に動作することが実証された [54]。同様の研究は、Wi-Fi Ad Hoc を用いた通信システムについても行われた [52, 53]。Wi-Fi Ad Hoc を用いた通信システムの大きな特徴は、中継用のスマートフォンを鉱山従事者や採掘用の重機が持ち運べることである。これにより、通常の通信範囲から離れた場所にもセンシングデータを送ることが可能になる。

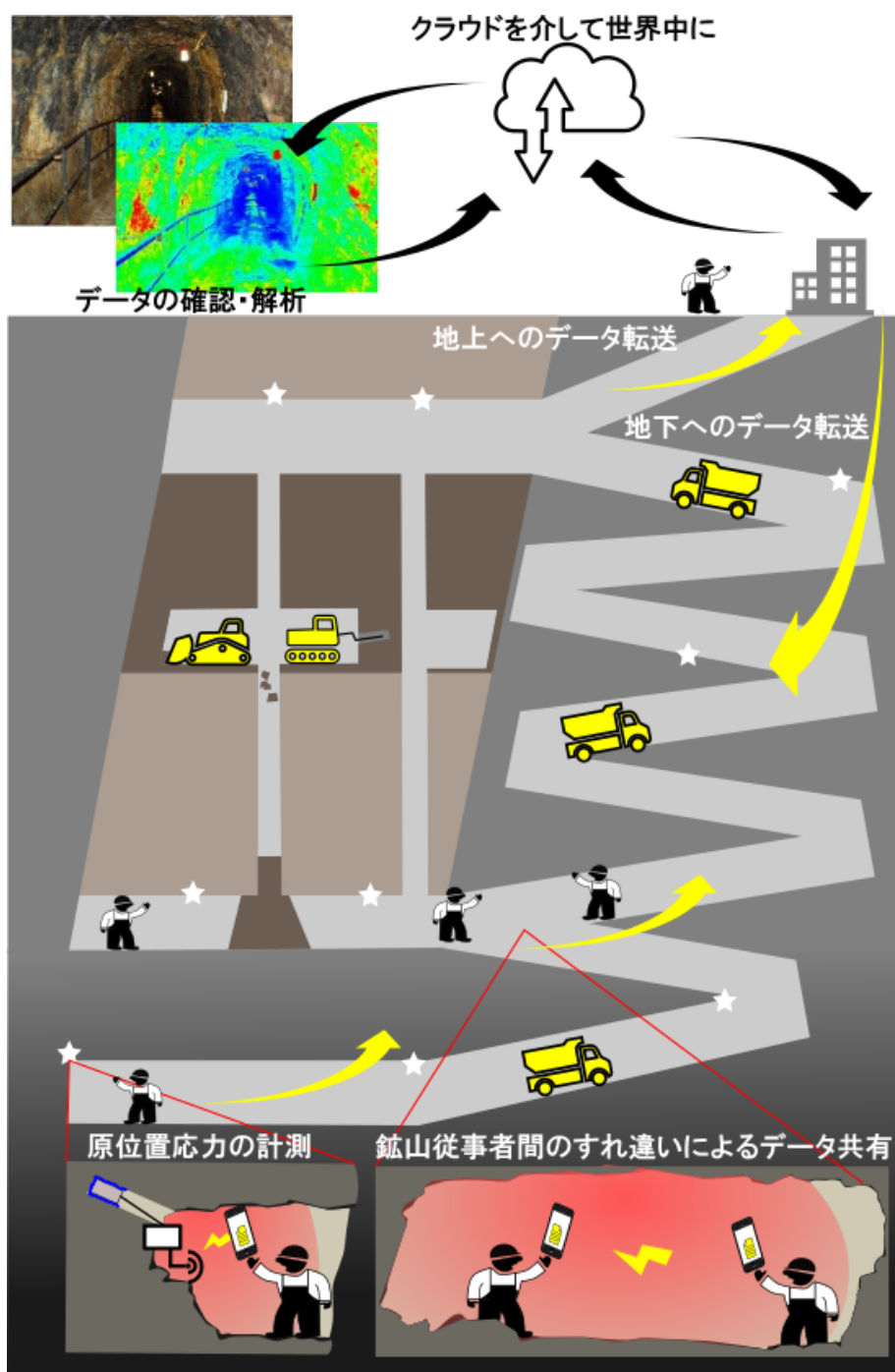


図3.1 坑内掘鉱山内原位置応力モニタリングシステムデザイン

3.4 まとめ

第3章では坑内掘鉱山におけるスマートマイニング技術群の中でもモニタリングシステムを取り上げ、本研究の提案するシステムのデザインをした。このシステムのセンシング対象と通信システムを考えるうえで必要な地下坑内に存在する有用データの種類とそのデータ量をまとめ、通信システムの評価を行うために役立てた。

第4章 原位置応力センシングシステムの基礎研究

4.1 原位置応力計測

地下深くでは地山自体の荷重で構造運動などの影響に伴う岩盤応力が働いている。地下空洞を掘削する場合にその地点における岩盤応力(原位置応力)や岩盤の変位(ひずみ)を知ることは坑内掘鉱山内の設計・施工を効率よく安全に行う上で非常に重要といえる。近年では、有限要素法(FEM)等コンピュータによる数値計算が大きく進歩しているが、たとえFEMによりかなり厳密な数値計算をしたとしても、支持条件や荷重条件など見積りにくい要素も多く、実際の模型や製品について評価できることが原位置応力・ひずみ測定の大きな強みといえる。また、最近では坑内掘鉱山採掘でより深部へと移行しつつあることから安全性に対する要求が高まり、原位置での応力・ひずみ測定の必要性が高まっている。掘削の可否を見極める際に事前の原位置応力・ひずみ測定で評価は可能だが、掘削後の安定性・安全性の評価のためには事前の一時的な原位置応力・ひずみ測定だけでなく、掘削後の坑道周辺の原位置応力・ひずみの変化を長期的にモニタリングすることが必要となっていく。

4.2 センサユニット諸元

原位置応力・ひずみの差分モニタリングシステムの開発のために、上述の通信部の他に計測部(センシング)を開発する必要がある。本研究では坑内掘鉱山開発に伴う岩盤応力の変化に着目しているため、支保用のドリルビット(60φ)で穿孔したドリルホールにインストールが可能なセンサユニットを開発した。図4.1にそのインストール手順を示す。

設計・作製の都合上、センサユニットはステンレス板で囲まれた直方体とした。図4.2にそのComputer Aided Design(CAD)図面を示す。XYZ面の貼り付けられたひずみゲージペアに加え、インストール時のセンサユニットの姿勢検知を目的とした加速度、角速度計(ジャイロ)および地磁気のそれぞれ3方向のデータを取得できる9軸センサ(LSM9DS1)を中心に内蔵した。得られたデータは有線にてデータログ兼通

信モジュールに伝送され、最終的に地上へと伝送可能となる。

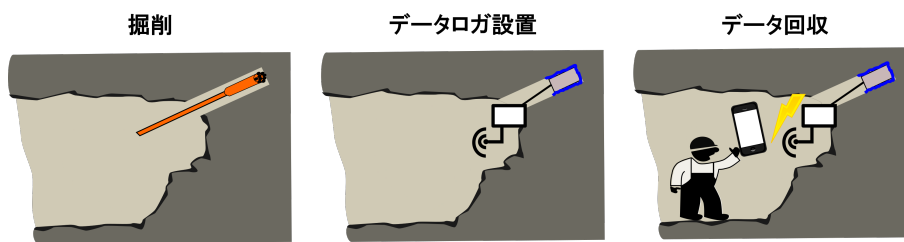


図4.1 データログのインストールのイメージ

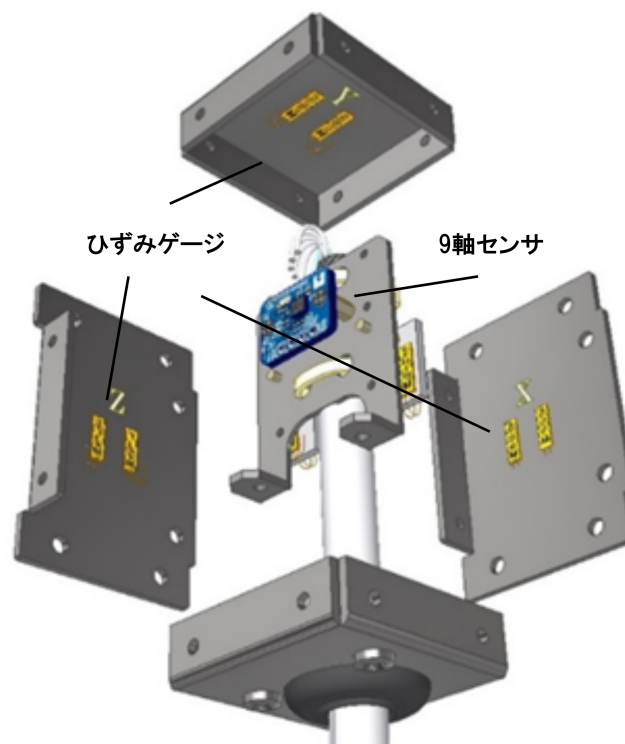


図4.2 センサユニットのCAD図

4.3 センサユニットの姿勢検知

9軸センサ (LSM9DS1) により加速度、角速度計 (ジャイロ)、地磁気をそれぞれ3方向のデータの取得をすることで地中に埋めたセンサユニットの傾きを計算により求めることを目的とする。また、各センサには長所と短所が有り、それぞれの短所をそれぞれの長所で相互に補う事で三次元姿勢推定精度を向上させる。本研究ではセンサユニットの姿勢検知に MATLAB の Sensor Fusion and Tracking Toolbox を用いて

実際に図示させることとした。図4.3に実際の姿勢検知の描画結果を示す。非常に精度よくセンサユニットの姿勢が検知できることを確認した。ひずみゲージによる応力の計測結果は面に対するものであるため、この姿勢検知結果と合わせることで岩盤内部の応力の大きさと方向が明らかになる。

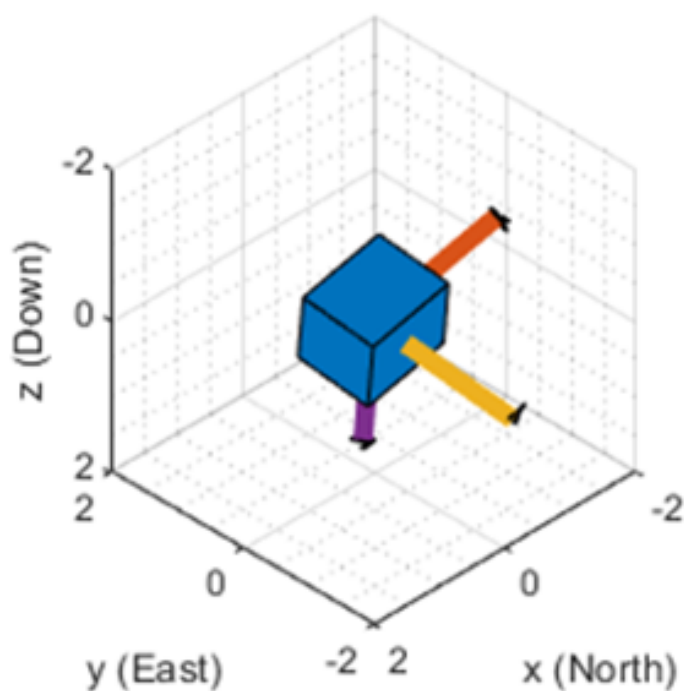


図4.3 センサユニットの姿勢検知

4.4 センサユニットにかかる応力の検知

前述のようにひずみゲージを3面(XYZ面)に貼り付けている。センサユニットにかかる応力(原位置応力)を材料試験で求めた荷重と変位量及びひずみゲージの値からひずみと応力の関係を求める。さらに、坑内掘鉱山内でセンサユニットに加わるひずみから原位置での差分応力を求めることとした。今回の試験では基礎実験として室内実験を行った。株式会社マルイの手動式一軸圧縮試験機(ロードセルの定格容量は20tf)を用いてセンサユニットに荷重をかける荷重応答試験を行った。図4.4に荷重応答試験の様子を示す。荷重を50kgf刻みに変化させ、荷重・変位曲線(弾性変形の間)の作成とその時のひずみ、加速度、角速度、地磁気をセンサユニットの計測データとして取得し

た。図4.5に荷重変位曲線を示す。また、図4.6にひずみゲージ出力値を示す。図4.5より、9軸センサからの出力のほかに3軸のひずみゲージの値が荷重とともに変わっている様子が分かる。これらの情報よりひずみゲージの値から坑内掘鉱山内の原位置応力を測ることが可能といえる。坑内掘鉱山の原位置応力・変位の差異のセンシングを行うにあたってセンサユニットの姿勢検知と応力検知が必要である。これによりどの向きからどの程度の応力が加わっているのかが把握できる。サンプリング周波数は1 Hzとして取得されたデータは前述のアドホック通信 (Wi-Fi Direct) により解析 PC まで伝送された。



図4.4 荷重応答試験の様子

4.5 センシングデータの転送試験

この時の通信装置 (データロガ機能内蔵) とスマートフォンによる無線通信の様子を図4.7に示す。また、これらのデータ量は13 MB/day程度であり、提案した通信システムで十分にデータ伝送可能な量であった。開発したアプリにより通信は制御される。材料試験では、応力換算で5 MPaまで荷重を加えることとした。以上のことから、提案するモニタリングシステムの妥当性を検証できたと結論づける。

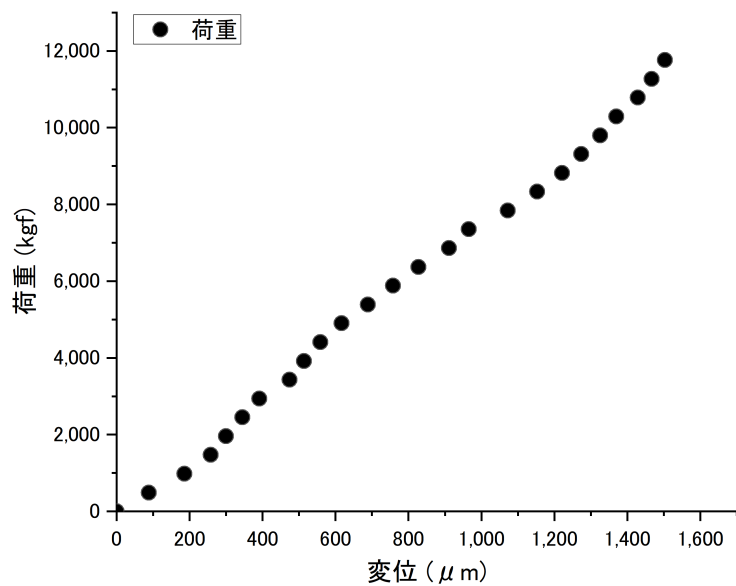


図4.5 荷重変位曲線

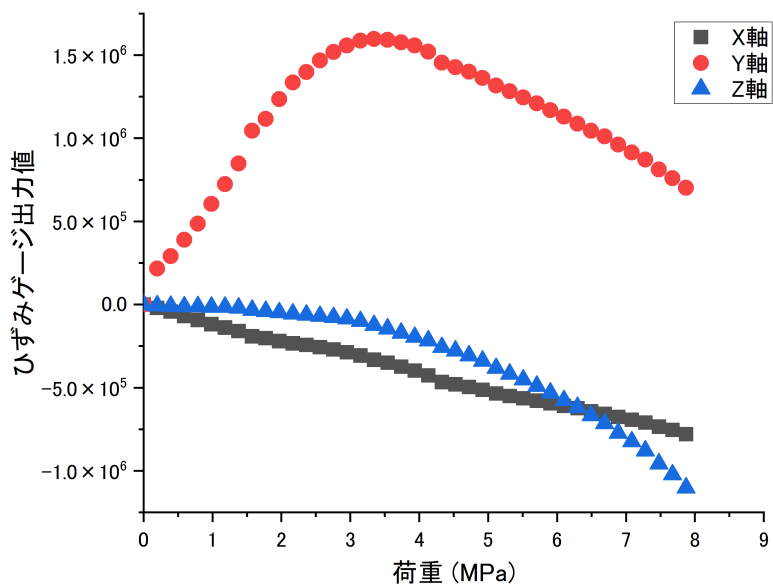


図4.6 ひずみゲージ出力値

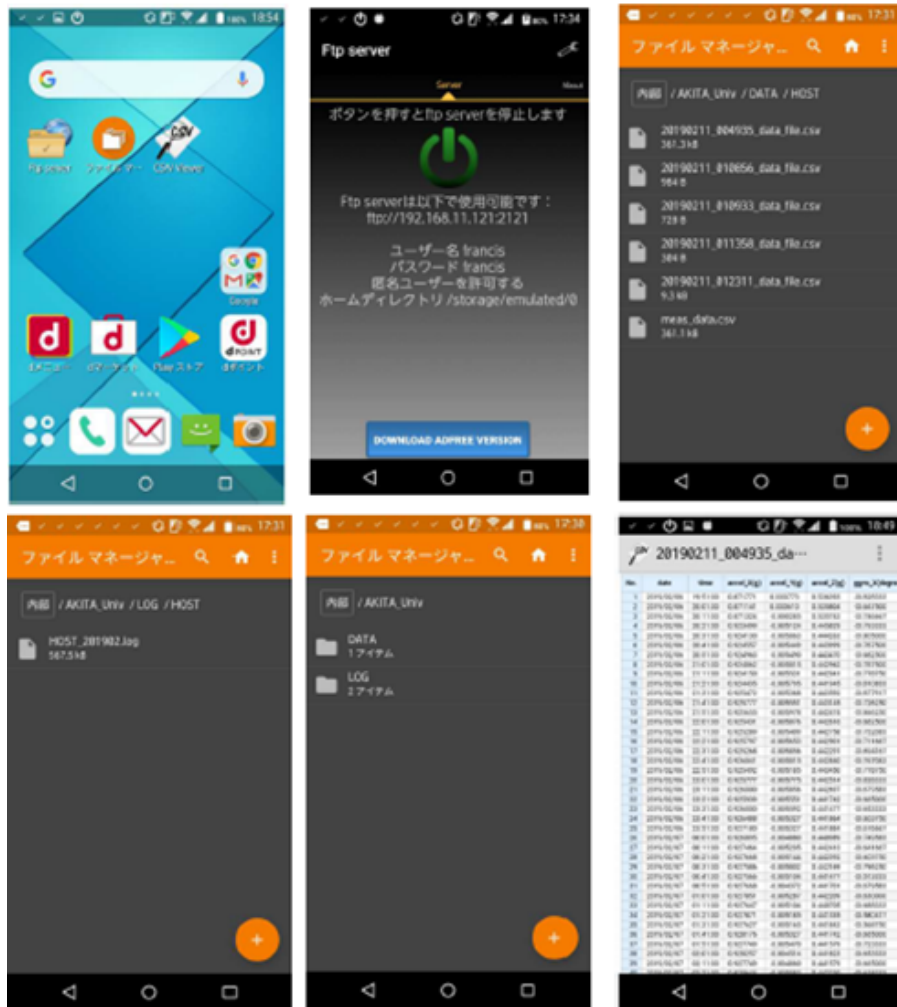


図4.7 データの無線通信の制御画面 (スマホ画面)

4.6 まとめ

第4章では坑内掘鉱山におけるセンシングの中でも原位置応力を取り上げ、本研究の提案するセンシングシステムのデザインをした。センシング対象とした原位置応力は、一時的な応力ではなく経時的な変化をモニタリングすることとしてそのモニタリングに必要なデータ量を算出した。

第 5 章 Wi-Fi Ad Hoc 通信を用いた基礎研究

5.1 Wi-Fi Ad Hoc 通信を利用した通信システム

第5章では第3章で示した地下坑内原位置応力モニタリングシステムの通信システム部分に Wi-Fi Ad Hoc を提案する。Wi-Fi Ad Hoc の特徴と通信性能を通信実験により評価することでモニタリングシステムとしての導入を検討した。

5.2 Wi-Fi Ad Hoc 通信

Wi-Fi Ad Hoc とは、IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11 無線 LAN の動作モードのひとつで、端末同士で P2P 通信を実現する。図5.1に Wi-Fi の通信方式を示す。一般的に使用されている Wi-Fi の動作モードはインフラストラクチャ通信とアドホック通信の 2 種に大別される。アドホック通信には Wi-Fi Ad Hoc の他に第6章で示す Wi-Fi Direct がある。アドホック通信では、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 という。また、端末の動きによってデータの共有もできる。アドホック通信で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 Ad Hoc 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。

図5.2に Wi-Fi Ad Hoc 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、データログへとデータを集約させる。そうしてデータログ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の近くへと移動することで通信システムの一役を担う。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坑内掘鉱山からデータを回収することで坑内掘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、坑内掘鉱山では採掘する階

$$L(dB) = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2, \quad (5.3)$$

$$\lambda(m) = 3.00 \times 10^8 / f, \quad (5.4)$$

ここで $RSSI$ は受信信号強度 (dBm)、 $TxPower$ 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 (5.1) 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のが分かる。式 (5.2) 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 (5.3、5.4) 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、坑内掘鉱山内では式 (5.1) 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 -80 dBm 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。

5.4 線形回帰

通信性能を評価するうえで線形回帰 (LR: Linear Regression) を使用した。LR とは、説明変数 (独立変数ともいう) に対して目的変数 (従属変数、あるいは反応変数ともいう) が線形またはそれから近い値で表される状態である。線形回帰は統計学における回帰分析の一種であり、非線形回帰と対比される。また、線形回帰のうち、説明変数が 1 つの場合を単純線形回帰、2 つ以上の場合を重回帰と呼ばれる。本研究では、最小二乗法 (OLS: Ordinary Least Squares) を使って、線形モデル関数をデータにフィットさせた。最小二乗法は、独立変数の範囲の理論曲線と実験点の間の偏差の二乗

の和を最小化する手法である。

最小二乗法により、 x が距離、 y が RSSI(あるいは、通信速度)を表す時、 x と y の間にどのような関係があるかを統計的に導き出す。例えば、最小二乗法を式5.5で示すことができる。

$$y = a + bx_t + e_t, \quad (5.5)$$

y は x によって説明されているので、被説明変数 (または目的変数や従属変数) と呼び、 y を説明している x のことを説明変数 (または独立変数) と呼ぶ。 a や b のことを係数 (またはパラメータ) と呼ぶ。特に、 a のように定数だけの係数は定数項と呼ぶ。 y と x が係数によって完全に一致するとは限らない。計算式によって計算される推計値 ($y_t = a + bx_t$) と実際の値との差を残差と呼ぶ。残差は確率変数である誤差項の実現値だと考える。

5.4.1 LR パラメータ表

値

データポイントに最も近い曲線を作成するフィットの各パラメータの推定値

標準誤差

パラメータの標準誤差により、フィット値の精度がわかる。通常、標準誤差値の大きさは、フィット値よりも低くする必要がある。標準誤差の値がフィットパラメータよりもとても大きい場合、フィッティングモデルは過剰パラメータである可能性がある。

t 検定

t 検定は、回帰モデルの各項が有意かどうかを判断する際に使用する。あるいは、全ての予測変数が応答変数に寄与しているか否かを判断する。係数の t 検定により、これらの疑問に対する答えを得る。パラメータの t 検定に対する帰無仮説は、このパラメータのフィット値が 0 であるということである。したがって、帰無仮説が棄却されない場合、対応する予測変数は有意でないといみなされる。つまり、応答変数とはほと

んど関係がない。また、t 検定は、検出ツールとして使うこともできる。例えば、多項式回帰において、t 検定を使い多項式モデルの適切な次数を調べることができる。t 検定により、より高い次数の項は有意性が無いと判断できるまで、高い次数の項を追加していく。

t 値

t 値は、t 検定の検定統計量のことである。t 値を式5.6で示すことができる。

$$t \text{ 値} = (\text{フィット値})/(\text{標準エラー}), \quad (5.6)$$

この t 値では、与えられた信頼水準の棄却値 α で比較されます (通常 5%)。t 値が棄却値 ($|t| > t_{\alpha/2}$ よりも大きい場合は、有意差があるといえる。しかしながら、 $\text{Prob} > |t|$ が説明しやすいため、t 値 と $\text{Prob} > |t|$ による判定は無視することもある。

Prob > |t|

$\text{Prob} > |t|$ は t 検定の p 値のことである。 $\text{Prob} > |t| < \alpha$ (通常は 5%) の場合は、t 検定の H_0 を除外する十分な根拠と考えられる。 $\text{Prob} > |t|$ が小さいほど、フィット値が 0 である確率は低い。

5.4.2 統計表

残差平方和

残差平方和 (RSS: Residual Sum of Squares) は、各データポイントからフィット回帰直線までの垂直偏差の 2 乗の和である。RSS の値がゼロの場合、データが完全にフィットしていると推測できる。この統計値は、フィット線がデータによくフィットしているか判断する材料となる。一般的には、残差平方和が小さいほどモデルがデータによくフィットしていると言える。

ピアソンの r

ピアソンの r で示されるピアソンの相関係数は、対のデータ間の線形関係の強さを測定するのに役立つ。ピアソンの r は、-1 から 1 の値をとる。線形回帰では、正のピアソンの r の値は、予測変数 (x) と応答変数 (y) との間に正の線形相関があることを示し、負のピアソンの r の値は、おおよび応答変数 (y) を含むことを示す。ゼロの場合、データ間に線形相関がないことを表している。さらに、値が-1 または 1 に近いほど、より強い線形相関があることがわかる。

R 二乗

R 二乗は、決定係数 (COD: Coefficient of Determination) としても知られており、線形回帰を評価する統計手法である。これは、回帰直線によって説明される応答変数の変化のパーセンテージである。たとえば、R 二乗は、モデルが応答変数のばらつきの約 89%以上を説明していることを示す。従って、R 二乗は常に 0 から 1 の間にある。R 二乗が 0 の場合は、フィット線がその平均値の周りの応答データのばらつきについて何も説明していないことを示す。R 二乗が 1 の場合、フィット線がその平均値周辺の応答データのすべてのばらつきを説明することを示す。一般的に R 二乗値が大きいと、フィット直線がデータに良くフィットしていることになる。

補正 R 二乗

R 二乗はモデルがデータにどの程度良くフィットしているのかを評価し、R 二乗は新しい予測因子が加わると常に大きくなる。より多くの予測変数を持つモデルがよりよく適合しているというのは誤っている。補正 R 二乗は、R 二乗を修正したもので、フィット線の予測因子の数を調整したものである。つまり、予測因子が異なるフィット線を比較するために使用される。予測因子の数が 1 より大きい場合、補正 R 二乗は R 二乗より小さくなる。

5.4.3 分散分析

分散分析 (ANOVA: Analysis of Variance) は、観測データにおける変動を誤差変動と各要因およびそれらの交互作用による変動に分解することによって、要因および交互作用の効果を判定する、統計的仮説検定の一手法である。2群の平均値の有意差を検討するには t 検定を用いるが、3群以上の平均値の有意差を調べる場合 ANOVA を用いる。分散分析は全体的な平均値の相違を調べる方法で、どの群間に有意差があるかは把握できない。

***F* 値**

F 値は、2つの平均平方の比であり、フィットモデルの平均平方を誤差の平均平方で除算することによって計算できる。当てはめられたモデルが、傾きがゼロ ($y = \text{定数}$) と有意に異なるかどうか検定するための統計である。この比が 1 より大きくなればなるほど、フィットモデルは $y = \text{定数}$ と有意に異なるという証拠になる。

Prob>F

$\text{Prob}>F$ は、 F 検定の p 値で、0 から 1 の範囲の値の確率です。 F 検定の p 値が、有意水準 α (通常 5%) より小さいと、フィットモデルが $y = \text{定数}$ とは有意に異なる結論付けでき、フィットモデルが、傾きが 0 ではない非線形の曲線または線形であることと推測される。

5.5 Wi-Fi Ad Hoc 通信試験の概要

本研究の初期段階として、Wi-Fi Ad Hoc に対応したデータログ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 Ad Hoc 無線通信モニタリングシステムを図5.3に示す。Wi-Fi Ad Hoc 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 (データログ) 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、バケツ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グ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5.7に示す。

$$\text{通信速度}(MB/s) = FS/ST \quad (5.7)$$

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グとスマートフォンとの通信距離およびその時の通信速度を考察する。このレートは、システムの通信速度やレイテンシを決定するのにも役立つ。一方、RSSI は、送信デバイスの電界強度の絶対値をデシベルミリワット (dBm) で表したものである。必要な RSSI があらかじめわかっているならば、既知の値以上の RSSI が得られる構成 (デバイスの位置や条件など) を決定する実験を行うことができる。しかしながら、この方法では、波の干渉により信号の受信品質が低下しても、単純に電力値を測定してしまう。そこで、受信アンテナの電力を計算し、自由空間の基本的な伝搬損失の式 (Friis 伝搬式) を考慮するために、式5.1、5.8、5.9が一般的に使用されている。

$$PR/PT = G_t G_r (\lambda/4\pi d)^2, \quad (5.8)$$

$$G = 4\pi A_e / \lambda^2, \quad (5.9)$$

ここで、 PR と PT はそれぞれ受信電力と送信電力 (W)、 G_t と G_r は等方性の放射体に対する送受信アンテナの絶対利得 (dB)、 λ と d は波長と距離 (m) である。データログの最大 PT は約1.5 Wだった。 $A_e(m^2)$ は有効開口部で、アンテナの物理的な大きさに関係する。

この式によると、送信アンテナと受信アンテナの絶対利得が周波数に依存しない場合、周波数が高いほど受信信号強度は弱くなる。自由空間伝搬では、距離が変わらない固定通信の場合、受信信号強度が変化しないため、システム設計は比較的容易である。しかしながら、実際の環境下での計算はかなり難しい。自由空間での伝搬損失は、投光器と受光器がともに高所にある場合には、若干の補正が可能である。また、無線機器は大地の形状や建物、天候などの影響を受ける。地面からの高さが1 m程度の場合には非常に影響を受けやすく、計算値と実測値に大きな差が出てしまう。周波数400 MHzのデータを送信し、郊外の200 mの距離で減衰量を測定した場合、自由空

間での伝搬損失と比較して、実質的な差は20 dBとなる。このように、実際の現場では、測定や実験によって通信性能を検証することが必要であると結論づけた。

親機(データログ)と子機(カメラ)には、Raspberry Pi3 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の約1.5 Wにして通信試験を行った。また子機の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、1 MB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スマートフォンは、IEEE 802.11 a/ac/b/g/n の多入力多出力(MIMO)対応の iPhone 6s である。

第5章で行った実験は、秋田大学構内や雄物川河川敷を含む屋内外と休廃止銅鉦山である史跡尾去沢鉦山内において行った。図5.10に示すように、データログとスマートフォンは地上から1 mの高さに固定し、スマートフォンをデータログから5 m間隔で実験を開始させた。図5.4に Wi-Fi Ad Hoc 無線通信試験の模式図を示す。図5.4に示すように通信試験を5 m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 送信して通信の安定性を適切に評価した。通信試験のために、画像データはデータログに送られ、事前に保管した。次に、データログ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。様々な条件下における Wi-Fi Ad Hoc 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。

5.5.1 屋内外での通信実験

通信試験は、第5章の目的である坑内掘鉦山環境での通信性能の確認を行う予備試験として、地上や建物内部でも行った大学構内の直線は建物が左右にあり、建物の反響もあると推測された。また、建物内部は周囲を壁に覆われていることから坑内掘鉦山の環境に近いものと推測した。最後に、開けた場所で周囲に水気のある場所として雄物川河川敷を実験場所として選定した。図5.5、5.6、5.7に実験の様子を示した。

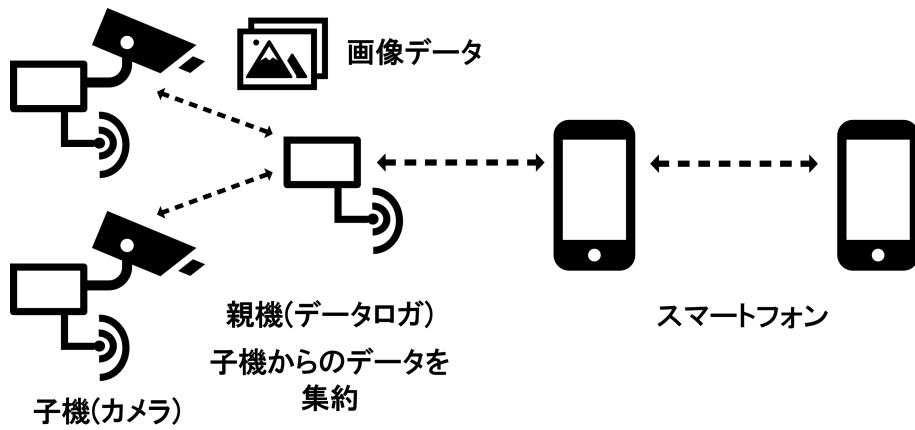


図5.3 Wi-Fi Ad Hoc 無線通信モニタリングシステムの模式図

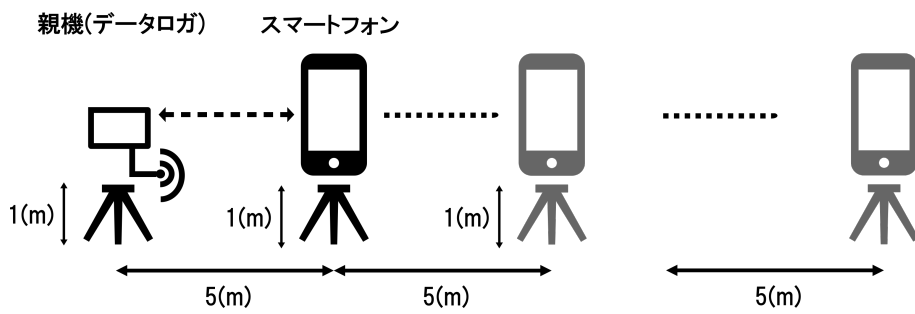


図5.4 Wi-Fi Ad Hoc 無線通信試験の模式図

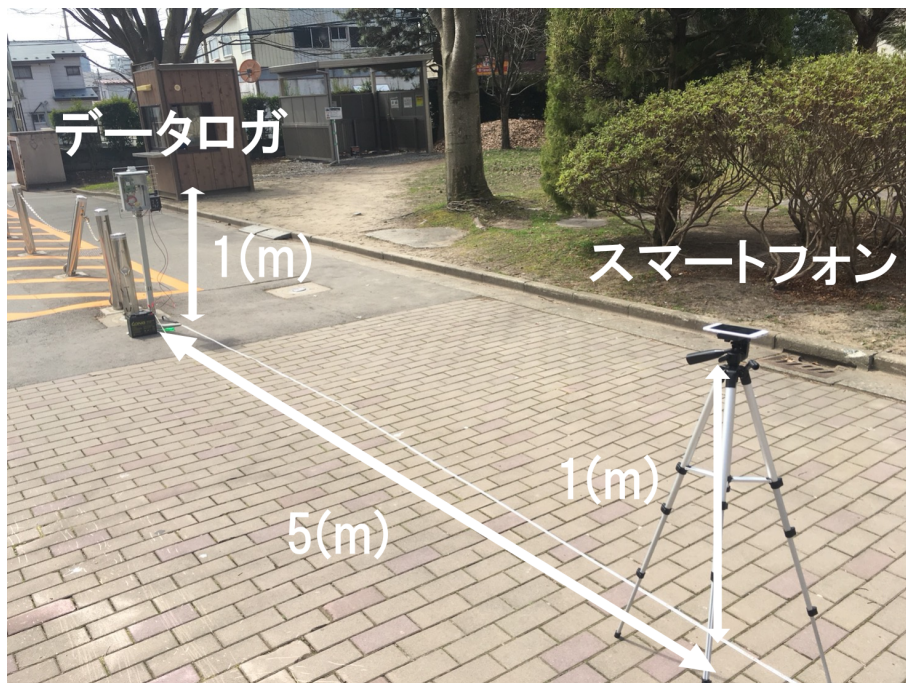


図5.5 Wi-Fi Ad Hoc 無線通信試験の様子 (大学構内)

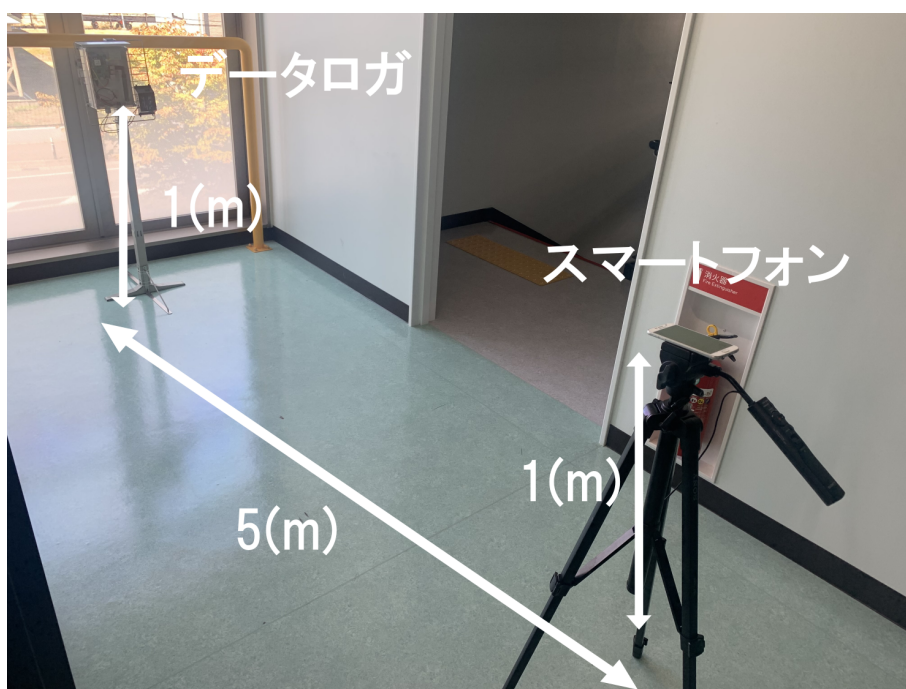


図5.6 Wi-Fi Ad Hoc 無線通信試験の様子 (建物内部)

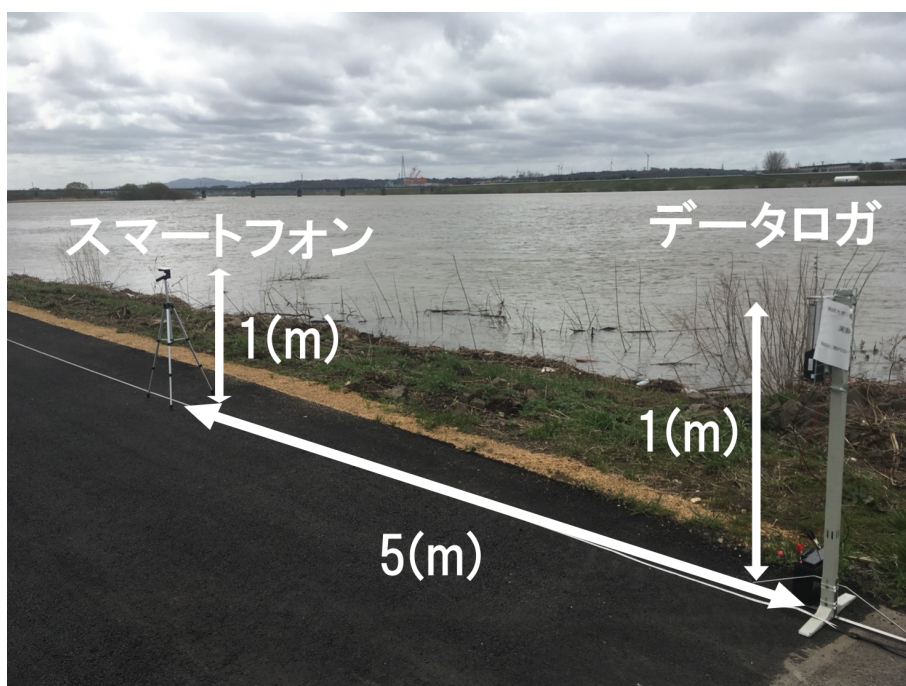


図5.7 Wi-Fi Ad Hoc 無線通信試験の様子 (雄物川河川敷)

5.5.2 尾去沢鉱山での通信試験

通信試験は、秋田県の休廃止銅鉱山である史跡尾去沢鉱山で行った。図5.8に尾去沢鉱山の所在地を示す。図5.8は国土地理院の地図から作成した。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。図5.9に通信試験場所の模式図を示す。坑道は高さ約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信の2つのケースが考慮された。装置は、坑道の中心線に沿って配置し通信試験を行った。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。図5.10に Wi-Fi Ad Hoc 無線通信試験の様子を示す。

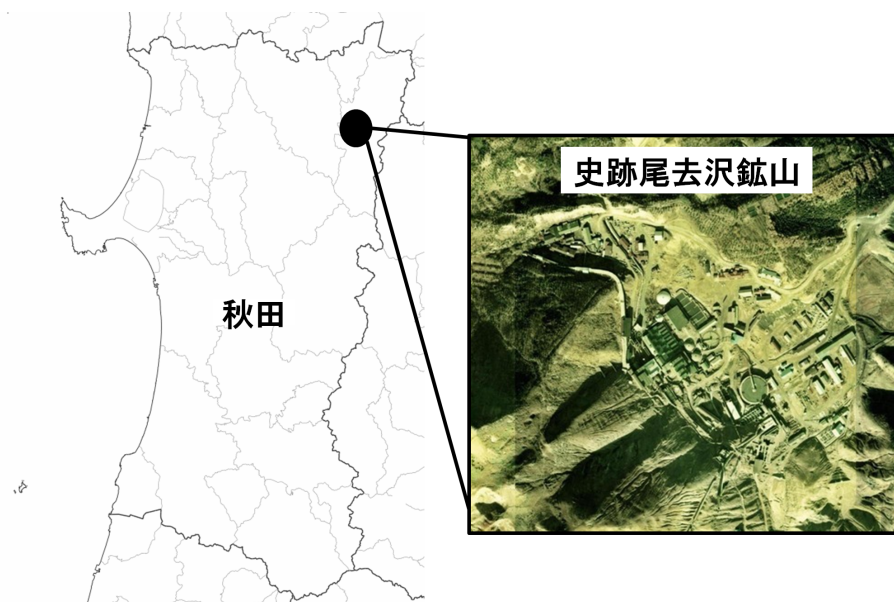


図5.8 尾去沢鉱山の所在地

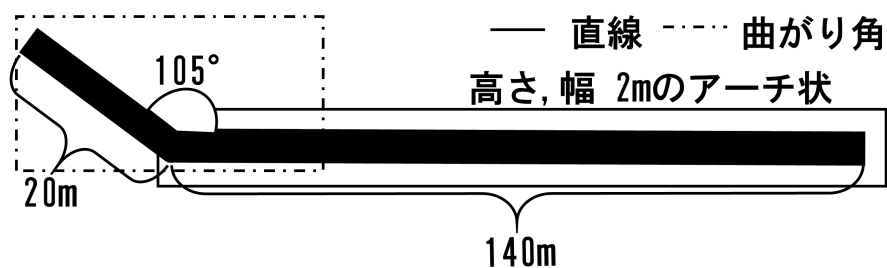


図5.9 通信試験場所の模式図



図5.10 Wi-Fi Ad Hoc 無線通信試験の様子 (尾去沢鉱山)

5.6 Wi-Fi Ad Hoc 通信試験の結果

5.6.1 屋内外での通信結果

屋内外での RSSI の通信試験の結果を図5.11にまとめた。総じて、データログからの距離が離れるにつれて、RSSI の減衰傾向がみられた。また、屋内外での通信速度の通信試験の結果を図5.12にまとめた。

5.6.2 尾去沢鉱山での通信結果

屋内外での RSSI の通信試験の結果を図5.13にまとめた。総じて、データログからの距離が離れるにつれて、RSSI の減衰傾向がみられた。また、屋内外での通信速度の通信試験の結果を図5.14にまとめた。

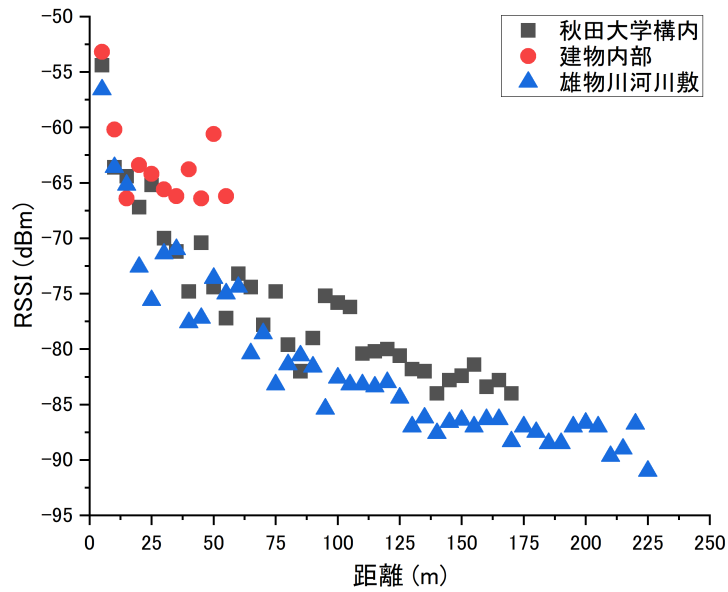


図5.11 RSSI と通信距離の実験結果 (屋内外)

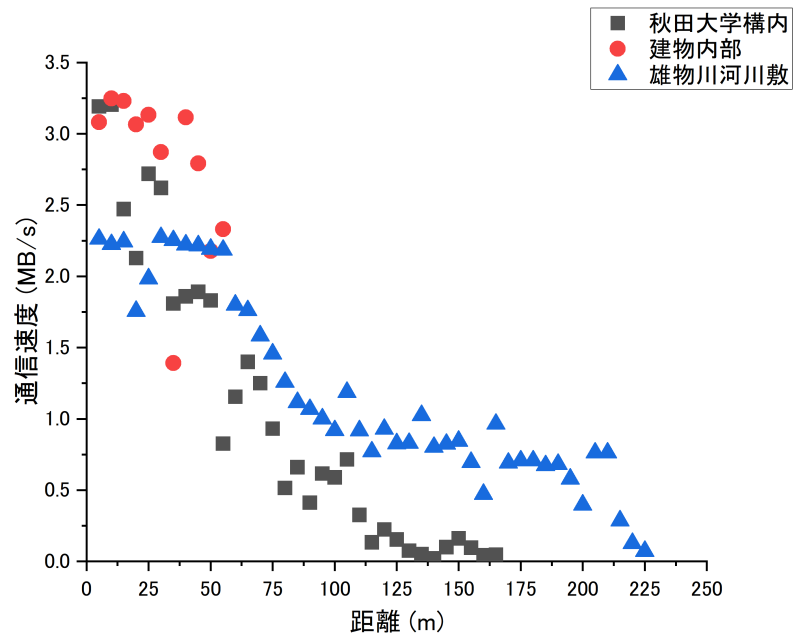


図5.12 通信速度と通信距離の実験結果 (屋内外)

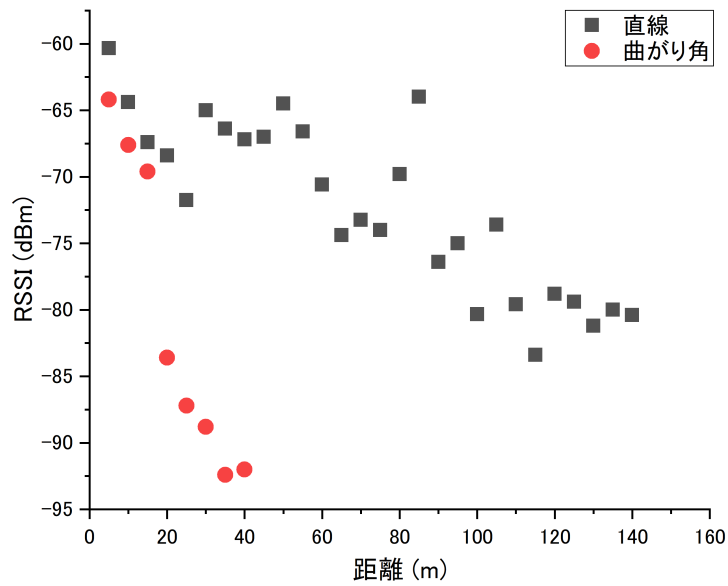


図5.13 RSSI と通信距離の実験結果 (尾去沢鉱山)

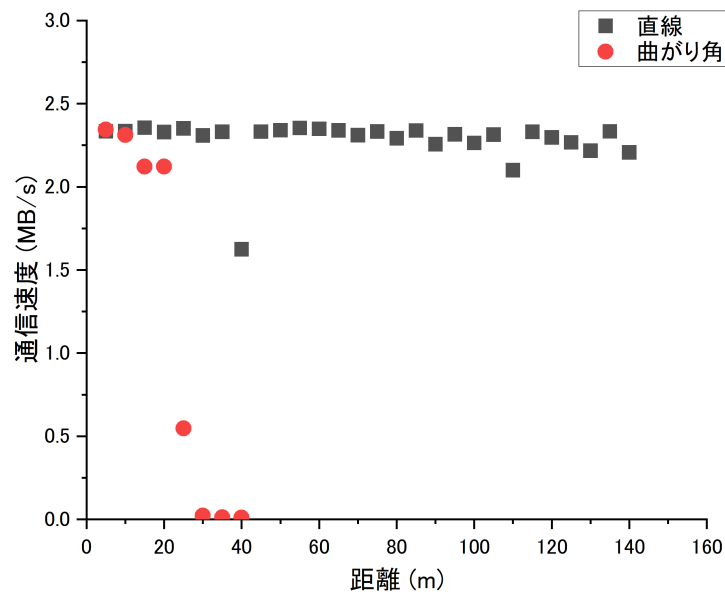


図5.14 通信速度と通信距離の実験結果 (尾去沢鉱山)

5.7 線形回帰による通信性能の評価

5.7.1 屋内外での通信結果に関する考察

秋田大学の構内と建物内部、そして雄物川河川敷で行われた通信試験の RSSI と距離の結果を図5.15に示し、LR の値を表5.1にまとめた。また、LR の結果を図5.16、5.17、5.18にそれぞれ示した。

このときに使用した数値および補足資料は付録 A にまとめた。安定した接続のための最小値の基準として、RSSI を -80 dBm と定義した。図5.15では、大学構内の実験結果は、110 m 地点の RSSI が -80.4 dBm であり、それを超えると RSSI が -80 dBm を下回り続けていた。通信は170 m 地点を最後に途絶えた。また、LR を行ったところ、 R^2 値が 0.79 で傾きが -0.12 、切片 -65 のトレンドラインが得られた。次に、建物内部は、建物の長さの都合上で図5.15に示すように、最後まで安定した通信 (-80 dBm 以上) が行うことができた。LR を行ったところ、 R^2 値が 0.27 で傾きが -0.13 、切片 -60 のトレンドラインが得られた。このトレンドラインはデータ値に対する適合性が R^2 値が 0.27 であることから比較的低いことがわかった。この不一致は、建物内部であることから、壁の凹凸が波の反射に影響を与えていることや他の部屋からの同周波数帯の影響が考えられる。最後に、雄物川河川敷の実験結果は、75 m の地点で -83 dBm を記録してからその後は -80 dBm を下回り続けていた。通信は225 m 地点を最後に途絶えた。また、LR を行ったところ、 R^2 値が 0.77 で傾きが -0.10 、切片 -70 のトレンドラインが得られた。これら LR の結果から秋田大学構内、建物内部、そして雄物川河川敷の通信距離はそれぞれ125 m、154 m、そして100 m と結論付けた。

図5.19は、通信速度の結果を示し、線形フィットの値を表5.2にまとめた。また、LR の結果を図5.20、5.21、5.22にそれぞれ示した。

大学構内では、50 m の距離で 1.8 MB/s 以上の通信速度が出ていたが、より短い距離では最大 2.7 MB/s の高速化が見られた。線形フィットを行ったところ、 R^2 値が 0.86 で傾きが -0.02 、切片が 2.68 のトレンドラインが得られた。 R^2 が RSSI の時と比べ高くなった。建物内部では、すべての距離で 1.4 – 3.1 MB/s の通信速度が出ていた。線形フィットを行ったところ、 R^2 値が 0.26 で傾きが -0.02 、切片が 3.37 のトレンドラインが得られた。 R^2 が RSSI の時と比べ高くなった。しかしながら、このトレンドライン

はデータ値に対する適合性が R^2 値が 0.26 であることから RSSI と同様に比較的低いことがわかった。雄物川河川敷では、135 mの距離で1 MB/s以上の通信速度が出ていたが、より短い距離では最大2.3 MB/sの高速化が見られた。線形フィットを行ったところ、 R^2 値が 0.86 で傾きが-0.01、切片が 2.26 のトレンドラインが得られた。 R^2 が RSSI の時と比べ高くなった。

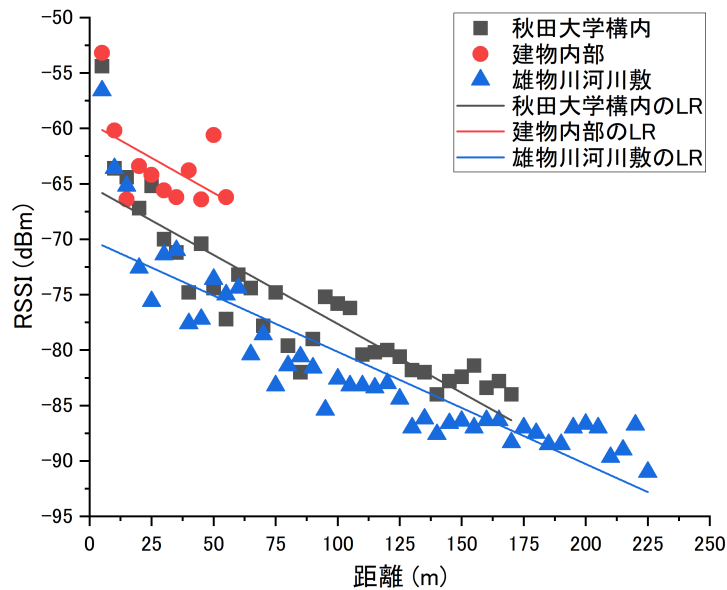


図5.15 RSSI と通信距離の相関グラフ (屋内外)

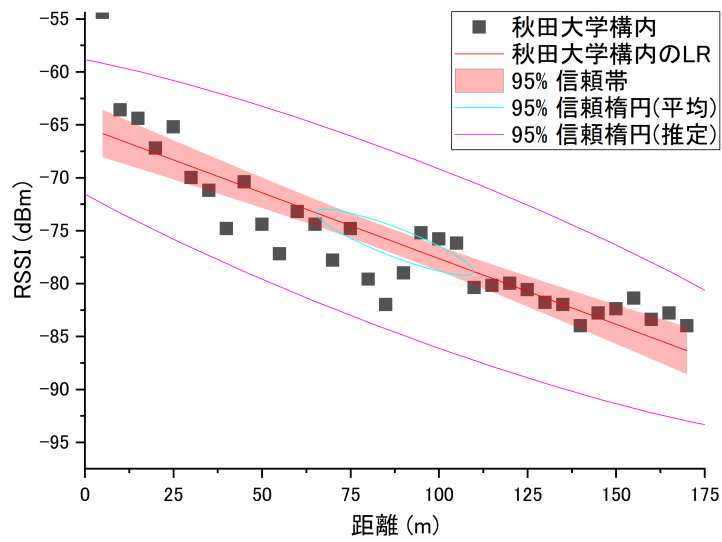


図5.16 LR: RSSI(秋田大学構内)

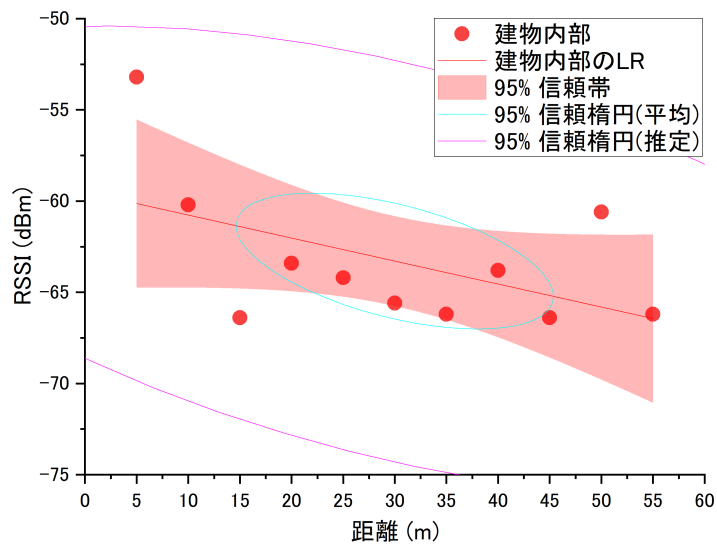


図5.17 LR: RSSI(建物内部)

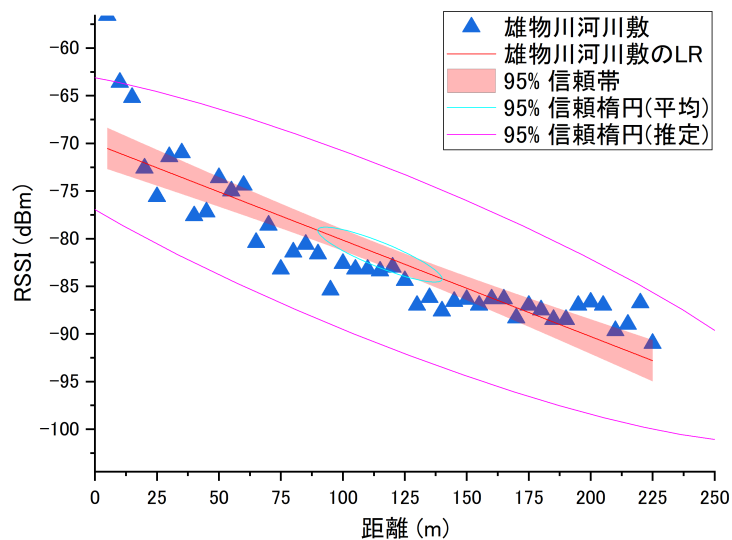


図5.18 LR: RSSI(雄物川河川敷)

表5.1 RSSI と通信距離の LR データ抜粋 (屋内外)

	大学構内	大学建物内部	河川敷
数式	$y = a + bx$	$y = a + bx$	$y = a + bx$
重み	重み付けなし	重み付けなし	重み付けなし
傾き	-0.12	-0.13	-0.10
切片	-65	-60	-70
残差平方和	3.4E+02	1.2E+02	5.8E+02
ピアソンの r	-0.89	-0.52	-0.88
R 二乗 (COD)	0.79	0.27	0.77
補正 R 二乗	0.78	0.19	0.77

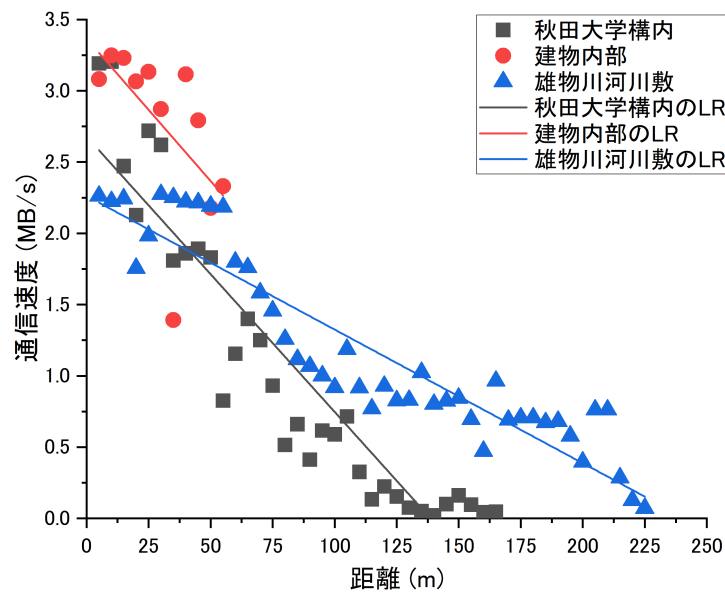


図5.19 通信速度と通信距離の相関グラフ (屋内外)

表5.2 通信速度と通信距離の LR データ抜粋 (屋内外)

	大学構内	建物内部	河川敷
数式	$y = a + bx$	$y = a + bx$	$y = a + bx$
重み	重み付けなし	重み付けなし	重み付けなし
傾き	-0.019	-0.020	-0.0094
切片	2.7	3.4	2.3
残差平方和	4.3	2.2	2.7
ピアソンの r	-0.93	-0.57	-0.93
R 二乗 (COD)	0.87	0.33	0.86
補正 R 二乗	0.86	0.26	0.86

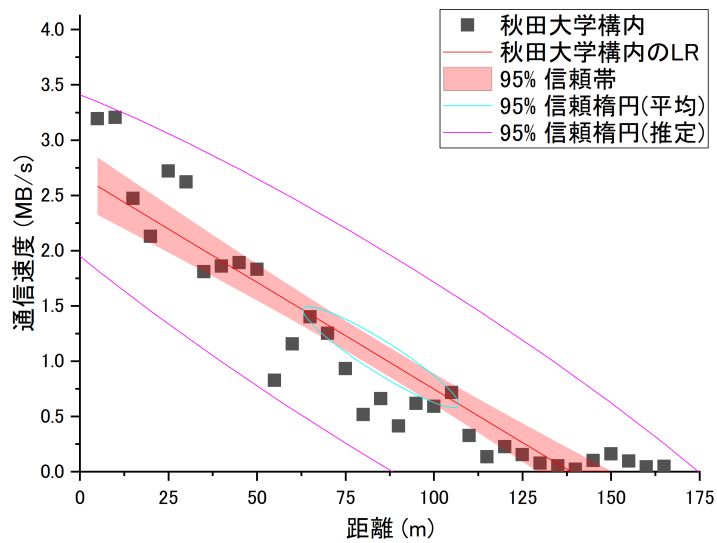


図5.20 LR: 通信速度 (秋田大学構内)

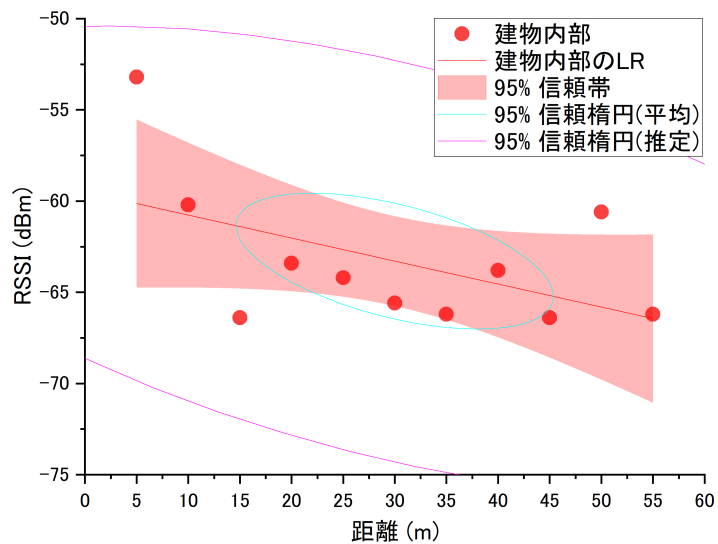


図5.21 LR: 通信速度 (建物内部)

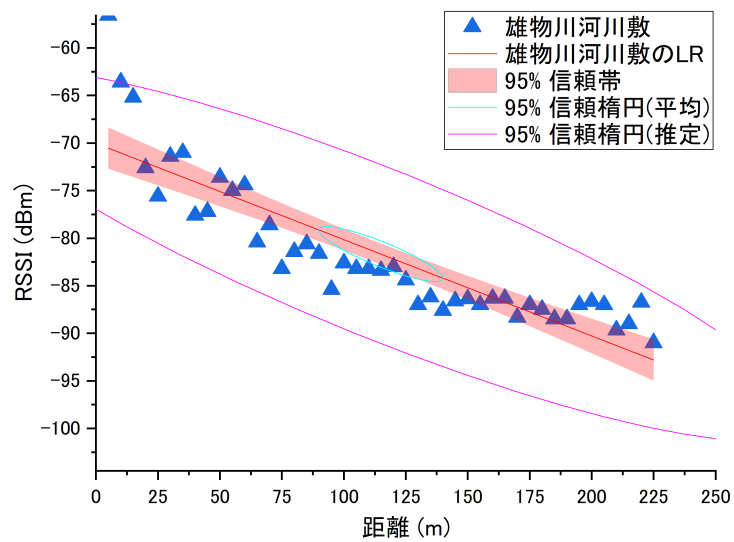


図5.22 LR: 通信速度 (雄物川河川敷)

5.7.2 尾去沢鉱山での通信結果に関する考察

尾去沢鉱山の直線経路と曲がり角の RSSI と距離の結果を図5.23に示し、LR の値を表5.3にまとめた。また、LR の結果を図5.24、5.25にそれぞれ示した。このときに使用した数値および補足資料は付録 A にまとめた。安定した接続のための最小値の基準として、RSSI を -80 dBm と定義した。図5.23では、直線経路の実験で得られたデータは、 100 m 地点の RSSI が -80.3 dBm であり、それを超えると急激に低下することを表している。しかしながら、 115 m 地点の RSSI は -83.4 dBm で、その後は -80 dBm 前後で変動している。また、LR を行ったところ、 R^2 値が 0.74 で傾きが -0.14 、切片 -62 のトレンドラインが得られた。曲がり角の実験では、図5.23に示すように、 20 m の地点での RSSI は -83.6 dBm であり、その地点を超えるとさらに低下する。同様に、中央値に対して LR を行ったところ、 R^2 が 0.91 で傾きが -0.90 、切片 -60 のトレンドラインが得られた。これらの LR の結果から直線と曲がり角の通信距離はそれぞれ 129 m と 22 m であると結論づけた。

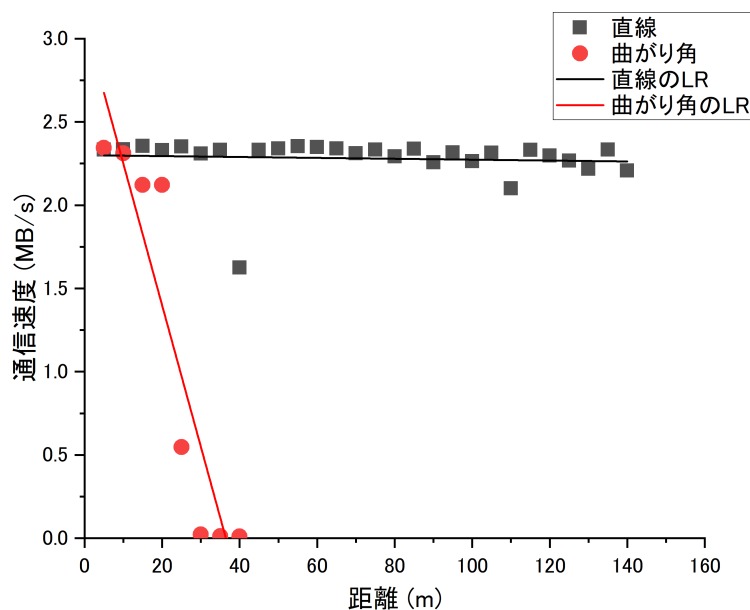


図5.23 RSSI と通信距離の相関グラフ (尾去沢鉱山)

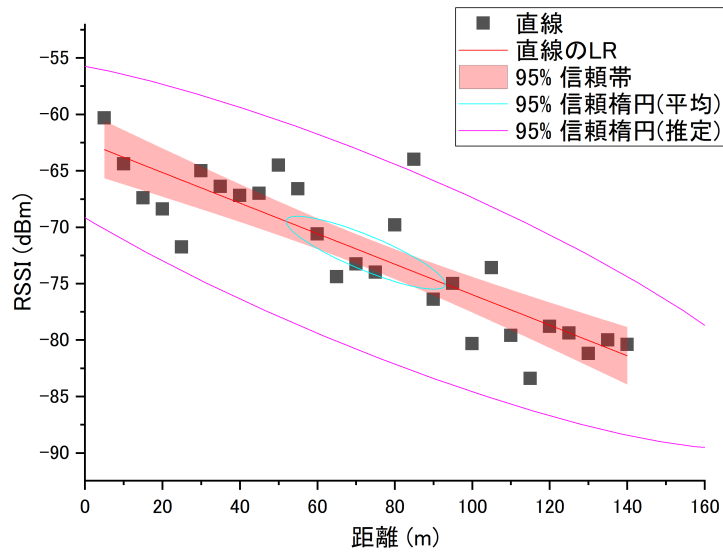


図5.24 LR: RSSI(直線)

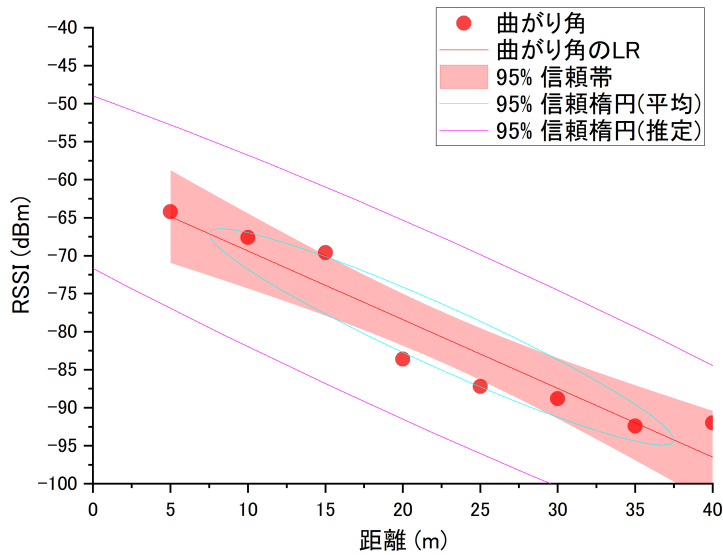


図5.25 LR: RSSI(曲がり角)

表5.3 RSSI と通信距離の LR データ抜粋 (尾去沢鉱山)

	直線	曲がり角
数式	$y = a + bx$	$y = a + bx$
重み	重み付けなし	重み付けなし
傾き	-0.14	-0.90
切片	-62	-60
残差平方和	2.9E+02	89
ピアソンの r	-0.86	-0.95
R 二乗 (COD)	0.74	0.91
補正 R 二乗	0.73	0.89

図5.26は、通信速度の結果を示し、LR の値を表5.4にまとめた。また、LR の結果を図5.27、5.28にそれぞれ示した。このときに使用した数値および補足資料は付録 Aにまとめた。直線経路では、40 mの距離で1.8 MB/sの速度が出ていたが、より短い距離では最大2.5 MB/sの高速化が見られた。これに対応する対数トレンドラインの R^2 値は 0.01 と低くなった。曲がり角では、通信速度の中央値は25 mの地点で2.3 MB/sだったが、やはり距離が短いほど通信速度が速い傾向にあった。最大で2.5 MB/sの高速化が見られた。

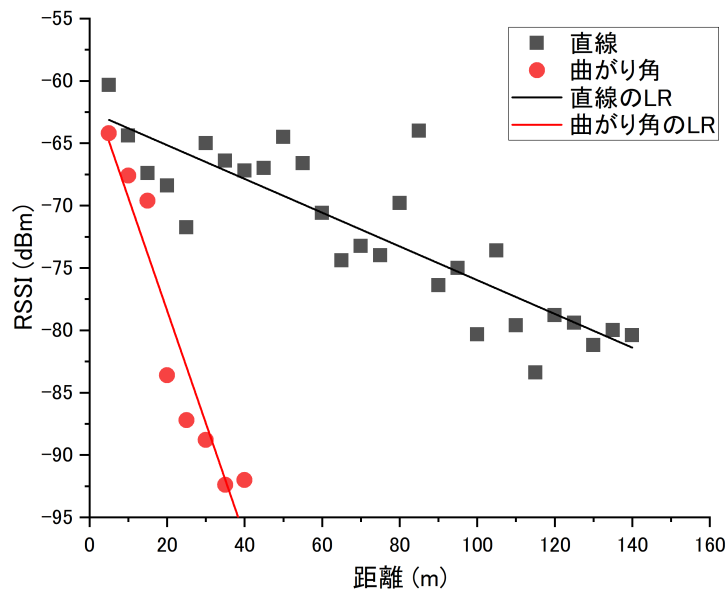


図5.26 RSSI と距離との相関グラフ (尾去沢鉱山)

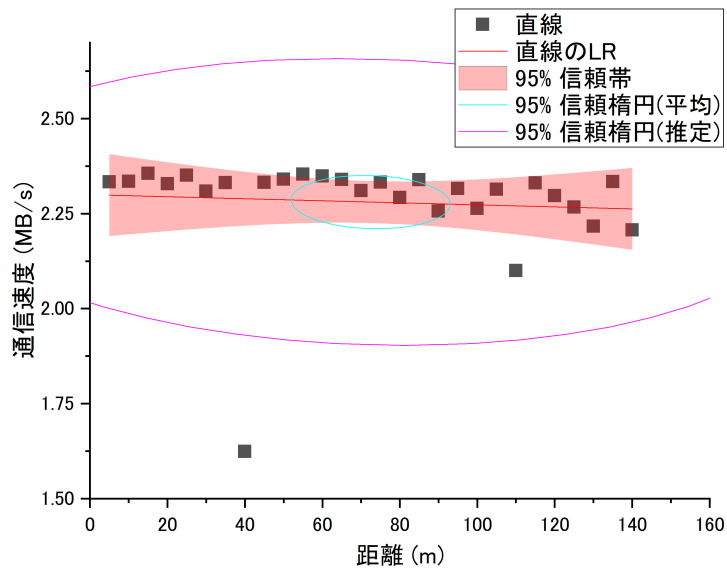


図5.27 LR: 通信速度 (直線)

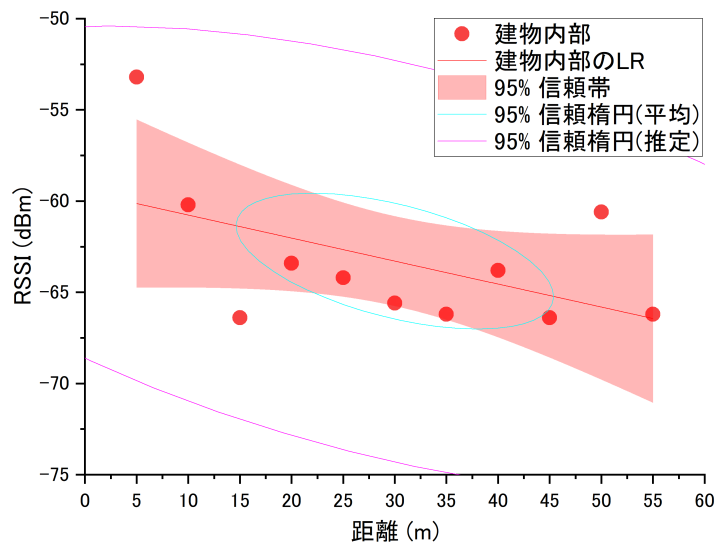


図5.28 LR: 通信速度 (曲がり角)

表5.4 通信速度と通信距離の LR データ抜粋 (尾去沢鉱山)

	直線	曲がり角
数式	$y = a + bx$	$y = a + bx$
重み	重み付けなし	重み付けなし
傾き	-2.7E-04	-0.085
切片	2.3	3.1
残差平方和	0.53	1.3
ピアソンの r	-0.078	-0.92
R 二乗 (COD)	0.0062	-0.85
補正 R 二乗	-0.03207	0.83

今回の通信実験の結果をもとに、坑内掘鉱山でのデータロガ (親機) とスマートフォンの通信性能を以下のようにまとめた。通信距離が直線で129 mであったことから、データロガの通信範囲内に入ってから出るまでの258 mで2 MB/sのデータ受信が可能である。同じ Wi-Fi 規格を使って同じ条件で通信しても通信性能が変わらないことから、今回の実験結果はスマートフォンと子機間の通信にも適用できる。そこで理論的には、鉱山従事者がスマートフォンを携帯して20 km/hで坑道を移動している状況を想定した。親機、子機、あるいは他の鉱山従事者が持っているスマートフォンの通信範囲に入ると、すぐにデータ転送が開始される。片方の鉱山従事者だけが移動している場合も、移動中のスマートフォンと固定された親機や子機との間で通信を行う場合も、データ転送可能な時間は46.4 sとなる。2人の鉱山従事者がお互いに向かって移動している場合、その相対速度は40 km/hであるため、通信可能な時間は23.2 sに短縮され、最大で46.4 MBのデータを転送することができる。また、鉱山従事者が徒歩 (5 km/h) でデータロガの通信範囲内を通り過ぎる際にデータを回収することを考えたとき、通信可能な時間は185.8 sに増加し、最大で371.5 MBのデータを転送することができる。表5.5は、通信可能データ量の一覧である。要約すると、機器間の相対速度が遅いほど、転送可能なデータ量が多くなる。式5.10、5.11で車速を通信範囲で割って通信時間を算出し、通信時間に通信速度をかけ合わせ転送データ量を求めた。

$$CT(s) = \frac{VS \times \frac{1,000}{3,600}}{CR}, \quad (5.10)$$

$$DT(MB) = CT \times T, \quad (5.11)$$

ここで、 VS は車速 (km/h)、 CR は通信距離 (m)、 CT は通信時間 (s)、 DT はデータ転送量、 TP は通信速度 (MB/s) を表している。

上述の理論的状況とそれに対応する計算を考慮すると、坑内掘鉱山で必要な監視データをテキストまたは画像ファイルとして伝送するための信頼性を確保するためには、最大許容速度で46.4 MBから371.5 MBのデータ転送容量が期待できる。

全体の結果に基づいて、データロガを曲がり角に設置するか、または129 m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2 MB/s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者が20 km/hの速度の重機に乗り、

通信範囲内を通過する46.4 s間で92.8 MB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(データログ)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 Ad Hoc 無線通信は、坑内掘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。

表5.5 通信可能データ量

移動条件	時間 (s) × 通信速度 (MB/s)	データ転送可能量 (MB)
相対速度 5(km/h)	185.8×2	371.6
相対速度 20(km/h)	46.4×2	92.8
相対速度 40(km/h)	23.2×2	46.4

5.8 まとめ

地下の WSN は、環境モニタリング、作業員の位置追跡、監視を大幅に改善し、堅牢な地下無線通信システムを構築することができる。第5章では、Wi-Fi Ad Hoc 通信システムの有効通信距離は129 m、転送速度は最大2 MB/sで、46.4–371.5 MBのセンサーデータを転送できることがわかった。これらの結果から、Wi-Fi Ad Hoc 技術は坑内掘鉱山の情報化に適していると考えられる。しかしながら、坑内経路の分岐点や曲がり角は、電波の伝わり方やシステムの有効性に大きな影響を与える。そのため、実際の環境に合わせてネットワークを設計する際には、この点を考慮する必要がある。分岐点や曲がり角による性能低下を最小限に抑えるために、坑道の分岐点や曲がり角に子機を配置することを提案する。

今回の結果を受けて、環境モニタリング、位置追跡、監視などのデータ収集にシステムを活用したり、他の坑内掘鉱山でシステムを実証試験をして、性能に影響を与える要因をさらに解明したりするなど、さまざまな研究が考えられる。資源需要の増加に伴い、坑内掘鉱山はより深く、より複雑になっていく。リスク管理、安全性の確保、生産性の向上のためには、WSN のような技術が不可欠である。

第 6 章 Wi-Fi Direct 通信を用いた基礎研究

6.1 Wi-Fi Direct 通信を用いた通信システム

第6章では第3章で示した地下坑内原位置応力モニタリングシステムの通信システム部分に Wi-Fi Direct を提案する。Wi-Fi Direct の特徴と通信性能を通信実験により評価することでモニタリングシステムとしての導入を検討した。

6.2 Wi-Fi Direct 通信

第6章では、アドホック通信の中から Wi-Fi Direct をその通信に採用した。アドホック通信 (Wi-Fi Ad Hoc および Wi-Fi Direct) は Wi-Fi インフラストラクチャとは異なり、ルーターや補助配線などを必要とせず機器同士が直接つながり通信を実現させる。この時のアドホック通信は、P2P 接続ともいわれていて、予め LAN アダプタ設定で複数のアクセスポイントに跨る拡張識別子 (Extended Service Set ID:ESSID) を一致させる必要がある。これによるアクセスポイントなしの直接接続による動作を行う。そして、Wi-Fi Direct は Wi-Fi Ad Hoc の長所を引き継いだ上に、問題とされていた設定の煩雑さおよびセキュリティ面などを改良した通信規格とされている。また、一番の特徴としては、Wi-Fi Direct につながるスマートフォンがアクセスポイントとして活用できることにある。これにより、通常の Wi-Fi に対応していれば通信が可能となる。Wi-Fi Direct の特徴は、アクセスポイントの機能をソフトウェアで実現していることや通信機器の SSID(固有 ID) や暗号化キーは自動的に決められることがあげられる。他にも通信機器の少なくとも一つが対応していれば通信が可能である。具体的にはスマートフォンとパソコンでそれぞれ、OSが Android 4.0 以降と Windows 7 以降の時に Wi-Fi Direct に対応する。

6.3 Wi-Fi Direct 通信試験の概要

坑内掘鉱山における Wi-Fi Direct 通信の性能を評価するには、通信距離と速度、待ち時間、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。通信範囲と速度は、直線経路と曲がり角の両方の通信試験から計算された。親機と子機はともに、GW-300S KATANA モジュールで IEEE802.11 a/ac/b/g/n 規格を使用するように改造された Raspberry Pi 3 コンピュータを使用した。具体的には、IEEE802.11n 規格を通信試験に使用し、データログの出力電圧を最大化した。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、1 MB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 Android である。また、温度、湿度およびガス濃度等の坑内環境データをそれぞれに適したサンプリング周波数で計測した場合、そのデータ量は2 MB/dayとなる。今回提案した Wi-Fi Direct 通信システムにより容易に伝送可能なデータ量と言える。以上、それぞれの持つスマートフォンやデータログ同士がバケツリレー方式で通信を行い、地下から地上まで (あるいは、地上から地下) データを伝達する通信システムを提案する。

6.3.1 尾去沢鉱山での通信試験

第5章と同じ秋田県の尾去沢鉱山で通信試験を行った (図5.8、5.9)。実験に使用した機材の通信規格を Wi-Fi Ad Hoc から Wi-Fi Direct へと改修を行い、そのほかの実験条件を同じとした。

6.3.2 実験鉱山 (Witswatersrand 大学) での通信試験

次に南アフリカ共和国の Witswatersland 大学の実験鉱山で通信試験を行った。実験鉱山及び後述する Great Nologwa 鉱山の所在地を図6.1に示す。実験箇所として実験鉱山の直線と矮小空間、そしてシャフトで試験を行った。実験箇所の模式図を図6.2に示す。これまでに行った尾去沢鉱山での実験の結果より、直線で60 m以上で通信が可能だということは明らかであったが、今後稼働する坑内掘鉱山で通信実験を行うための予備実験と考え実験を行った。直線だけでなく、矮小空間やシャフトでの通信実験も併せて行ったが、通信が不安定になるほどの距離がスペースの都合上、不可能であった。実際の実験の様子を直線、矮小空間、シャフトそれぞれを図6.3、6.4、6.5に示した。



図6.1 南アフリカ共和国での実験場所

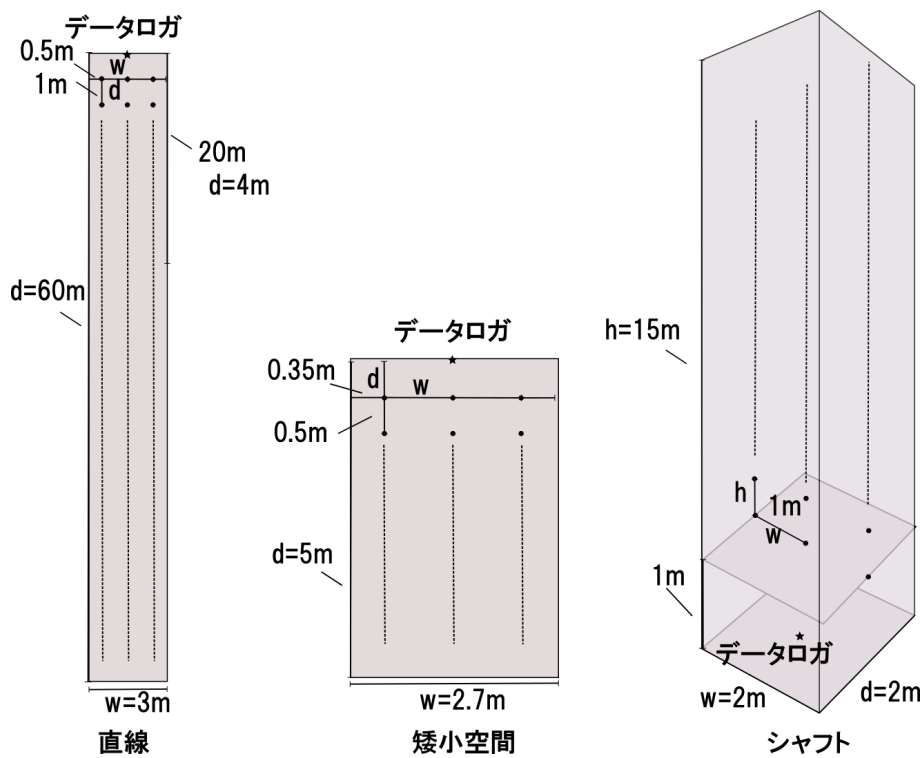


図6.2 実験鉱山の模式図



図6.3 実験鉱山での実験の様子 (直線経路)



図6.4 実験鉱山での実験の様子 (矮小空間)



図6.5 実験鉱山での実験の様子 (シャフト)

6.3.3 Great Noligwa 鉱山での通信試験

最後に、実稼働鉱山での通信実験として図6.1に示した位置にある Great Noligwa 鉱山の70 levelで行った。実際の試験の様子を図6.6に示す。坑道は幅3m、高さ4mのアーチ状で高さ3m程の位置に水道管や電源ケーブルなどがあった。図6.6に示すように、通信試験は坑道の中央の直線で行い、直線距離約1kmの実験箇所であり、坑道の形は大きく変わることがなかった。また、実験時の坑道は乾燥していて、重機や人通りを制限して実験を行うこととした。



図6.6 Great Noligwa 鉱山での実験の様子

6.4 Wi-Fi Direct 通信試験の結果

6.4.1 尾去沢鉱山での通信結果

尾去沢鉱山での RSSI の通信試験の結果を図6.7にまとめた。総じて、データログおよびスマートフォンから距離が離れるにつれて、RSSI の減衰傾向がみられた。データログからスマートフォンはスマートフォン間の通信を比べ、直線と曲がり角で共に RSSI の値が大きく通信しやすい状態ということがわかる。また、尾去沢鉱山での通信速度の通信試験の結果を図6.8にまとめた。通信速度においてもデータログからスマートフォンはスマートフォン間の通信を比べ、直線と曲がり角で共に通信速度が速いという結果だった。

6.4.2 実験鉱山 (Witswatersrand 大学) での通信結果

実験鉱山での RSSI の通信試験の結果を図6.9にまとめた。総じて、データログからの距離が離れるにつれて、RSSI の減衰傾向がみられた。実験鉱山においてはそれぞれの通信実験を行った距離が短く明確な差を実験鉱山とシャフトで見出すことはできなかった。しかしながら、矮小空間は他の二つと比べ、減衰傾向が著しく近距離において RSSI の値が大きく通信しやすい状態であることがわかる。また、実験鉱山での通信速度の通信試験の結果を図6.10にまとめた。通信距離に関しても RSSI の値からもわかるように安定通信範囲内での通信であった。このとき、最低でも10 MB/s程と Wi-Fi Ad Hoc 通信と比べて高速な通信を行えたことがわかる。

6.4.3 Great Nologwa 鉱山での通信試験結果

Great Nologwa 鉱山での RSSI の通信試験の結果を図6.11にまとめた。総じて、データログからの距離が離れるにつれて、RSSI の減衰傾向がみられた。尾去沢鉱山や実験鉱山と比べて坑道が長く通信限界を知るために通信が途絶えるまでの実験を行えた。漏水時とを比べると漏水時の減衰が著しいことがわかる。このことから水分が通信に悪影響を与えることがわかる。また、Great Nologwa 鉱山での通信速度の通信試験の結果を図6.12にまとめた。漏水により RSSI の減衰が大きかったことから通信速度においても著しい減衰がみられた。

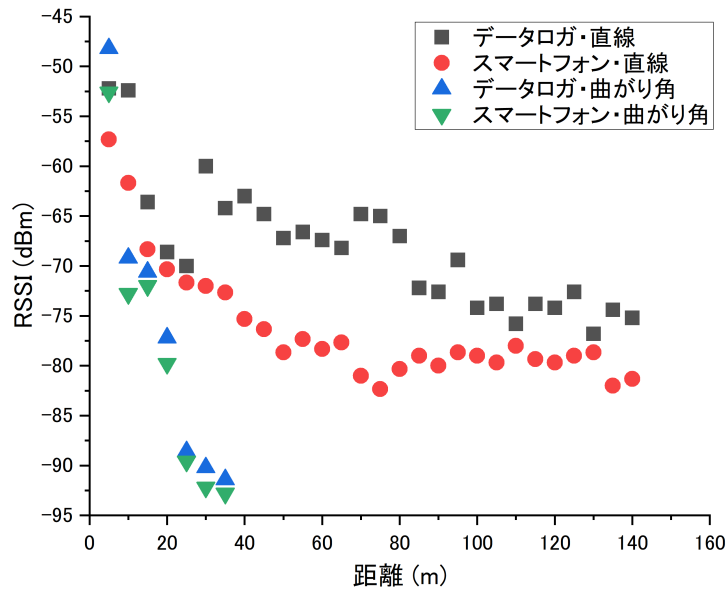


図6.7 RSSI と通信距離の実験結果 (尾去沢鉦山)

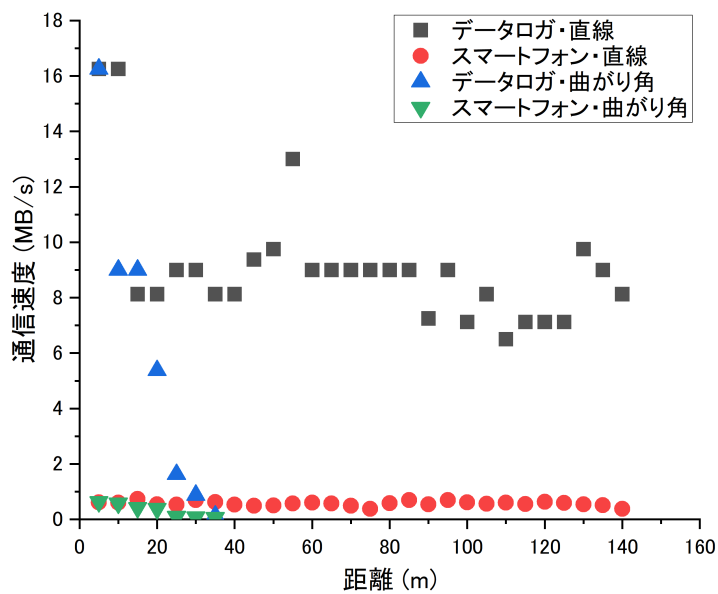


図6.8 通信速度と通信距離の実験結果 (尾去沢鉦山)

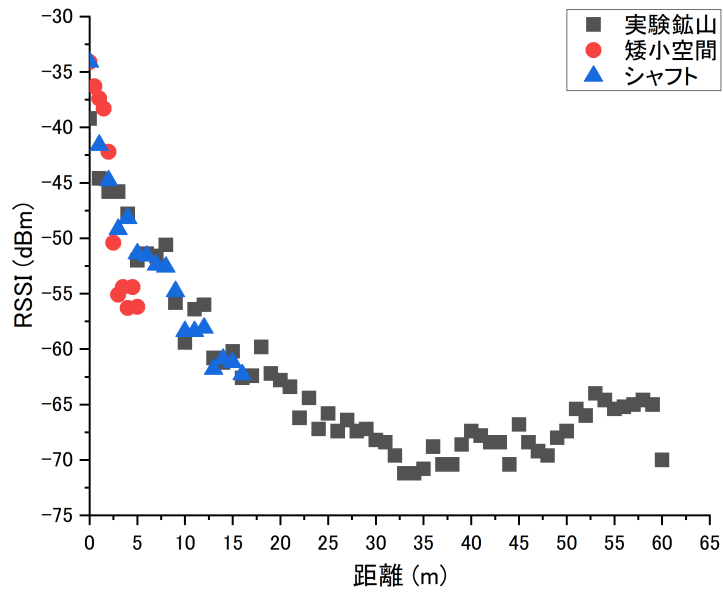


図6.9 RSSI と通信距離の実験結果 (実験鉱山)

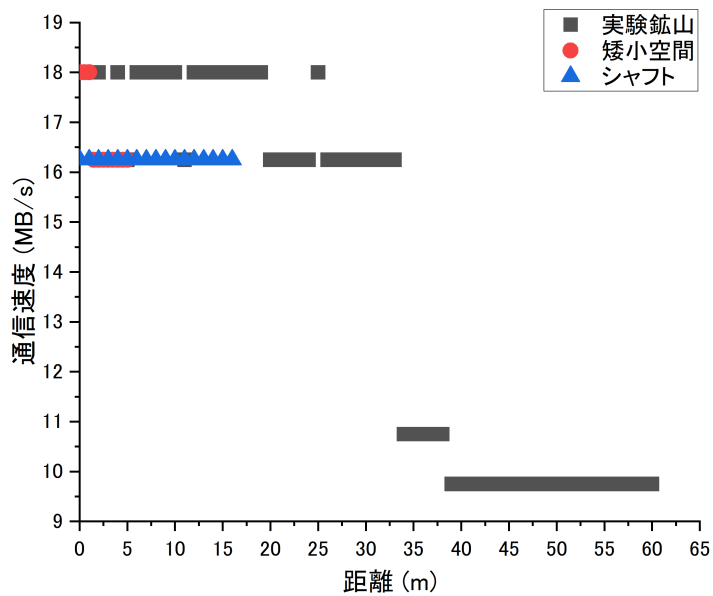


図6.10 通信速度と通信距離の実験結果 (実験鉱山)

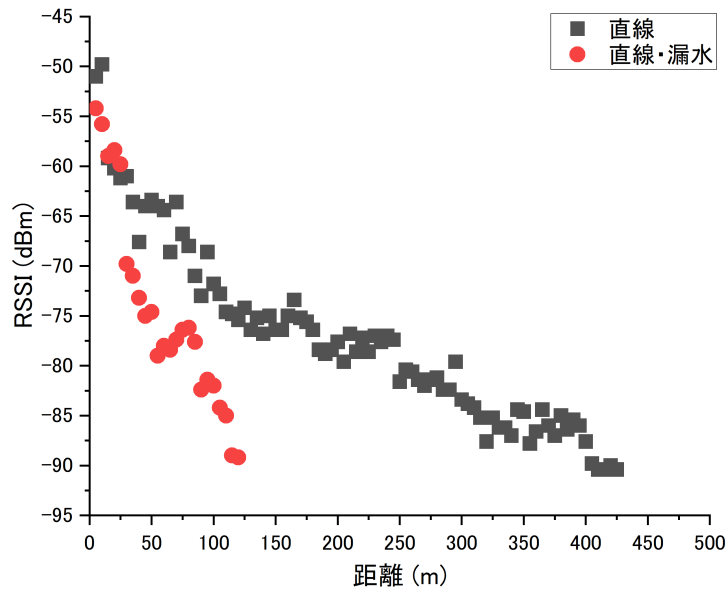


図6.11 RSSI と通信距離の実験結果 (Great Norigwa 鉦山)

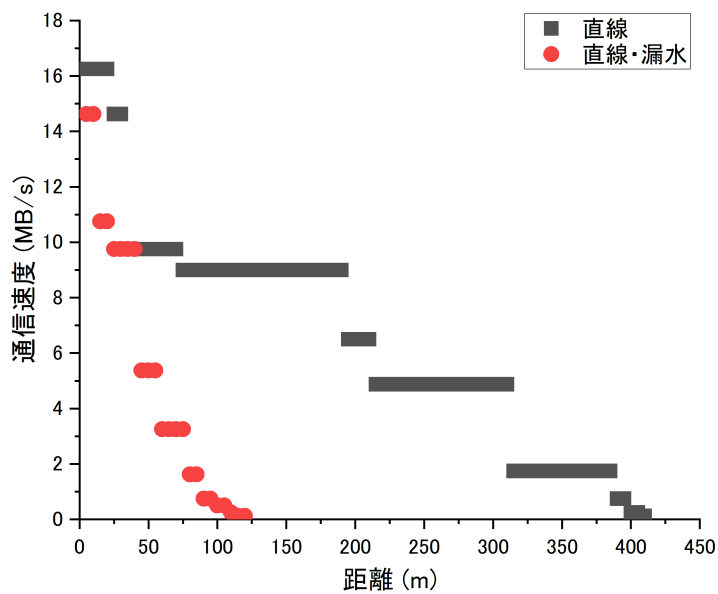


図6.12 通信速度と通信距離の実験結果 (Great Norigwa 鉦山)

6.5 線形回帰による通信性能の評価

6.5.1 尾去沢鉱山での通信結果に関する考察

データログとスマートフォン間の通信

尾去沢鉱山の直線と曲がり角の RSSI の測定結果を図6.13に示す。この図において、直線での通信試験から得られた RSSI が最小のデータは、130 mにおける -76.8 dBmである。その後も測定可能な140 m以内で -80 dBmを下回ることにはなかった。さらに、対数回帰を適用した後、 0.75 の R^2 を有する傾向線が得られた。したがって、傾向線はデータ値の適合度が比較的低いことを示す。この不一致は、不均等な岩壁が波の反射に影響を及ぼした坑内掘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。また、曲がり角での通信試験の場合、図6.13によると、25 mの時に RSSI が -88.6 dBmであった。その後も距離をさらに減少することを示している。同様に、中央値について対数回帰を行い、 0.96 の R^2 を有する傾向線を得た。したがって、傾向線は、この通信試験から得られたデータに適切な適合をした。この傾向線を使用すると、角度のある経路で通信距離が20 m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地点も少なかった図6.16は、通信速度の結果を示している。図6.16より、直線では、速度は5 mで130 Mbpsだったが、RSSI が -80 dBm以上の範囲では60–80 Mbpsの高速度通信が観測された。これらの結果、7.5–10 MB/sまたは60–80 Mbpsを超える速度の伝送成功率を検証することとした。両通信試験の結果は以下の通りである。

全体の結果に基づいて、親機を曲がり角に設置するか、または140 mごとの直線で設置すれば十分であると結論づけられる。しかしながら、実験箇所のスペースの都合上で140 mより長い距離での通信実験を行えず、通信距離の限界を知ることができなかった。この構成は、坑内掘鉱山環境において安定したアドホック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。さらに、RSSI がほぼすべての場所で少なくとも -80 dBmである場合、7.5–10 MB/sまたは60–80 Mbpsの通信速度が可能であることが判明した。また、 -60 dBm以上の時に130 Mbpsで通信が可能だった。つまり、RSSI を測定するだけでおよその通信速度の推測ができるといえる。

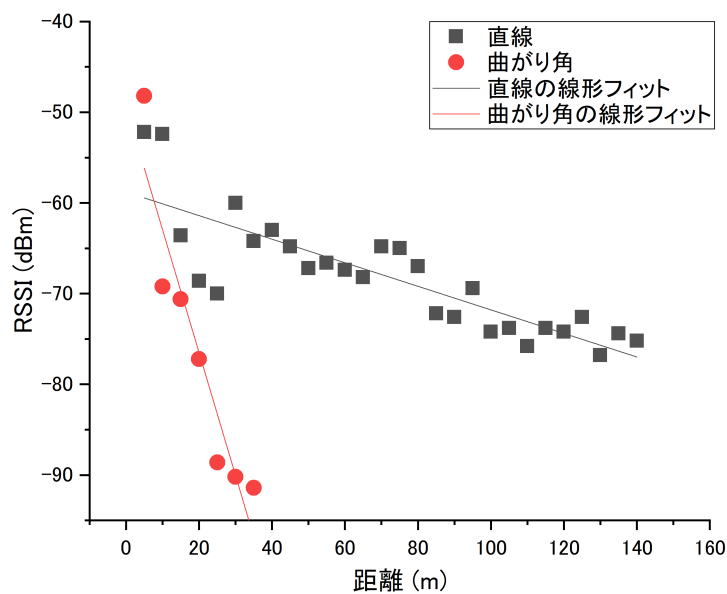


図6.13 尾去沢鉱山 Wi-Fi Direct RSSI 結果

表6.1 RSSI と通信距離の LR データ抜粋 (尾去沢・データログ)

	直線	曲がり角
数式	$y = a + bx$	$y = a + bx$
重み	重み付けなし	重み付けなし
傾き	-0.13	-1.4
切片	-59	-49
残差平方和	3.2E+02	1.6E+02
ピアソンの r	-0.84	-0.94
R 二乗 (COD)	0.71	0.89
補正 R 二乗	0.70	0.87

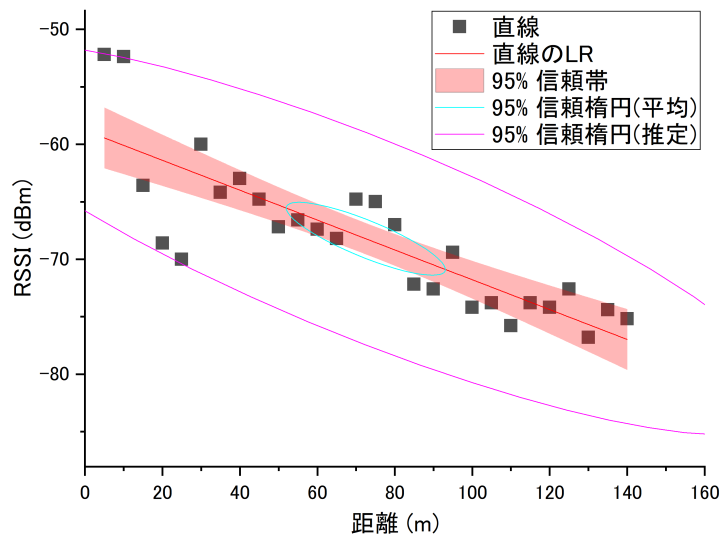


図6.14 LR: RSSI(直線)

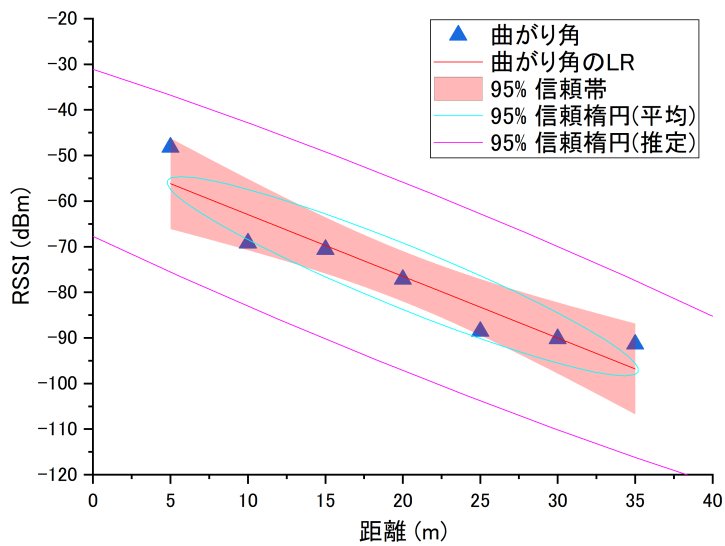


図6.15 LR: RSSI(曲がり角)

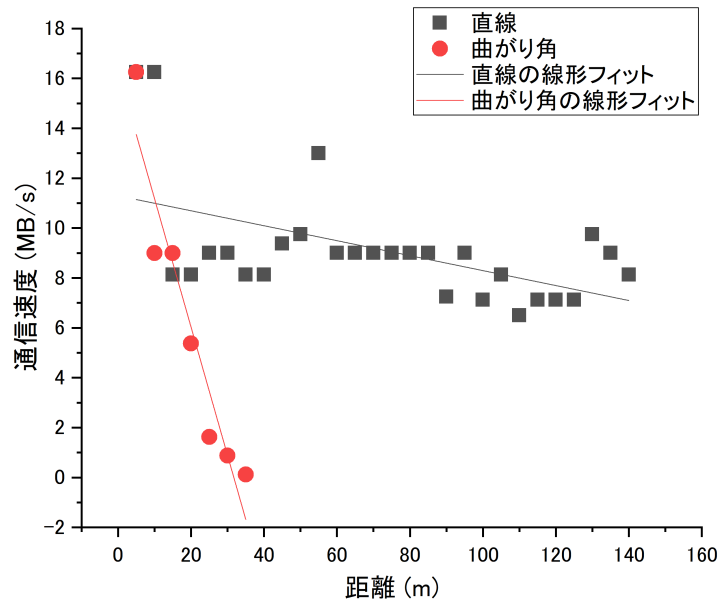


図6.16 尾去沢鉱山 Wi-Fi Direct Throughput 結果

表6.2 通信速度と通信距離の LR データ抜粋 (尾去沢・データログ)

	直線	曲がり角
数式	$y = a + bx$	$y = a + bx$
重み	重み付けなし	重み付けなし
傾き	-0.030	-0.51
切片	11	16
残差平方和	1.1E+02	18
ピアソンの r	-0.52	-0.95
R 二乗 (COD)	0.27	0.91
補正 R 二乗	0.25	0.89

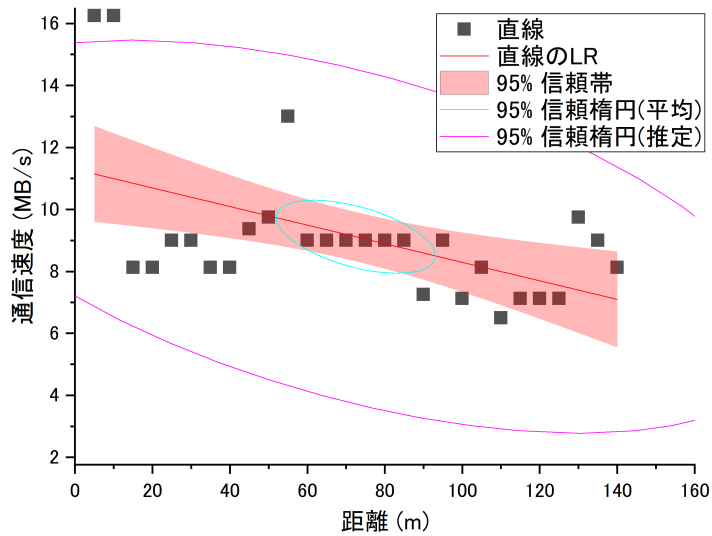


図6.17 LR: 通信速度 (直線)

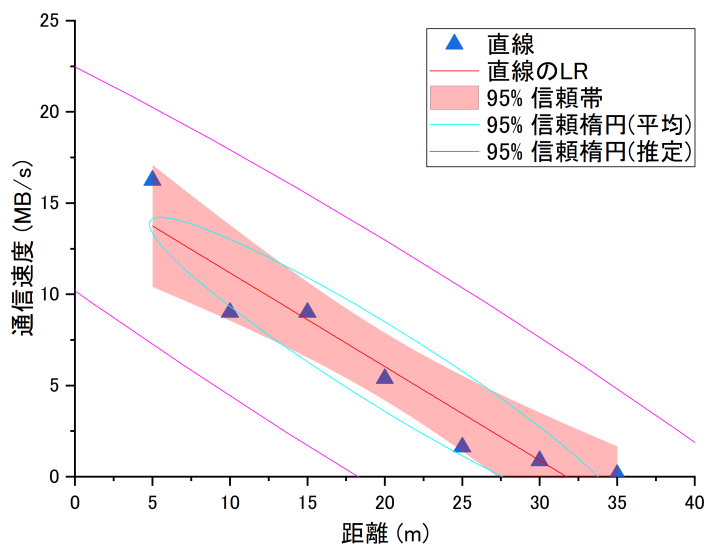


図6.18 LR: 通信速度 (曲がり角)

スマートフォン間の通信

尾去沢鉱山の直線経路と曲がり角の RSSI と距離の結果を図5.23に示し、LR の値を表5.3にまとめた。また、LR の結果を図5.24、5.25にそれぞれ示した。このときに使用した数値および補足資料は付録 A にまとめた。安定した接続のための最小値の基準として、RSSI を -80 dBm と定義した。図6.19では、直線経路の実験で得られたデータは、75 m 地点の RSSI が -81.3 dBm が最も小さく、その後は -80 dBm 付近を示していた。また、LR を行ったところ、 R^2 値が 0.60 で傾きが -0.11 、切片 -68 のトレンドラインが得られた。曲がり角の実験では、図6.19に示すように、20 m の地点での RSSI は -80.6 dBm であり、その地点を超えるとさらに低下する。同様に、中央値に対して LR を行ったところ、 R^2 が 0.94 で傾きが -1.3 、切片 -54 のトレンドラインが得られた。これらの LR の結果から直線と曲がり角の通信距離はそれぞれ 116 m と 21 m であると結論づけた。

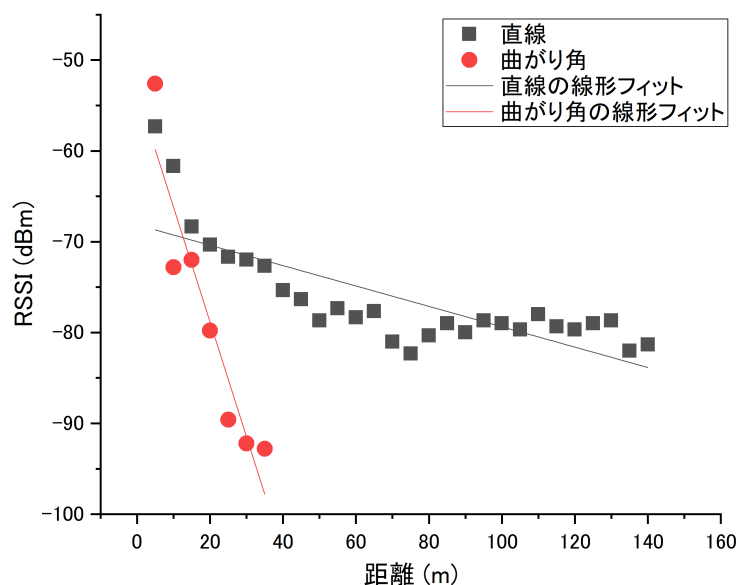


図6.19 尾去沢鉱山 Wi-Fi Direct RSSI 結果スマートフォン間

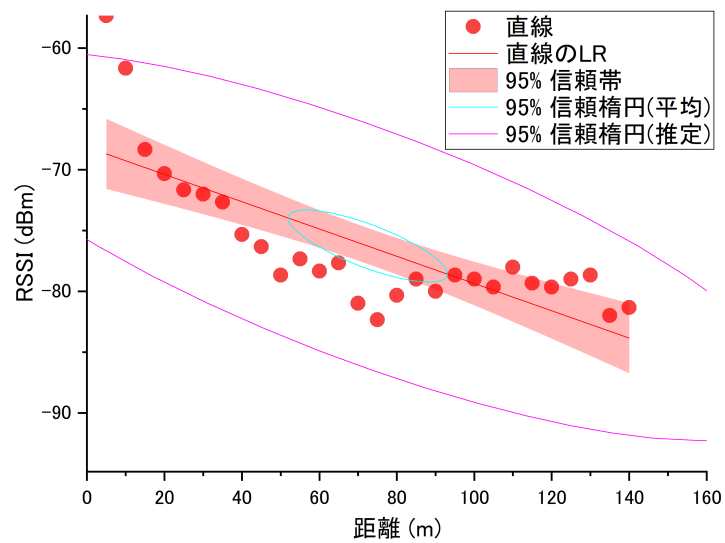


図6.20 LR: RSSI(直線) スマートフォン間

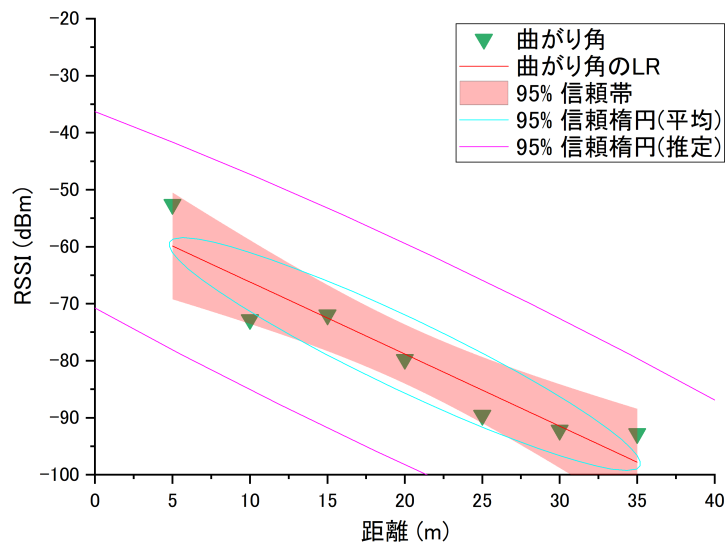


図6.21 LR: RSSI(曲がり角) スマートフォン間

表6.3 RSSI と通信距離の LR データ抜粋 (尾去沢・スマートフォン)

	直線	曲がり角
数式	$y = a + bx$	$y = a + bx$
重み	重み付けなし	重み付けなし
傾き	-0.11	-1.3
切片	-68	-54
残差平方和	3.8E+02	1.4E+02
ピアソンの r	-0.78	-0.94
R 二乗 (COD)	0.60	0.89
補正 R 二乗	0.59	0.86

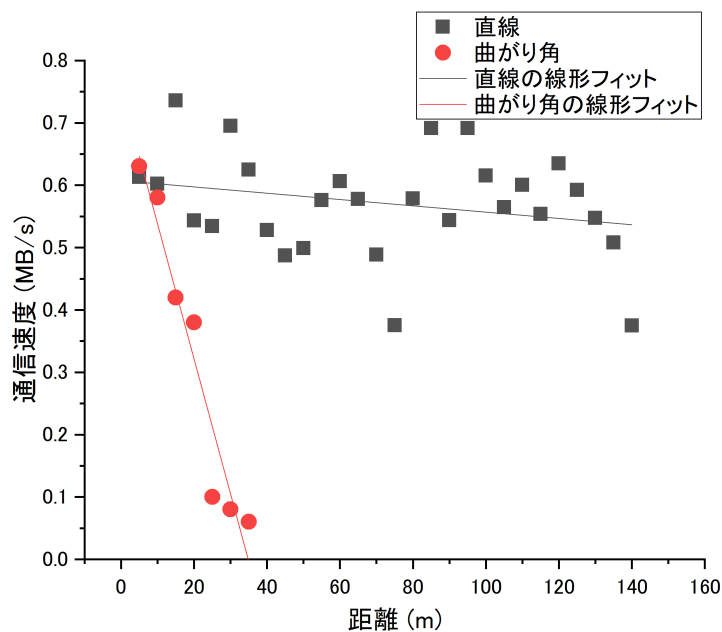


図6.22 尾去沢鉦山 Wi-Fi Direct 通信速度結果スマートフォン間

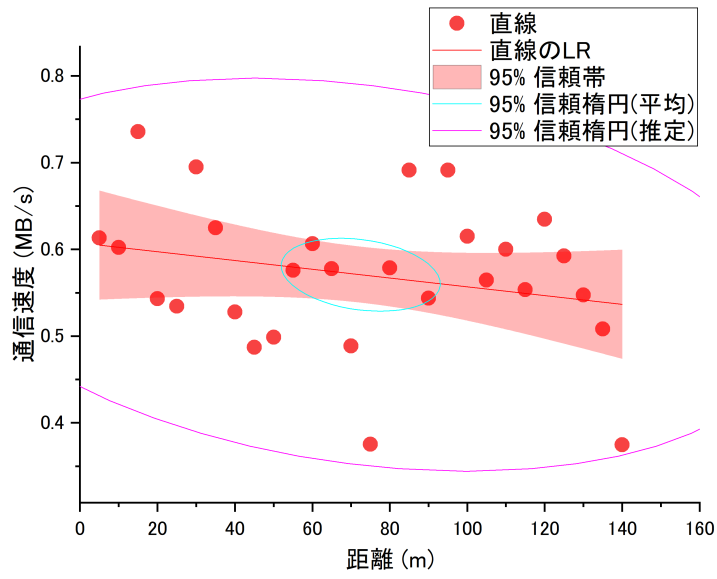


図6.23 LR: 通信速度 (直線) スマートフォン間

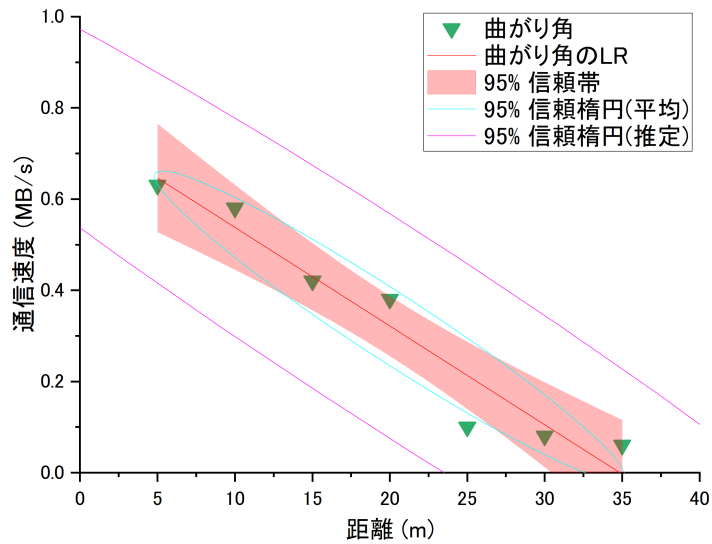


図6.24 LR: 通信速度 (曲がり角) スマートフォン間

表6.4 通信速度と通信距離の LR データ抜粋 (尾去沢・スマートフォン)

	直線	曲がり角
数式	$y = a + bx$	$y = a + bx$
重み	重み付けなし	重み付けなし
傾き	-5.1E-04	-0.022
切片	0.61	0.75
残差平方和	0.18	0.023
ピアソンの r	-0.25	-0.97
R 二乗 (COD)	0.061	0.93
補正 R 二乗	0.025	0.92

6.5.2 実験鉱山 (Witswatersrand 大学) での通信結果に関する考察

このときの実験鉱山の RSSI の測定結果を図6.25に示す。図6.25より、直線では35 mほどで RSSI の最小値を取り、そこから直線の終わりの60 mまで徐々に値が大きくなってきた。行き止まりの壁からくる反射の影響があると考えた。また、ストープの電波減衰の傾向は直線とシャフトと比べると減衰が大きかった。最後にシャフトは壁からの距離が直線とほぼ同じであるが、材質は違うという状況にもかかわらず、直線の減衰傾向に近い値を取った。直線の通信試験を坑道中心から左右1.25 m離れた壁際でも行い、その通信結果をヒートマップにし、図6.27に示した。図6.27より、60 mの直線ではすべての場所で安定した通信が可能であったことが分かる。また壁際は電波の通りが悪いことや、行き止まりの壁からの反射による RSSI の上昇も見られた。同様に矮小空間とシャフトでも図6.29、6.31に通信結果をヒートマップで示した。

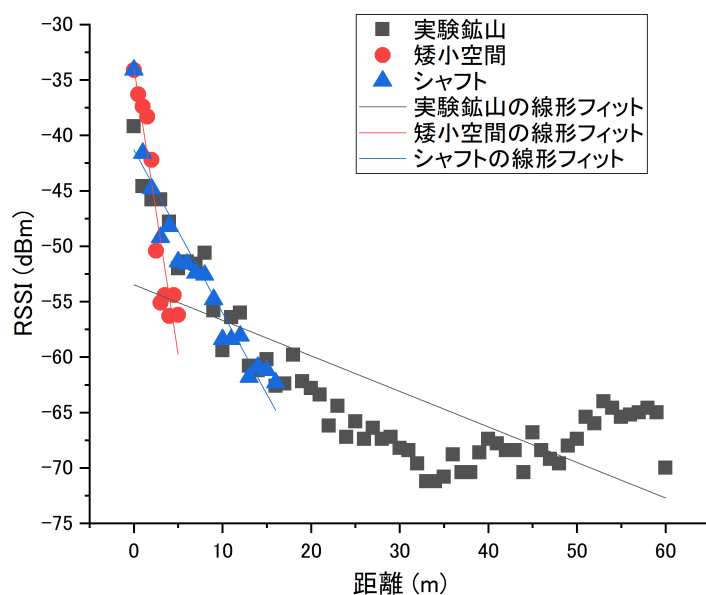


図6.25 実験鉱山での RSSI 測定結果

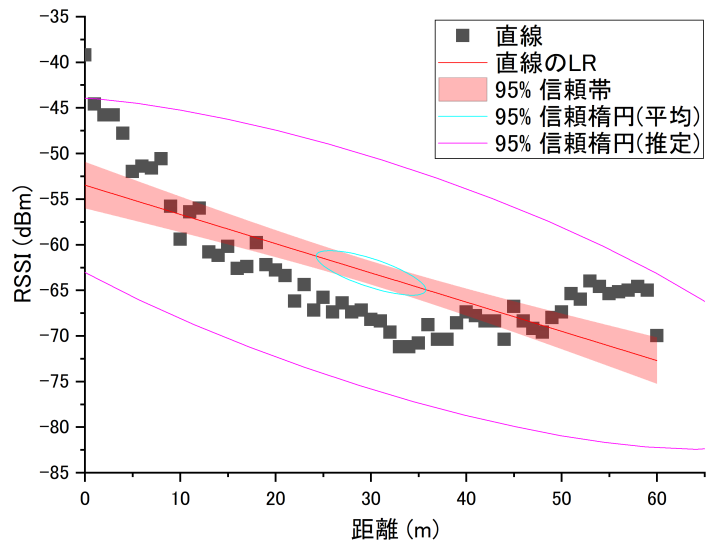


図6.26 LR: RSSI(直線・実験鉦山)

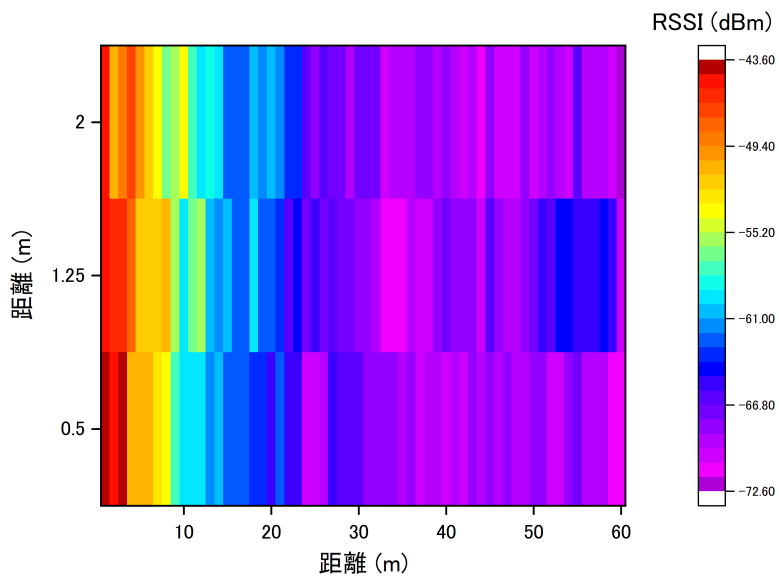


図6.27 実験鉦山での通信結果のヒートマップ (直線)

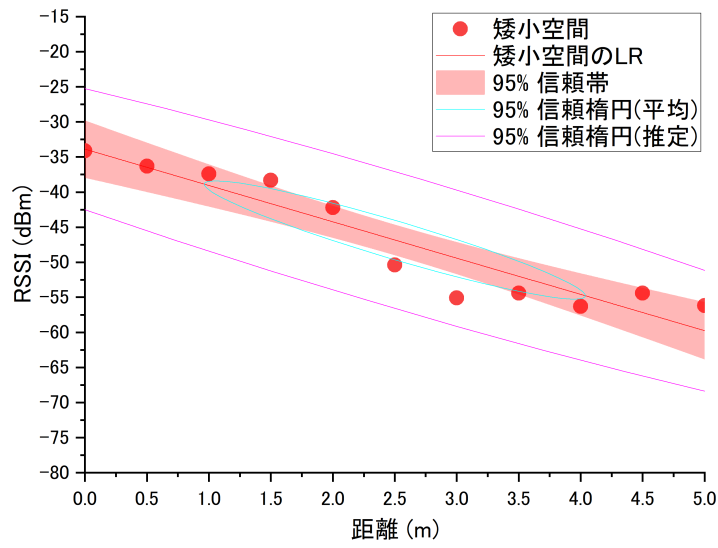


図6.28 LR: RSSI(矮小空間・実験鉦山)

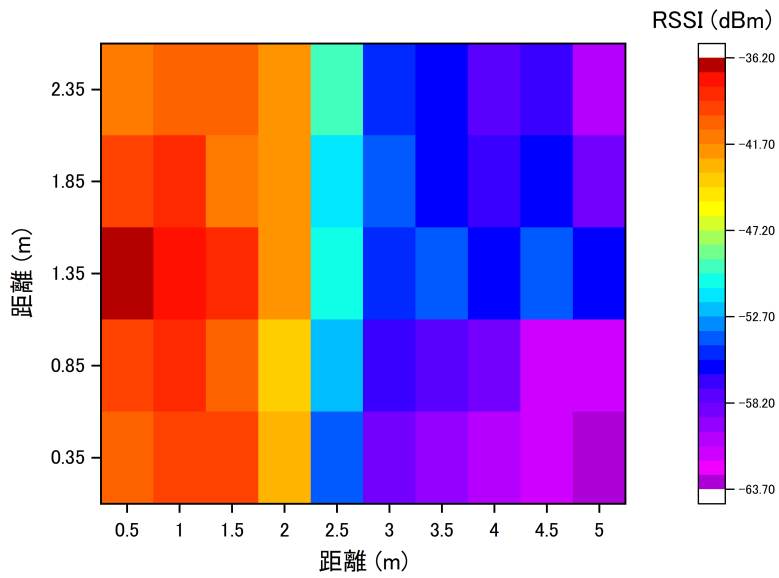


図6.29 実験鉦山での通信結果のヒートマップ (矮小空間)

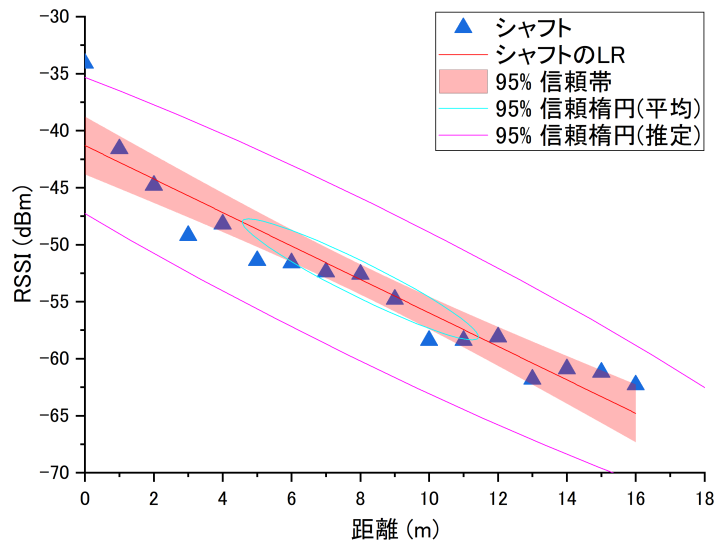


図6.30 LR: RSSI(シャフト・実験鉱山)

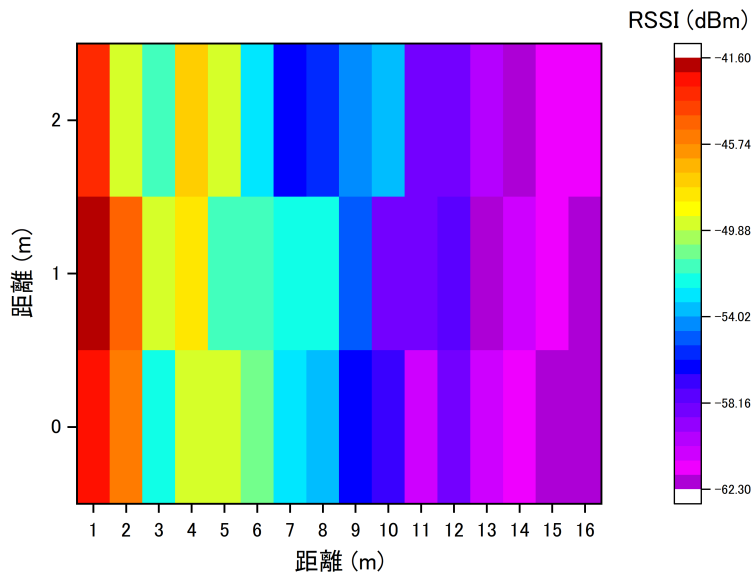


図6.31 実験鉱山での通信結果のヒートマップ (シャフト)

表6.5 RSSI と通信距離の LR データ抜粋 (実験鉱山・データログ)

	直線	矮小空間	シャフト
数式	$y = a + bx$	$y = a + bx$	$y = a + bx$
重み	重み付けなし	重み付けなし	重み付けなし
傾き	-0.32	-5.2	-1.5
切片	-53	-34	-41
残差平方和	1.5E+03	92	99
ピアソンの r	-0.75	-0.94	-0.95
R 二乗 (COD)	0.56	0.89	0.90
補正 R 二乗	0.56	0.88	0.89

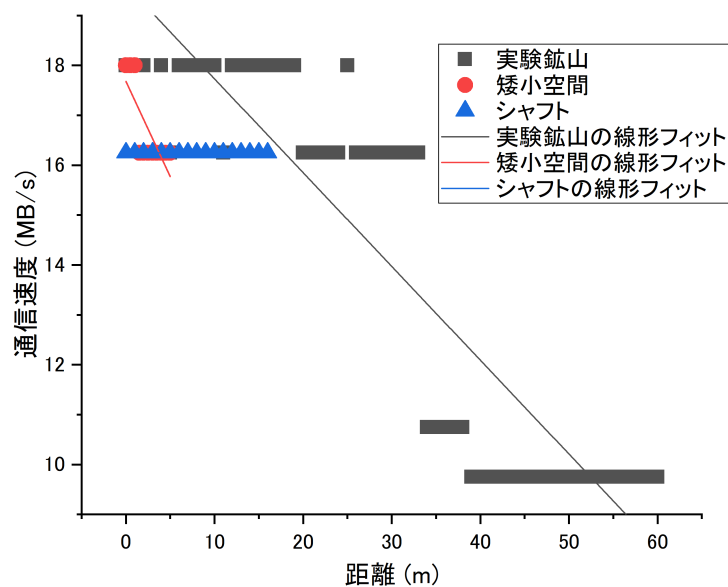


図6.32 実験鉱山での通信速度測定結果

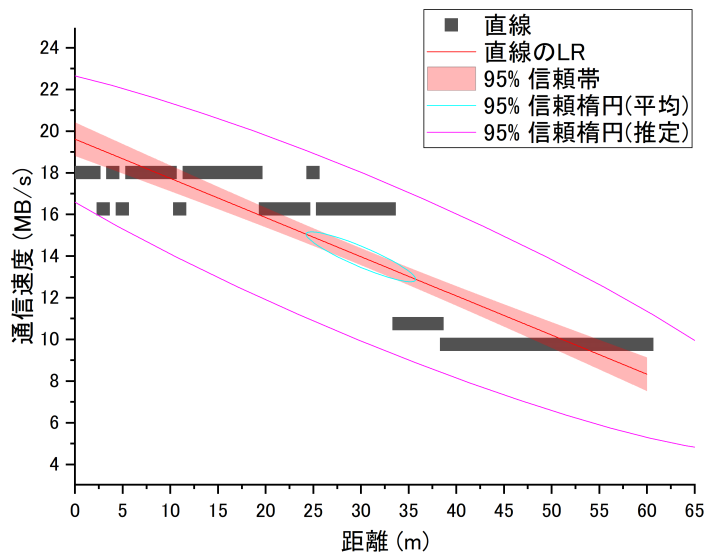


図6.33 LR: 通信速度 (直線・実験鉦山)

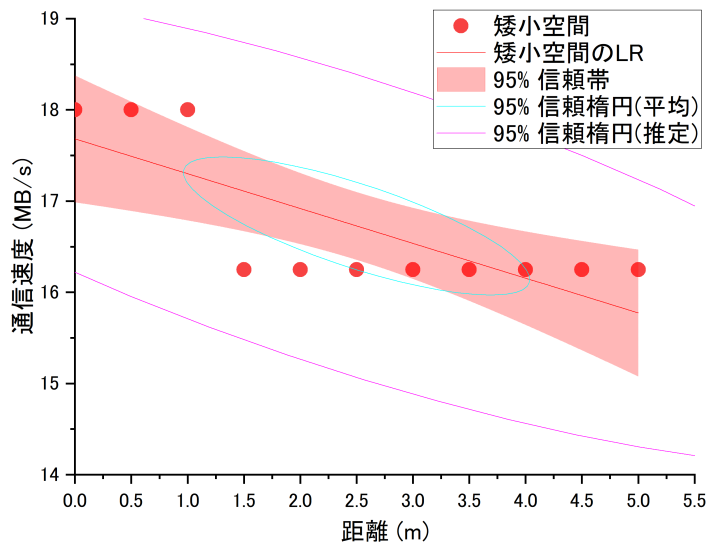


図6.34 LR: 通信速度 (矮小空間・実験鉦山)

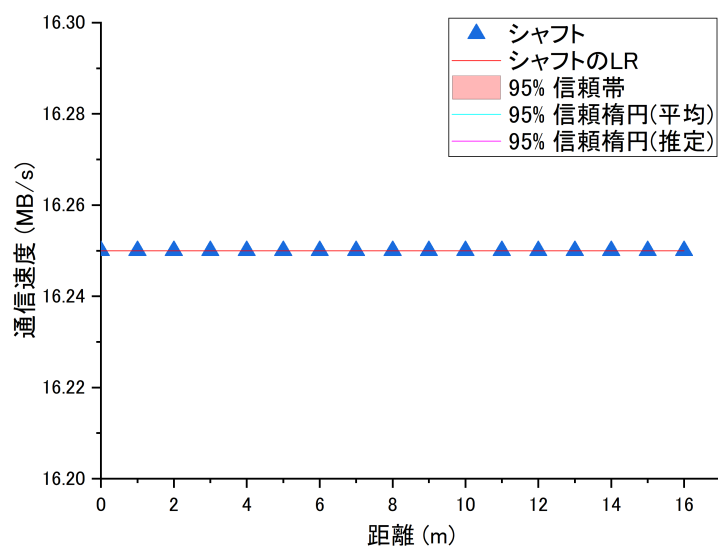


図6.35 LR: 通信速度 (シャフト・実験鉱山)

表6.6 通信速度と通信距離の LR データ抜粋 (実験鉱山・データログ)

	直線	矮小空間	シャフト
数式	$y = a + bx$	$y = a + bx$	$y = a + bx$
重み	重み付けなし	重み付けなし	重み付けなし
傾き	-0.19	-0.38	-2.9E-16
切片	20	18	16
残差平方和	1.5E+02	2.7	1.7E-28
ピアソンの r	-0.90	-0.77	—
R 二乗 (COD)	0.82	0.60	—
補正 R 二乗	0.81	0.56	—

6.5.3 Great Noligwa 鉱山での通信試験結果に関する考察

この時の RSSI の測定結果を図6.36に示した。比較対象として図6.36にも示した尾去沢鉱山での Wi-Fi ダイレクトの通信結果を併せることとした。また、Great Noligwa 鉱山では尾去沢鉱山よりも坑道が広く、乾燥していたといえる。図6.36より、Great Noligwa 鉱山の方が対数回帰の近似性は高く、250 mで初めて -80 dBmを下回る -81.6 dBmを記録した。近似された曲線から通信距離は245 mということが分かった。この時の通信速度は RSSI が -80 dBm以上である場合、 7.5 – 10 MB/sまたは 60 – 80 Mbpsの通信が可能であることが判明した。

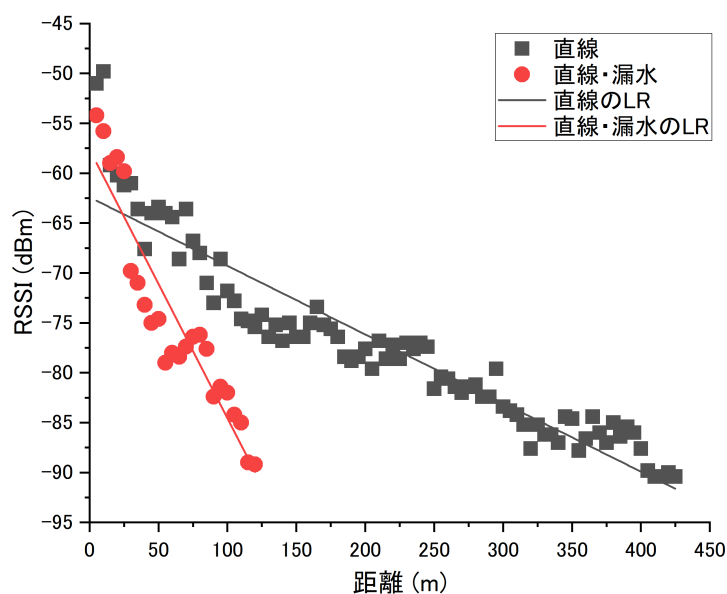


図6.36 Great Noligwa 鉱山での通信結果 RSSI

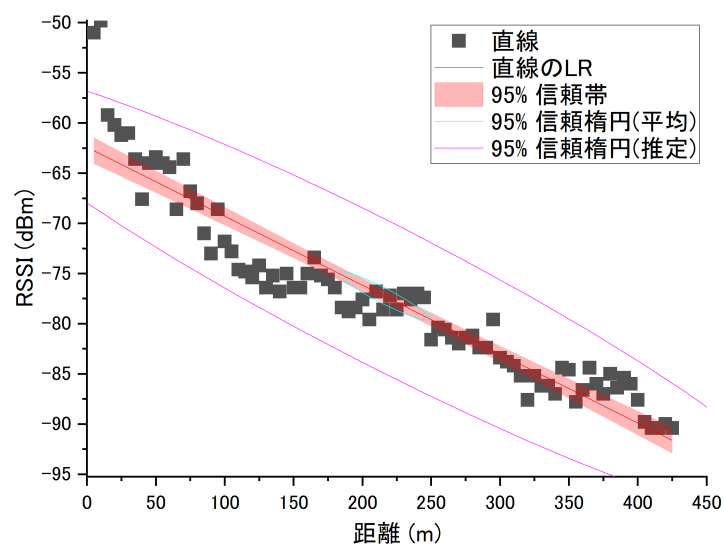


図6.37 LR: RSSI(直線・Great Nologwa 鉱山)

表6.7 RSSI と通信距離の LR データ抜粋 (Great Nologwa 鉱山・データログ)

	直線	直線・漏水
数式	$y = a + bx$	$y = a + bx$
重み	重み付けなし	重み付けなし
傾き	-0.069	-0.27
切片	-62	-58
残差平方和	7.9E+02	3.0E+02
ピアソンの r	-0.94	-0.94
R 二乗 (COD)	0.88	0.87
補正 R 二乗	0.88	0.87

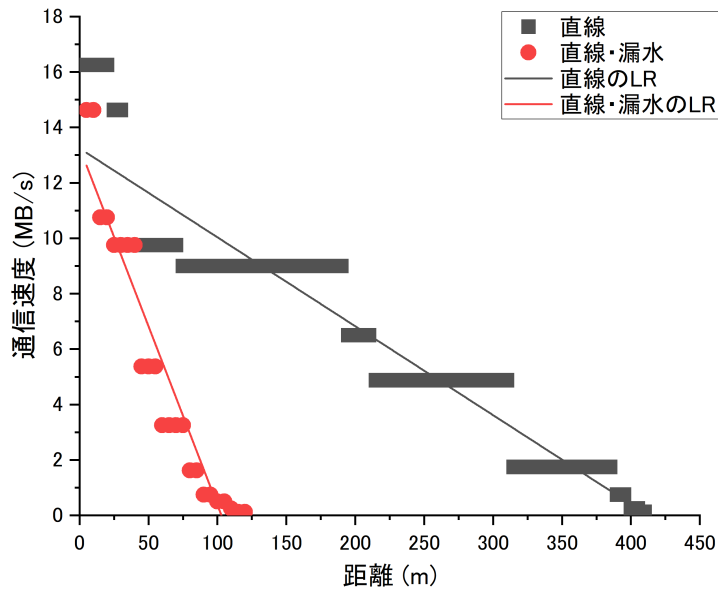


図6.38 Great Nologwa 鉱山での通信結果通信速度

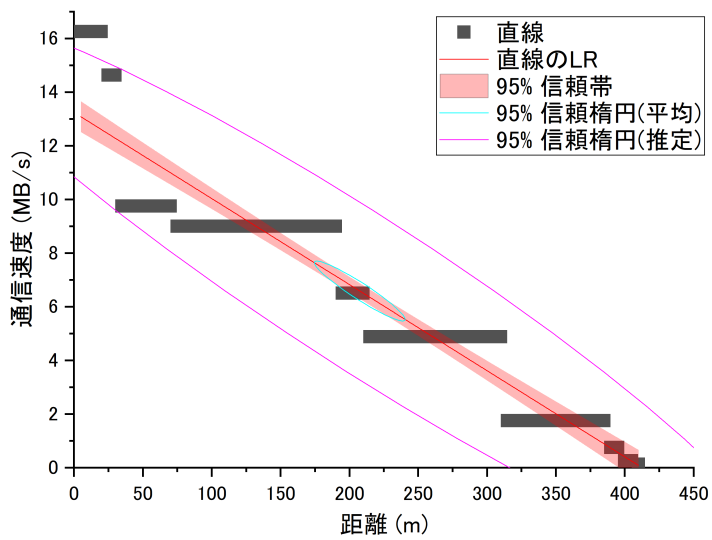


図6.39 LR: 通信速度 (直線・Great Nologwa 鉱山)

表6.8 通信速度と通信距離の LR データ抜粋 (Great Norigwa 鉱山・データログ)

	直線	直線・漏水
数式	$y = a + bx$	$y = a + bx$
重み	重み付けなし	重み付けなし
傾き	-0.032	-0.13
切片	13	13
残差平方和	1.4E+02	45
ピアソンの r	-0.95	-0.96
R 二乗 (COD)	0.89	0.91
補正 R 二乗	0.89	0.91

6.6 まとめ

アドホック通信の中でも第6章では、Wi-Fi Direct 通信システムを採用し、その通信性能を通信実験により評価することでモニタリングシステムとしての導入を検討をした。Wi-Fi Direct は、尾去沢鉱山、実験鉱山、Great Noligwa 鉱山の3地点で実験を行った。尾去沢鉱山の結果から直線で通信距離が140 m以上であることが分かった。坑道の長さの都合上で140 mが実験可能な長さの最大であった。また、実験鉱山では坑道の中心だけではなく壁際でも実験を行った。そして、Great Noligwa 鉱山の直線でも通信実験を行い、通信性能を評価した。この坑道は直線で1 kmであることから尾去沢鉱山の坑道では測れなかった通信距離の限界を知ることができた。これらの結果から、Wi-Fi Direct は Wi-Fi Ad Hoc に比べ、通信性能が向上し坑内掘鉱山の情報化に適していると考えられる。しかしながら、坑内経路の分岐点や曲がり角は、電波の伝わり方やシステムの有効性に大きな影響を与える。その結果、センサユニットと Wi-Fi Direct の組み合わせにより、低コストで岩盤を監視することが可能であることがわかった。このような岩盤モニタリングシステムを用いることで、中長期的な岩盤の変形を定量的に把握することが可能となり、鉱山の安全性向上につながることを期待される。

第7章 電力線通信と Wi-Fi Direct を用いた複合通信システム

7.1 電力線通信

第7章では、DF(Decode-and-Forward) 電力線と Wi-Fi のハイブリッドリンクによる通信システムを提案する。データログから鉱山従事者のスマートフォンへのデータ転送には、スマートフォン間の通信を可能にする Wi-Fi Direct を使用する。障害物や曲がり角がある地下の鉱山では無線信号の減衰が大きいため、Wi-Fi モジュールを電力線通信 (Power Line Communications:PLC) システムにリンクさせ、電波の減衰を抑えながら障害物や曲がり角を移動できるようにしている。この提案されたハイブリッドデザインは、秋田県にある閉鎖された坑内掘鉱山である尾去沢鉱山で通信試験を行った。尾去沢鉱山では、RSSI と通信速度を測定することで、ハイブリッドシステムを評価した。さらに、提案したシステムのコストを見積もって、近年で最も一般的な通信システムである Leakey Feeder と比較した。PLC は、電気エネルギーを供給する電力線に高周波の通信用信号を重畳して伝送させることにより、電力線を通信ケーブルとしても使用する技術のことである。PLC では、通信用と電源用に電力線を共用する。電源用として交流電力50 Hzを供給する目的で使用されている電力線に、2–30 MHzの周波数の高周波搬送波信号を重畳させることによって高速通信用信号伝送を実現している。PLC システムの構築は使用したい機器に PLC プラグを接続し、コンセントに差し込むだけで完了する。PLC プラグが電力線に重畳されている情報信号だけを取り出して機器に渡すことによって、電力線がネットワークとして機能するようになる。

既存の電力線を信号伝送路として利用するため、屋内配線の利用に限定されるとはいえ、端末を PLC モデム経由でコンセントに接続すればネットワークへつなげることができる。したがって、新たに通信線を敷設するための工事費を必要としない。工場や、ビル、一般家庭など、我々が生活するあらゆる環境においては電力線の存在しないスペースを探す方が難しいことから、コンセントさえあればどこからでもネットワークにつなげることができる。無線 LAN と比べても、約 4 倍近い実効通信速度の

優位性や電波が届かないなどの心配がなく、システムの安定性などのメリットが考えられる。

7.2 電力線通信試験の概要

第7章で提案するデータ転送システムは、Wi-Fi Direct をメインの通信方式としている。さらに、準リアルタイムで伝送範囲を拡大するために PLC を使用している。データを地上に届けるためには、複雑で拡大し続ける地下の鉱山に対応できる通信システムが必要となる。選定された Wi-Fi Direct は、Wi-Fi Ad Hoc の長所を継承しつつ [52, 53]、問題視されていた煩雑な設定やセキュリティ面を改善した通信規格とされている。また、PLC は鉱山にもともと設置されている電力線を利用して、照明や重機、センサやデータログに電力を供給することができる。Wi-Fi Direct は、無線ノードとモバイル機器間のデータホップを可能にするが、データログの充電に使われている PLC ラインを利用すれば、距離、曲がり角、壁などの理由で Wi-Fi Direct ではアクセスできない無線ノードにデータを送ることができる。さらには、地表から地下の無線ノードにデータを送り、そこからモバイル機器に情報をホップすることもできる。また、PLC と Wi-Fi Direct を組み合わせて、地下から地上の制御室などにデータを送信すれば、クラウドを介して鉱山の事務所や遠隔地でデータを分析することができる。

提案する複合通信システムの全体的な流れを図7.1に示す。入力データは各坑内掘鉱山の要件に合わせて調整される。第7章では、一例として一般的に重要とされている温度、湿度、煙検知などの環境データと、鉱山従事者の移動軌跡を入力データとして用いる。入力データは、提案した通信システムを介して地表に送信され、さらにクラウド上で利用できるようにする。提案するデータ転送システムの設計を図7.2に示すように、地下の鉱山内に設置されたデータログが環境データを感知してデータを蓄積し、近隣の鉱山従事者が所有するスマートフォンにデータを転送できるようにする。電力線に接続されたデータログは、同一ネットワーク上にある無線ノードと自動的にネットワークを形成し、無線ノードとデータを共有することができる。そのデータは、Wi-Fi Direct を使って鉱山従事者の携帯電話に送信することができる。これにより、通信インフラを追加することなく、データログの通信範囲を鉱山内の障害物を越えて拡大させる。

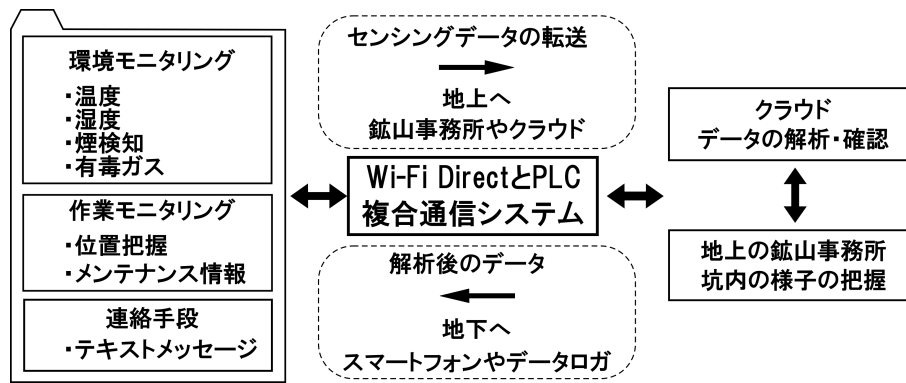


図7.1 Wi-Fi Direct と PLC 複合通信システムの全体的な流れ

Wi-Fi Direct と PLC を用いた通信システムを提案するためには、地下の鉱山における電波の減衰傾向を調査する必要がある。実証実験は、日本の秋田県にある閉鎖された尾去沢鉱山で行い、Wi-Fi Ad Hoc の通信性能も調べた [52, 53]。尾去沢鉱山は、かつて銅山として栄えた鉱山で、現在は安全な坑内掘鉱山体験を求めて多くの観光客や学習者が訪れている。実験を行った尾去沢鉱山の位置を図5.8に示す。図7.3と図7.4は実験場所とセットアップおよび実験レイアウトを示している。これらの実験装置を用いて、提案するデータ転送システムで使用する Wi-Fi Direct と PLC の性能を評価した。本研究で使用した通信規格の一覧を表7.1に示す。

鉱山の坑道は、高さ約2m、幅約2mのアーチ状の天井を持ち、周囲の岩盤が露出しており、坑内の湿度は90%に達している。鉱山は閉鎖されており、現役で使用されている鉱山機械はないため、電力線から電力を供給される機器は、音響、照明、人形などの展示に使用されるものである。データロガは、Raspberry Pi3(図7.7)を選定した。また、GW-300S KATANA モジュールを使用し、IEEE802.11a/ac/b/g/n 規格に対応している。具体的には、モジュールの出力電圧を最大化するために、IEEE802.11n 規格を用いて実験を行った。実験に使用したスマートフォンは、IEEE802.11a/ac/b/g/n に対応した「Galaxy s7 Edge」の2台を用いた。電力線通信に使用した PLC プラグは「DHP-208AV」である。

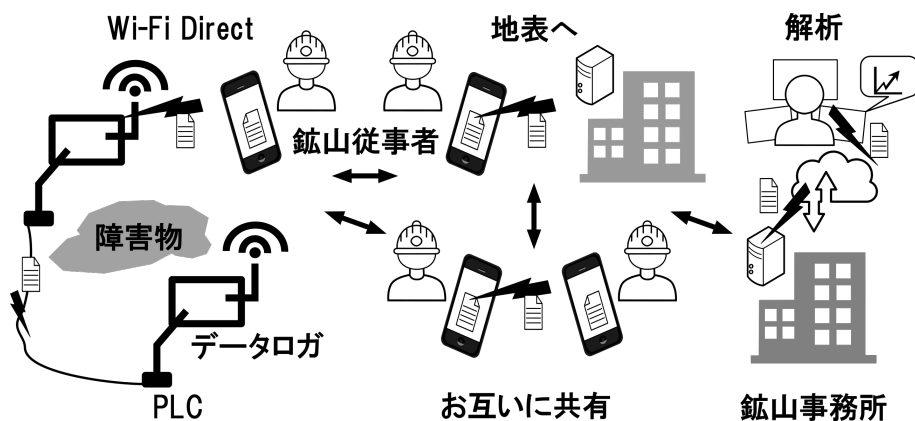


図7.2 Wi-Fi Direct と PLC 複合通信システムのデータ転送システムの設計

表7.1 複合通信システムの内訳

通信規格	通信機器
Wi-Fi Direct	データログとスマートフォン間
Wi-Fi Direct	スマートフォン同士
PLC	データログ同士



図7.3 Wi-Fi Direct での通信の様子

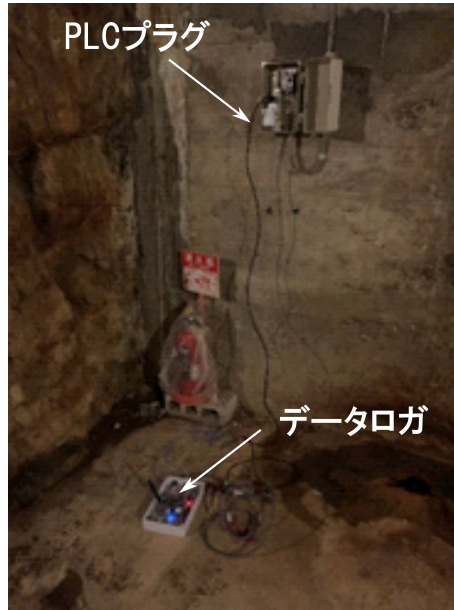


図7.4 PLC での通信の通信の様子

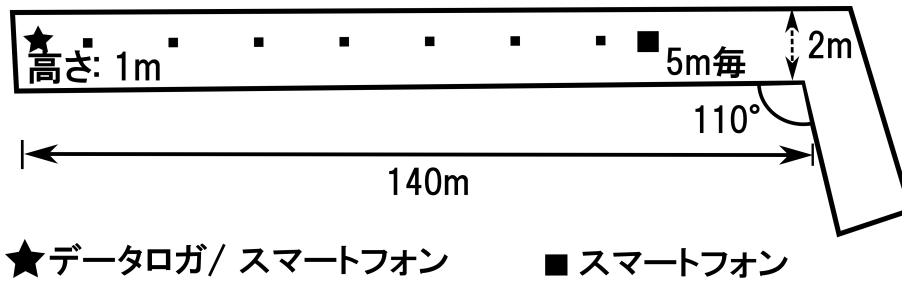


図7.5 Wi-Fi Direct の実験箇所

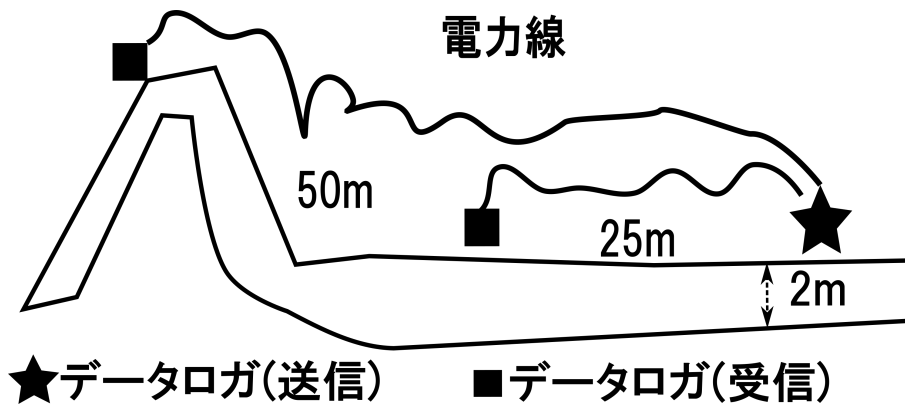


図7.6 PLC の実験箇所



図7.7 使用した機材

7.3 電力線通信試験および Wi-Fi direct の結果

7.3.1 Wi-Fi Direct の通信試験結果

データログからスマートフォン

図6.13は、尾去沢鉱山の直線と曲がり角での RSSI の結果である。RSSI は、安定した接続のための最小値として -80 dBmと定義されている [34]。合わせて、Wi-Fi Ad Hoc の RSSI の結果を示している。この図では、直線で得られたデータから最も遠い140 m地点での RSSI が -75.2 dBmとなり、安定した通信の基準よりも大きくなっている。距離が長くなるにつれて減少傾向にあるが、一部の地点では上昇の変動も見られる。この変動は、坑内掘鉱山の性質上、岩壁の凹凸が波の反射に影響している可能性がある。したがって、このような状況では、自由空間での伝搬損失は適切な見積もりにならない可能性がある。図6.13より、本システムの通信距離は直線経路で140 mであると結論付けた。この結果は、Wi-Fi Ad Hoc の結果である直線110 mよりも通信距離が長いことを示している。図6.13に示すように、25 m地点の RSSI は、曲がり角での実験では -88.6 dBmであり、それ以降はさらに低下している。この図から、曲がり角での通信範囲は20 mであると判断できる。これは、Wi-Fi Ad Hoc の結果である15 mと比較して、通信範囲が広いことを示している。

図6.16は、通信速度の結果を示しており、以下のようにまとめることができる。直線では、平均9.1 MB/sの高速な通信速度が観測された。曲がり角では、平均5.0 MB/sの通信速度が観測されたが、 -80 dBm以下でも通信可能な 25–35 mでは、0.1–1.6 MB/sの通信速度が観測された。曲がり角では、平均通信速度は5.0 MB/sだったが、 -80 dBm以下でも通信が可能な 25–35 mでは、0.1–1.6 MB/sであることがわかった。この結果は、同じ場所で行われた Wi-Fi Ad Hoc 通信に関する先行研究の結果と同様の傾向を示している。この結果から、通信速度と RSSI の不一致は、坑内掘鉱山の性質上、凹凸のある岩壁が波の反射に影響を与えている可能性があることがわかった [53]。このことから、通信が安定していなかったことがわかる。

スマートフォンからスマートフォン

図6.19は、スマートフォン同士で行った尾去沢鉱山の直線と曲がり角の RSSI の結果である。この図では、直線の場合、130 m地点の RSSI 値は -82.0 dBmとなり、安定した通信ができる基準 (-80 dBm) を下回っている。図6.13と同様に、距離が長くなるにつれて減少傾向にあるが、一部のポイントでは上昇した変動も見られる。通信距離は直線距離で130 mとした。曲がり角での実験では、25 mで RSSI 値が -89.6 dBmとなり、それ以上になるとさらに減少している。この図から、曲がり角での通信範囲は20 mであると判断できる。

図6.22は、通信速度の結果を示しており、以下のようにまとめることができる。直線では、平均して5.7 MB/sの高速通信が観測された。曲がり角では、平均して5.5 MB/sの通信速度が観測されたが、 -80 dBm以下でも通信が可能な 25–35 mでは、1.1–4.3 MB/sの通信速度が観測された。折り返し地点では、平均通信速度は5.5 MB/sだが、 -80 dBm以下で通信が可能な 25–35 m地点では、1.1–4.3 MB/sであることがわかった。このように通信速度と RSSI が一致しないのは、坑内掘鉱山という性質上、岩壁の凹凸が波の反射に影響を与えている可能性がある [52, 53]。このことから、通信が安定していなかったことがわかる。

データログからスマートフォン、スマートフォンからスマートフォンの間で結果を比較した。安定した通信範囲では、データログからスマートフォンは、スマートフォンからスマートフォンの間よりも速い9.1 MB/sの通信速度を示している。一方、不安定な通信範囲 (-80 dBm未満) では、スマートフォンからスマートフォンへの通信は、データログからスマートフォンへの通信よりも速い 1.1–4.3 MB/sの通信速度となっている。

7.3.2 電力線通信性能調査の結果

図7.8、7.9は、電力線通信の通信速度の調査結果である。この図から、25 m地点の変動幅が50 m地点の変動幅よりも小さいことがわかる。平均値と値は7.4 MB/sで、50 m地点の平均値6.2 MB/sよりも速いことがわかる。有線通信のため、通信速度も距離の変化の影響を受けにくい。

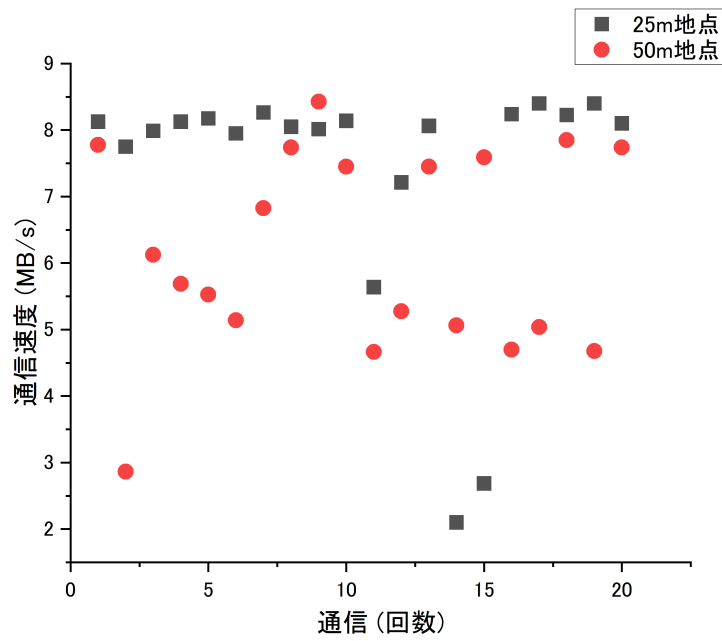


図7.8 尾去沢鉦山での PLC 通信実験結果

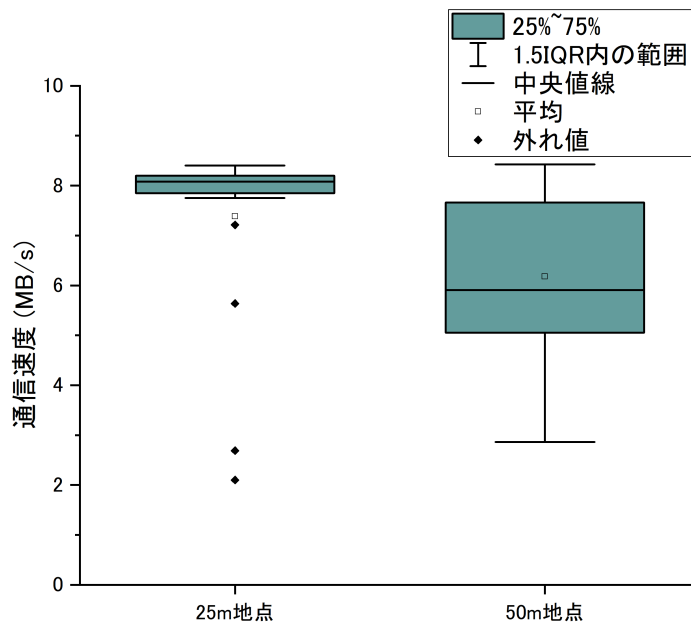


図7.9 尾去沢鉦山での PLC 通信実験結果 (箱ひげ図)

7.3.3 複合通信システムの検討

データログからスマートフォンへの通信を考慮した実験結果から、基地局を各曲がり角または直線経路で140 mごとに設置することが提案されている。この構成は、坑内掘鉱山で安定した Wi-Fi アドホックネットワークを構築するのに適している。また、RSSI が -80 dBm以上であれば、ほとんどの場所で 9.1 MB/sの速度で通信することができる。これは、 1 MB程度の画像ファイルやセンシングデータ (テキストファイル) を坑内掘鉱山内で高速かつ安定的に転送するのに十分な転送データ量を式5.10、5.11より求めた。

Haul road inspection handbook[57]によると、制限速度は、道路のレイアウト、状態、道路を使用する機器の能力に基づいて設定する必要がある。道路の曲率や車両のサイズに応じて、露天掘鉱山では、制限速度は $32-48$ km/hの間となる。一方、露天掘鉱山とは違い、坑内掘鉱山の現場では、道路が狭く、はるかに制限された操縦が必要であるため、制限速度は 32 km/h以下となっている。今回の調査では、移動する機器や人の最高速度を 20 km/hとした。スマートフォンを持っている鉱山従事者は、速度が遅いほど通信量が多くなる。データログと鉱山従事者のスマートフォンが距離を縮めると、すぐにデータ転送が始まる。鉱山従事者の片方だけが移動している場合でも、移動中のスマートフォンと固定されたデータログの間で通信している場合でも、データ転送可能時間は 25.2 s、最大 230 MBのデータを転送できる。2人の鉱山従事者がお互いに向かって移動している場合、鉱山重機との相対速度が 40 km/hであれば、通信可能時間は 12.6 sに短縮され、最大 115 MBのデータを転送することができる。つまり、機器間の相対速度が遅いほど、より多くのデータを転送することができる。スマートフォン同士の通信速度は 5.7 MB/sで転送されている。車速を通信範囲で割って通信時間を算出し、その通信時間に通信速度を掛けて転送されたデータ量を求めた。以上の理論的状況と計算結果から、最大 72 MBのデータ転送量が期待でき、坑内掘鉱山に必要な監視データをテキストファイルや画像ファイルとして確実に転送できることがわかった。

本研究で提案したデータ通信システムのレイアウトを図7.10に示す。PLC に使用する電力線は、坑内掘鉱山にもともと設置されていたものと同じである。大成沢鉱山の電力線配線は、図7.10に示すように、6つの領域に分かれている。各領域内では、PLC プラグを介してデータを共有することができる。また、異なる地域に設置されたデー

タログと Wi-Fi Direct でデータを共有する。この2つの通信により、障害物を避けたり、鉱山従事者が坑道を通るだけでデータを取得することができる。

Leakey Feeder システムのコストと、得られた通信範囲を基に設置した提案システムの比較を図7.10に示す。図7.10に示すように、坑道の長さは1 kmであり、また、1日に10人の鉱山従事者がそれぞれ1台のスマートフォンを持って作業することにした。提案するシステムが無線であることは、設置やメンテナンスのコストが低いことを示している。コスト面では、データログと PLC プラグの費用として約780 USD、スマートフォン10台の費用として2,000 USDが必要である。これに加えて、提案システムでは、設置費用として約500 USD、保守費用として年間200 USDが必要である。提案システムの全体的なコストは、設置費用として約3,200 USD、メンテナンス費用として年間200 USDが必要となる。一方、近年使用されている Leakey Feeder ケーブル (Msha Slywv-75-10) は、1 mあたり95 USDなので、データ通信を可能にするために1 kmのケーブルを敷設するとなると、約95,000 USDかかることになる。さらに、Leakey Feeder ケーブルは、設置費用として約5,000 USD、メンテナンス費用として年間約10,000 USDが必要となる。Leakey Feeder システムの全体的なコストは、設置費用として約100,000 USD、メンテナンス費用として年間約10,000 USDが必要となる。両システムのコストを比較すると、提案されたシステムは、その3%のコストと2%のメンテナンスコストで通信を実現することができる。このことから、提案する通信システムが安価であることがわかる。

例えば、爆発物の中では、温度、湿度、ガス濃度などのデータを保存する必要があるが、これらのデータはテキストデータとして保存されている。坑道から壁を隔てた反対側にデータログが設置されていれば、PLC を使ってデータログと共有する。これにより、鉱山従事者が通過する際に爆薬庫に入らなくてもデータを収集することが可能になる。データ転送距離は図6.13から140 mなので、最大で230 MBのデータを回収することができる。この通信機能を使えば、1日分のデータ保存量でも鉱山を通過することができ、鉱山の現場事務所に向かうだけで地下でのデータ確認が可能になる。同様に、掘削スポットやミーティングエリアに必要な環境データも、このデータ転送システムで利用できる。このシステムのコストは表7.2に示すように低く、既存の電力線を利用できるため設置も容易である。また、新たに開発された鉱山に通信システムを設置す

るだけでなく、すでに採掘を開始している鉱山にもデータログなどを設置するだけでシステムを運用することができる。その結果、多くの鉱山での運用が期待されている。

7.4 まとめ

坑内掘鉱山では、通信手段を確保し、センシングデータの伝送環境を整えることが非常に重要である。これにより、適切な環境モニタリング、鉱山従事者や機器の位置追跡が可能となり、鉱山作業の安全性と生産性の向上につながる。坑内掘鉱山には、地下環境を把握するために、温度、湿度、ガス濃度などの要素を測定する多くのセンサが設置されている。しかしながら、センサで得られたデータを地下から地上に伝送するための通信システムの開発は、まだ不十分である。拡大し続ける地下の鉱山で、有線通信による通信システムを維持するには、コストがかかりすぎると言われている。有線通信では、不要になった機器を開発する場所に増設・再設置することが難しく、断線の危険性が高いという問題がある。現在では、坑内掘鉱山の通信システムに有線通信から無線通信を利用することが検討され、多くの研究がなされている。これまでに、ZigBee や Wi-Fi Ad Hoc の使用が提案されており、その通信性能は坑内掘鉱山でのデータ通信に十分なものであることが明らかになっている。

本研究では、通信手段として Wi-Fi Ad Hoc に加え、PLC と Wi-Fi Direct を用いることで、最小のコストでデータ転送を行うシステムを開発した。Wi-Fi Direct を使用した結果、データログからスマートフォンまでの距離は直線で140 mとなった。このときの通信速度は9.1 MB/sで、データログが鉱山従事者のスマートフォンにデータを渡すまでに、鉱山従事者は230 MBのデータを回収できたことになる。スマートフォン同士の距離は直線距離で130 m、5.7 MB/sで通信できていたことになる。1台のスマートフォンから別のスマートフォンにデータが共有されるまでに、72 MBのデータを共有することができる。さらに、提案したシステムのコストを試算し、最も一般的な通信システム (Leakey Feeder) と比較した結果、提案したシステムは、初期コストが3%、維持費が2%で通信を実現することができた。この通信性能調査の結果をもとに、大成沢鉱山用のデータ転送システムを設計し、矮小空間を含む複雑な坑内掘鉱山にも低コストで設置できるデータ転送システムを提案した。データログの数やセンサの種類を容易に拡張することができる。このデータ転送システムは、機器を設置することで他の

鉱山にも流用できるため、坑内掘鉱山会社が求めるデータ転送システムとなっている。

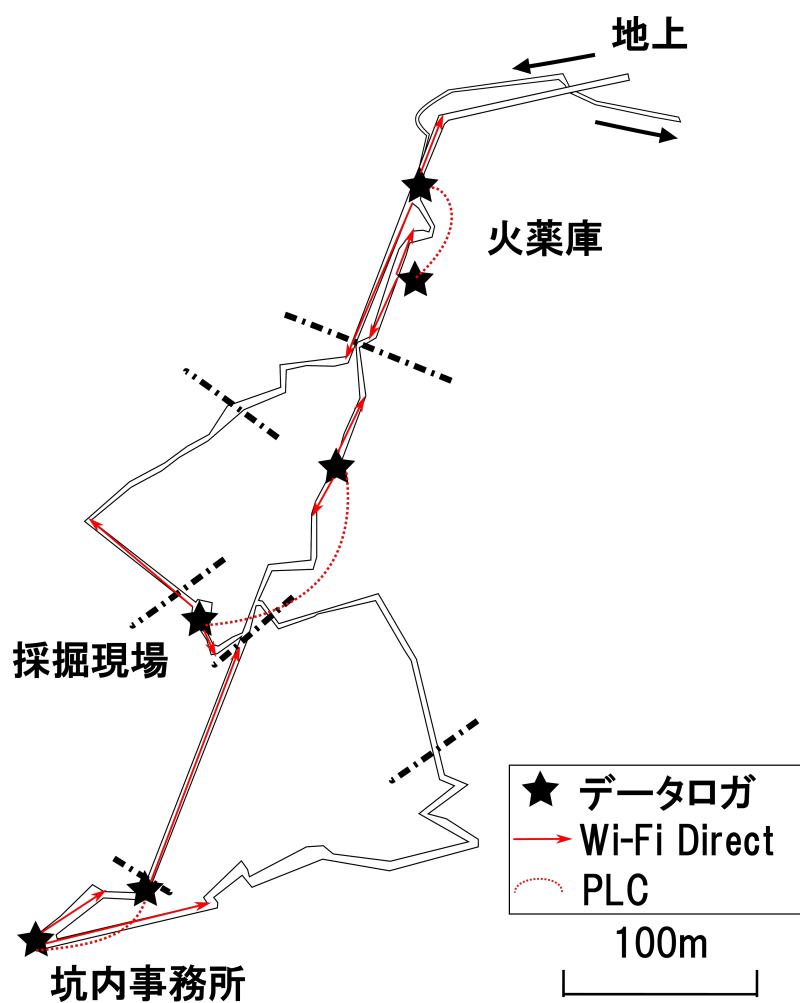


図7.10 提案する複合通信システムの様子

表7.2 提案する通信システムの設備投資コスト

通信機材	費用
データロガ (センサユニット含む)	100USD/ 個
スマートフォン (Android 4.0 以降)	200USD/ 個
PLC プラグ	30USD/ 個
電力線	敷設済

第 8 章 結論

坑内掘鉱山における生産性と安全性を高めるためにセンサ技術および ICT(IoT、通信) を活用され始めている。本研究では一例として「アドホック通信とひずみセンサセルの活用による坑内採掘のための原位置岩盤応力モニタリングシステム」を提案し、その基礎試験を行い、当該技術の優位性を検証した。地下坑内における岩盤状態の計測と坑内掘鉱山内無線通信技術と坑内掘鉱山内モニタリングの 3 つの要素に分け、実現可能性を調査することとした。

岩盤応力・ひずみの測定や通気・温度・湿度などの坑内作業環境の測定、坑内通信技術といったテーマの実現可能性および問題点を整理した。また、モニタリングでは岩盤応力・ひずみの測定や通気・温度・湿度などの坑内作業環境の測定が行われている。しかしながら、予算の都合や測定方法計測部および通信部の技術はそれぞれに熟成した進化を遂げてはいるが、地下坑内環境のモニタリングシステムは他分野に比べて発展しているとは言い難いのが現状である。特にモニタリングシステムにおける通信部は有線によるものが主流であり、技術革新された無線通信を積極的に利用している事例はマイノリティであることが明らかになった。次に計測部(センシング)では、坑内掘鉱山における計測は応力と変位の計測が主だったものである。やはり価格の都合上もしくは岩盤力学の歴史の観点からかひずみゲージを主軸としたものが目立つ結果となった。比較的新しい技術である光ファイバによる変位計測には大きな可能性を感じる結果ともなった。そして、通信部(ネットワーク)では、地下坑内通信に活用されている、もしくは活用が期待される無線通信技術について調べた。資金の潤沢な大型の坑内掘鉱山では従来の Leaky Feeder から 5G へ移行していく流れは確実であるが、その導入コストは莫大なものとなることが予想される。一方、安価な導入コストで坑内環境をモニタリングできる WSNs が発展することも容易に想像できる。計測機器の IoT 化のためにはこのような通信技術との接続が不可欠な要素となっている。

今研究で提案する「アドホック通信とひずみセンサセルの活用による坑内採掘のための原位置岩盤応力モニタリングシステム」は、応力解放後(オープニング後)の岩盤サポート用ドリルホールに多軸を有するひずみゲージ内蔵のセンサユニットを設置

し、データのバケツリレーのようにアドホック通信で観測データを地表のオペレーションセンターに収集・集約するモニタリングシステムである。この通信システムでは、Leakey Feeder や 4G/5G の通信インフラを敷設する必要がない。もちろん Wi-Fi アクセスポイントを設置する必要もない。鉱山従事者の保有するスマートフォンがデータホップの中継としての役割を果たし、特別な機材・インフラを必要とせずにデータ収集が可能となる。この通信システムの性能を知るために尾去沢鉱山と南アフリカの実験鉱山そして実稼働鉱山での通信試験を行いその結果をまとめた。結果より、センサユニットとアドホック通信の組み合わせにより、これまででは考えられないほど安価に岩盤のモニタリングが実現できる。このような岩盤モニタリングシステムにより、中長期の岩盤変形を定量的に把握することが可能となり、坑内における安全性を飛躍的に向上できる見込みがある。

謝辞

本学位論文の執筆にあたり、御指導御鞭撻下さいました川村洋平教授に心より感謝の意を表します。川村教授には、秋田大学国際資源学部在学中より、厳しくも親心を感じる丁寧な御指導を賜りました。研究者としてだけでなく人格的にも尊敬する川村教授のもとで研究室生活を過ごせたことはかけがえのない糧となりました。改めて感謝申し上げます。

博士学位論文審査において、貴重な御助言を下さいました安達毅教授、今井忠男教授、柴山敦教授に心より御礼申し上げます。安達教授には、博士最終年度より、川村教授の異動に伴う指導教官の引き継ぎを快く引き受けて下り、本学位論文をまとめるうえでは文章校正に関する的確な御指導をいただきました。今井教授には、学部生の時から進路に関して御助言をいただき、本学位論文をまとめるうえでは岩盤力学の観点からの的確な御指導をいただきました。柴山教授には、博士課程教育リーディングプログラムコーディネーターとしてサポートいただき、本学位論文をまとめるうえでは鉱山保安の観点からの的確な御指導をいただきました。改めて感謝申し上げます。

南アフリカでの研究活動の際に貴重な御助言を下さいました Frederick Cawood 教授に心より御礼申し上げます。University of the Witwatersrand の DigiMine 研究室での在外研究を快く引き受けて下さり、実稼働鉱山における実証試験の機会を頂きました。改めて感謝申し上げます。

お互いに切磋琢磨した採鉱工学研究室と資源経済・情報学研究室の皆様にも心より御礼申し上げます。また、研究を進めるにあたり、御支援、御協力をいただきながら、ここにお名前を記すことができなかつた多くの方々にも心より感謝申し上げます。

最後に、これまで温かく応援してくれた両親と祖母、明るく励まし研学生活を支えてくれた妻、絢菜にも心より感謝いたします。

参考文献

- [1] J. M. Burke, “Underground Mine Communications Infrastructure Guidelines Part II: Scenarios and applications,” Tech. Rep., 2017.
- [2] “Role of mining in national economies,” International Council on Mining and Metals, Tech. Rep., oct 2016.
- [3] J. Löow, L. Abrahamsson, and J. Johansson, “Mining 4.0—the Impact of New Technology from a Work Place Perspective,” *Mining, Metallurgy and Exploration* 2019 36:4, vol. 36, no. 4, pp. 701–707, jul 2019. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42461-019-00104-9>
- [4] E. Dotsenko, N. Ezdina, N. Breider, and S. Khouri, “Digital Modernization of the Russian Mining Sector in Accordance with the National Technology Initiative and Mining 4.0,” *E3S Web of Conferences*, vol. 278, p. 03003, 2021. [Online]. Available: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2021/54/e3sconf_sdemr2021_03003/e3sconf_sdemr2021_03003.html
- [5] I. Atif, F. T. Cawood, and M. A. Mahboob, “The Role of Digital Technologies that Could Be Applied for Prescreening in the Mining Industry During the COVID-19 Pandemic,” *Transactions of the Indian National Academy of Engineering* 2020 5:4, vol. 5, no. 4, pp. 663–674, sep 2020. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41403-020-00164-0>
- [6] H. Ikeda, O. Kolade, M. A. Mahboob, F. T. Cawood, and Y. Kawamura, “Communication of Sensor Data in Underground Mining Environments: An Evaluation of Wireless Signal Quality over Distance,” *Mining*, vol. 1, no. 2, pp. 211–223, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/mining1020014>
- [7] Y. S. Dohare, T. Maity, P. S. Das, and P. S. Paul, “Wireless Communication and Environment Monitoring in Underground Coal Mines –Review,” *IETE Technical Review*, vol. 32, no. 2, pp. 140–150, mar 2015. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02564602.2014.995142>

- [8] Z. Wang, W. Li, Q. Wang, Y. Hu, and J. Du, "Monitoring the Dynamic Response of the Overlying Rock–Soil Composite Structure to Underground Mining Using BOTDR and FBG Sensing Technologies," *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2021 54:9, vol. 54, no. 9, pp. 5095–5116, jul 2021. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-021-02530-y>
- [9] V. Adjiski, Z. Despodov, D. Mirakovski, and D. Serafimovski, "System architecture to bring smart personal protective equipment wearables and sensors to transform safety at work in the underground mining industry," *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, vol. 34, no. 1, pp. 37–44, 2019.
- [10] S. Matloob, Y. Li, K. Z. Khan, S. Matloob, Y. Li, and K. Z. Khan, "Safety Measurements and Risk Assessment of Coal Mining Industry Using Artificial Intelligence and Machine Learning," *Open Journal of Business and Management*, vol. 9, no. 3, pp. 1198–1209, apr 2021. [Online]. Available: <http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=109232><http://www.scirp.org/Journal/Paperabs.aspx?paperid=109232>
- [11] B. Zietek, A. Banasiewicz, R. Zimroz, J. Szrek, and S. Gola, "A Portable Environmental Data-Monitoring System for Air Hazard Evaluation in Deep Underground Mines," *Energies* 2020, Vol. 13, Page 6331, vol. 13, no. 23, p. 6331, nov 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/23/6331/htm><https://www.mdpi.com/1996-1073/13/23/6331>
- [12] M. Zare, R. Battulwar, J. Seamons, and J. Sattarvand, "Applications of Wireless Indoor Positioning Systems and Technologies in Underground Mining: a Review," *Mining, Metallurgy and Exploration* 2021, vol. 1, pp. 1–16, sep 2021. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42461-021-00476-x>
- [13] A. H. Soomro and M. T. Jilani, "Application of IoT and Artificial Neural Networks (ANN) for Monitoring of Underground Coal Mines," *ICISCT 2020 - 2nd International Conference on Information Science and Communication Technology*, feb 2020.

- [14] M. M. Alam and E. B. Hamida, "Surveying Wearable Human Assistive Technology for Life and Safety Critical Applications: Standards, Challenges and Opportunities," *Sensors* 2014, Vol. 14, Pages 9153-9209, vol. 14, no. 5, pp. 9153–9209, may 2014. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/5/9153/html><https://www.mdpi.com/1424-8220/14/5/9153>
- [15] C. Qi, "Big data management in the mining industry," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 27, no. 2, pp. 131–139, feb 2020. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12613-019-1937-z><http://link.springer.com/10.1007/s12613-019-1937-z>
- [16] B. B. Sinaice, N. Owada, M. Saadat, H. Toriya, F. Inagaki, Z. Bagai, and Y. Kawamura, "Coupling NCA Dimensionality Reduction with Machine Learning in Multispectral Rock Classification Problems," *Minerals* 2021, Vol. 11, Page 846, vol. 11, no. 8, p. 846, aug 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2075-163X/11/8/846/html><https://www.mdpi.com/2075-163X/11/8/846>
- [17] F. Jia, Y. Lei, J. Lin, X. Zhou, and N. Lu, "Deep neural networks: A promising tool for fault characteristic mining and intelligent diagnosis of rotating machinery with massive data," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 72-73, pp. 303–315, may 2016.
- [18] H. Ikeda, Y. Kawamura, H. Jang, N. E. Binti Mokhtar, J. Yokokura, and Z. P. L. Tungol, "Development of an Underground In-Situ Stress Monitoring System for Mining Safety Using Multi Sensor Cell and Wi-Fi Direct Technology," in *Proceedings of the 28th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2019*, vol. 1. Parth: Springer, 2019, pp. 236–244.
- [19] A. Zrelli and T. Ezzedine, "Localization of damage using wireless sensor networks for tunnel health monitoring," in *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, IWCMC 2017*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., jul 2017, pp. 1161–1165.

- [20] J. Ralston, D. Reid, C. Hargrave, and D. Hainsworth, "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, may 2014.
- [21] H. Ren, Y. Zhao, W. Xiao, and Z. Hu, "A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives," *International Journal of Coal Science and Technology 2019 6:3*, vol. 6, no. 3, pp. 320–333, aug 2019. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40789-019-00264-5>
- [22] P. Zimroz, P. Trybała, A. Wróblewski, M. Góralczyk, J. Szrek, A. Wójcik, and R. Zimroz, "Application of UAV in Search and Rescue Actions in Underground Mine—A Specific Sound Detection in Noisy Acoustic Signal," *Energies 2021, Vol. 14, Page 3725*, vol. 14, no. 13, p. 3725, jun 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/13/3725/html><https://www.mdpi.com/1996-1073/14/13/3725>
- [23] Y. Zhao, N. Zhang, and G. Si, "A fiber bragg grating-based monitoring system for roof safety control in underground coal mining," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 10, 2016.
- [24] K. Souček, M. Vavro, L. Staš, L. Vavro, P. Waclawik, P. Konicek, J. Ptáček, and L. Vondrovic, "Geotechnical Characterization of Bukov Underground Research Facility," *Procedia Engineering*, vol. 191, pp. 711–718, jan 2017.
- [25] C. Izumi, S. Akutagawa, J. Tyagi, R. Abe, C. Ravi Sekhar, and A. Kusui, "Application of a new monitoring scheme "On Site Visualization" for Safety management on Delhi Metro project," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 44, pp. 130–147, sep 2014.
- [26] I. F. Akyildiz and E. P. Stuntebeck, "Wireless underground sensor networks: Research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 4, no. 6, pp. 669–686, 2006.
- [27] I. F. Akyildiz, Z. Sun, and M. C. Vuran, "Signal propagation techniques for wireless underground communication networks," *Physical Communication*, vol. 2, no. 3, pp. 167–183, 2009. [Online]. Available:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.phycom.2009.03.004>

- [28] L. Oliveira and J. Rodrigues, “Wireless Sensor Networks: A Survey on Environmental Monitoring,” *Journal of Communications*, vol. 6, no. 2, pp. 143–151, apr 2011.
- [29] X. Qin, M. Fu, and B. Shen, “Coal mine gas wireless monitoring system based on WSNs,” *Proceedings of the 2011 2nd International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA 2011*, pp. 309–312, 2011.
- [30] P. P. Saraswala, “A Survey on Routing Protocols in ZigBee Network,” *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 471–476, 2013.
- [31] S. Kumari and H. Om, “Authentication protocol for wireless sensor networks applications like safety monitoring in coal mines,” *Computer Networks*, vol. 104, pp. 137–154, 2016.
- [32] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, and R. Verdone, “An overview on wireless sensor networks technology and evolution,” *Sensors*, vol. 9, no. 9, pp. 6869–6896, 2009.
- [33] J. N. Al-Karaki and a. E. Kamal, “Wireless Sensor Networks Routing Techniques in Wireless Sensor Networks : a Survey,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, no. December, pp. 6–28, 2004. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1368893
- [34] Y. Kawamura, A. M. Dewan, B. Veenendaal, M. Hayashi, T. Shibuya, I. Kitahara, H. Nobuhara, and K. Ishii, “Using GIS to develop a mobile communications network for disaster-damaged areas,” *International Journal of Digital Earth*, vol. 7, no. 4, pp. 279–293, 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1080/17538947.2013.808277>
- [35] M. A. Moridi, Y. Kawamura, M. Sharifzadeh, E. K. Chanda, and H. Jang, “An investigation of underground monitoring and communication system based on radio waves attenuation using ZigBee,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 43, pp. 362–369, 2014. [Online].

Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.011>

- [36] A. Chehri, P. Fortier, and P. M. Tardif, “UWB-based sensor networks for localization in mining environments,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 5, pp. 987–1000, 2009. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2008.08.007>
- [37] G. zhu Chen, Z. cai Zhu, G. bo Zhou, C. feng Shen, and Y. jing Sun, “Sensor deployment strategy for chain-type wireless underground mine sensor network,” *Journal of China University of Mining and Technology*, vol. 18, no. 4, pp. 561–566, 2008. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/S1006-1266\(08\)60294-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1006-1266(08)60294-1)
- [38] G. Zhou, Z. Zhu, P. Zhang, and W. Li, “Node deployment of band-type wireless sensor network for underground coalmine tunnel,” *Computer Communications*, vol. 81, pp. 43–51, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2015.10.015>
- [39] D. T. Updyke, W. C. Muhler, and H. C. Turnage, “An evaluation of leaky feeder communication in underground mines : final report,” Open file report (United States. Bureau of Mines), Tech. Rep., 1980. [Online]. Available: <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/9044>
- [40] S. Yarkan, S. Güzelgöz, H. Arslan, and R. Murphy, “Underground mine communications: A survey,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 11, no. 3, pp. 125–142, 2009.
- [41] G. Ashwini and C. R. Babu, “a Survey of Wireless Communication Modeling for Under Ground Mining,” vol. 3, no. 4, pp. 27–33, 2014. [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/df47/1e9289f432a41d3c72b0a60b2f7b4237e427.pdf>
- [42] A. E. Forooshani, S. Bashir, D. G. Michelson, and S. Noghianian, “A survey of wireless communications and propagation modeling in underground mines,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1524–1545, 2013.

- [43] A. M. Donoghue, "Occupational health hazards in mining: An overview," *Occupational Medicine*, vol. 54, no. 5, pp. 283–289, 2004.
- [44] M. A. Hermanus, "Occupational health and safety in mining-status, new developments and concerns Annual number and rate of fatalities in mining," *Journal of the southern african institute of mining and metalurgy*, vol. 107, no. May, pp. 531–538, 2007.
- [45] S. Lin, X. Wang, E. Yano, I. Yu, Y. Lan, M. N. Courtice, and D. C. Christiani, "Exposure to chrysotile mining dust and digestive cancer mortality in a Chinese miner/miller cohort," *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 71, no. 5, pp. 323–328, 2014.
- [46] J. H. Saleh and A. M. Cummings, "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, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2011.02.017>
- [47] Y. He, Y. Zhang, R. Kan, L. Wang, K. You, and J. Liu, "Study on mash gas monitoring with distributed multipoint fiber optic sensors system in coal mine," *2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics, SOPO 2012*, 2012.
- [48] M. C. He, Z. G. Tao, and B. Zhang, "Application of remote monitoring technology in landslides in the Luoshan mining area," *Mining Science and Technology*, vol. 19, no. 5, pp. 609–614, 2009. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60113-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60113-7)
- [49] L. Muduli, D. P. Mishra, and P. K. Jana, "Application of wireless sensor network for environmental monitoring in underground coal mines: A systematic review," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 106, no. September 2017, pp. 48–67, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2017.12.022>
- [50] U. I. Minhas, I. H. Naqvi, S. Qaisar, K. Ali, S. Shahid, and M. A. Aslam, "A WSN for Monitoring and Event Reporting in Underground Mine Environments," *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 485–496, 2018.

- [51] P. K. Mishra, Pratik, M. Kumar, S. Kumar, and P. K. Mandal, “Wireless real-time sensing platform using vibrating wire-based geotechnical sensor for underground coal mines,” *Sensors and Actuators, A: Physical*, vol. 269, pp. 212–217, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2017.11.036>
- [52] H. Ikeda, Y. Kawamura, Z. P. L. Tungol, M. A. Moridi, and H. Jang, “Implementation and Verification of a Wi-Fi Ad Hoc Communication System in an Underground Mine Environment,” *Journal of Mining Science*, vol. 55, no. 3, pp. 505–514, 2019.
- [53] H. Ikeda, Y. Kawamura, Z. P. L. Tungol, Y. Ito, and H. Jang, “Development of Underground Space Communication Systems Using Wi-Fi Ad Hoc for Smart Mining 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,” *Geoinformatics*, vol. 29, no. 1, pp. 3–11, 2018.
- [54] M. A. Moridi, Y. Kawamura, M. Sharifzadeh, E. K. Chanda, M. Wagner, and H. Okawa, “Performance analysis of ZigBee network topologies for underground space monitoring and communication systems,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 71, no. August 2017, pp. 201–209, 2018. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2017.08.018>
- [55] M. A. Moridi, M. Sharifzadeh, Y. Kawamura, and H. D. Jang, “Development of wireless sensor networks for underground communication and monitoring systems (the cases of underground mine environments),” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 73, no. December 2017, pp. 127–138, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.12.015>
- [56] M. A. Moridi, Y. Kawamura, M. Sharifzadeh, E. K. Chanda, M. Wagner, H. Jang, and H. Okawa, “Development of underground mine monitoring and communication system integrated ZigBee and GIS,” *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 25, no. 5, pp. 811–818, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.07.017>
- [57] United States Department of Labor, *Mine Safety Health Administration Hand-*

book Series, 1999, no. June.

索引

A		
AE	12	
AI	1	
ANOVA	38	
C		
CAD	26	
CCBM	9	
COD	37	
D		
dBm	39	
DF	95	
DTN	17	
E		
ESSID	63	
F		
FEM	26	
I		
ICT	1	
IoT	1	
L		
LAN	32	
LEDS	10	
LR	34	
M		
MEMS	11	
MIMO	40	
ML	1	
O		
OLS	34	
OS	63	
OSV	10	
P		
PDR	23	
PLC	95	
P2P	17	
R		
RFID	9	
		RSS
		36
S		
		SSID
		63
W		
		Wi-Fi
		2
		Wi-Fi Ad Hoc
		2
		Wi-Fi Direct
		2
		WSN
		2

付録

付録 A 線形回帰補足資料

A.1 Wi-Fi Ad Hoc

屋内外

表A.1 LR パラメータ:RSSI(屋内外)

		値	標準誤差	t 値	Prob> t
秋田大学構内	傾き:a	-0.12	0.011	-11	2.9E-12
	切片:b	-65	1.1	-57	1.1E-33
建物内部	傾き:a	-0.13	0.069	-1.8	0.10
	切片:b	-60	2.3	-25	1.1E-09
雄物川河川敷	傾き:a	-0.10	0.0084	-12	2.5E-15
	切片:b	-70	1.1	-63	5.8E-44

表A.2 LR 統計値:RSSI(屋内外)

	秋田大学構内	建物内部	雄物川河川敷
ポイント数	34	11	45
自由度	32	9.0	43
残差平方和	3.4E+02	1.2E+02	5.8E+02
ピアソンの r	-0.89	-0.52	-0.88
R 二乗 (COD)	0.79	0.27	0.77
補正 R 二乗	0.78	0.19	0.77

表A.3 ANOVA:RSSI(屋内外)

		DF	二乗和	二乗平均	F 値	確率 >F
	モデル	1.0	1.3E+03	1.3E+03	2.9E-12	2.9E-12
秋田大学構内	誤差	32	11	11		
	合計	33	1.6E+03		1.1E-33	
	モデル	1.0	44	44	0.10	0.10
建物内部	誤差	9.0	1.2E+02	13		
	合計	10	1.6E+02		1.1E-09	
	モデル	1.0	1.9E+03	1.9E+03	1.4E+02	2.5E-15
雄物川河川敷	誤差	43	5.8E+02	13		
	合計	44	2.5E+03			

表A.4 LR パラメータ: 通信速度 (屋内外)

		値	標準誤差	t 値	Prob> t
秋田大学構内	傾き:a	-0.019	0.0014	-14	4.7E-15
	切片:b	2.7	0.13	20	2.4E-19
建物内部	傾き:a	-0.020	0.0095	-2.1	0.065
	切片:b	3.4	0.32	10	2.5E-30
雄物川河川敷	傾き:a	-0.0094	5.8E-04	-16	5.2E-20
	切片:b	2.3	0.076	30	2.5E-30

表A.5 LR 統計値: 通信速度 (屋内外)

	秋田大学構内	建物内部	雄物川河川敷
ポイント数	34	11	45
自由度	31	9.0	43
残差平方和	4.3	2.2	2.7
ピアソンの r	-0.93	-0.57	-0.93
R 二乗 (COD)	0.87	0.33	0.86
補正 R 二乗	0.86	0.26	0.86

表A.6 ANOVA: 通信速度 (屋内外)

		DF	二乗和	二乗平均	F 値	確率 >F
秋田大学構内	モデル	1.0	28	28	2.0E+02	4.7E-15
	誤差	31	4.3	0.14		
	合計	32	32			
建物内部	モデル	1.0	1.1	1.1	4.4	0.065
	誤差	9.0	2.2	0.25		
	合計	10	3.3			
雄物川河川敷	モデル	1.0	17	17	2.7E+02	5.2E-20
	誤差	43	2.7	0.063		
	合計	44	19			

尾去沢鉱山

表A.7 LR パラメータ:RSSI(尾去沢鉱山)

		値	標準誤差	t 値	Prob> t
直線	傾き:a	-0.14	0.016	-8.6	4.5E-09
	切片:b	-62	1.3	-48	7.2E-27
曲がり角	傾き:a	-0.90	0.12	-7.6	2.7E-04
	切片:b	-60	3.0	-20	9.9E-07

表A.8 LR 統計値:RSSI(尾去沢鉱山)

	直線	曲がり角
ポイント数	28	8.0
自由度	26	6.0
残差平方和	2.9E+02	89
ピアソンの r	-0.86	-0.95
R 二乗 (COD)	0.74	0.91
補正 R 二乗	0.73	0.89

表A.9 ANOVA:RSSI(尾去沢鉱山)

	DF	二乗和	二乗平均	F 値	確率 >F
直線	モデル	8.4E+02	8.4E+02	74	4.5E-09
	誤差	2.9E+02	11		
	合計	1.1E+03			
曲がり角	モデル	8.6E+02	8.6E+02	58	2.7E-04
	誤差	89	15		
	合計	9.5E+02			

表A.10 LR パラメータ: 通信速度 (尾去沢鉱山)

		値	標準誤差	t 値	Prob> t
直線	傾き:a	-2.7E-04	6.7E-04	-0.40	0.69
	切片:b	2.3	0.055	42	2.6E-25
曲がり角	傾き:a	-0.085	0.014	-5.9	0.0010
	切片:b	3.1	0.36	8.6	1.4E-04

表A.11 LR 統計値: 通信速度 (尾去沢鉱山)

	直線	曲がり角
ポイント数	28	8.0
自由度	26	6.0
残差平方和	0.53	1.3
ピアソンの r	-0.078	-0.92
R 二乗 (COD)	0.0062	0.85
補正 R 二乗	-0.032	0.83

表A.12 ANOVA: 通信速度 (尾去沢鉱山)

		DF	二乗和	二乗平均	F 値	確率 >F
直線	モデル	1.0	0.0033	0.0033	0.16	0.69
	誤差	26	0.53	0.020		
	合計	27	0.53			
曲がり角	モデル	1.0	7.6	7.6	35	0.0010
	誤差	6.0	1.3	0.22		
	合計	7.0	8.9			

A.2 Wi-Fi Direct

尾去沢鉱山 (データログからスマートフォン)

表A.13 LR パラメータ:Direct RSSI(尾去沢鉱山)

		値	標準誤差	t 値	Prob> t
直線	傾き:a	-0.13	0.016	-7.9	2.0E-26
	切片:b	-59	1.4	-43	9.5E-26
曲がり角	傾き:a	-1.4	0.21	-6.3	0.0015
	切片:b	-49	4.8	-10	1.5E-04

表A.14 LR 統計値:Direct RSSI(尾去沢鉱山)

	直線	曲がり角
ポイント数	28	7.0
自由度	26	5.0
残差平方和	3.2E+02	1.6E+02
ピアソンの r	-0.84	-0.94
R 二乗 (COD)	0.71	0.89
補正 R 二乗	0.70	0.87

表A.15 ANOVA:Direct RSSI(尾去沢鉱山)

		DF	二乗和	二乗平均	F 値	確率 >F
	モデル	1.0	7.7E+02	7.7E+02	63	2.1E-08
直線	誤差	26	3.2E+02	12		
	合計	27	1.1E+03			
	モデル	1.0	1.3E+03	1.3E+03	40	0.0015
曲がり角	誤差	5.0	1.6E+02	32		
	合計	6.0	1.4E+03			

表A.16 LR パラメータ:Direct 通信速度 (尾去沢鉱山)

		値	標準誤差	t 値	Prob> t
直線	傾き:a	-0.030	0.0096	-3.1	0.0043
	切片:b	11	0.79	14	9.0E-14
曲がり角	傾き:a	-0.51	0.072	-7.1	8.4E-04
	切片:b	16	0.16	10	1.6E-04

表A.17 LR 統計値:Direct 通信速度 (尾去沢鉱山)

	直線	曲がり角
ポイント数	28	7.0
自由度	26	5.0
残差平方和	1.1E+02	18
ピアソンの r	-0.52	-0.95
R 二乗 (COD)	0.27	0.91
補正 R 二乗	0.25	0.89

表A.18 ANOVA:Direct 通信速度 (尾去沢鉱山)

		DF	二乗和	二乗平均	F 値	確率 >F
	モデル	1.0	41	41	9.8	0.0043
直線	誤差	26	1.1E+02	4.2		
	合計	27	1.5E+02			
	モデル	1.0	1.9E+02	1.9E+02	51	8.4E-04
曲がり角	誤差	5.0	18	3.6		
	合計	6.0	2.0E+02			

尾去沢鉱山 (スマートフォンからスマートフォン)

表A.19 LR パラメータ:Direct スマートフォン間 RSSI(尾去沢鉱山)

		値	標準誤差	t 値	Prob> t
直線	傾き:a	-0.11	0.018	-6.3	1.2E-06
	切片:b	-68	1.5	-46	2.0E-26
曲がり角	傾き:a	-1.3	0.20	-6.3	0.0015
	切片:b	-54	4.5	-12	7.5E-05

表A.20 LR 統計値:Direct スマートフォン間 RSSI(尾去沢鉱山)

	直線	曲がり角
ポイント数	28	7.0
自由度	26	5.0
残差平方和	3.8E+02	1.4E+02
ピアソンの r	-0.78	-0.94
R 二乗 (COD)	0.60	0.89
補正 R 二乗	0.59	0.86

表A.21 ANOVA:Direct スマートフォン間 RSSI(尾去沢鉦山)

		DF	二乗和	二乗平均	F 値	確率 >F
	モデル	1.0	5.7E+02	5.7E+02	39	1.2E-06
直線	誤差	26	3.8E+02	15		
	合計	27	9.5E+02			
	モデル	1.0	1.1E+03	1.1E+03	39	0.0015
曲がり角	誤差	5.0	1.4E+02	29		
	合計	6.0	1.3E+03			

表A.22 LR パラメータ:Direct スマートフォン間 通信速度 (尾去沢鉦山)

		値	標準誤差	t 値	Prob> t
直線	傾き:a	-5.1E-04	3.9E-04	-1.3	0.21
	切片:b	0.61	0.032	19	1.2E-16
曲がり角	傾き:a	-0.022	0.026	-8.4	3.8E-04
	切片:b	0.75	0.057	13	4.5E-05

表A.23 LR 統計値:Direct スマートフォン間 通信速度 (尾去沢鉦山)

	直線	曲がり角
ポイント数	28	7.0
自由度	26	5.0
残差平方和	0.18	0.023
ピアソンの r	-0.25	-0.97
R 二乗 (COD)	0.061	0.93
補正 R 二乗	0.025	0.92

表A.24 ANOVA:Direct スマートフォン間 通信速度 (尾去沢鉱山)

		DF	二乗和	二乗平均	F 値	確率 >F
	モデル	1.0	0.012	0.012	1.7	0.21
直線	誤差	26	0.18	0.0069		
	合計	27	0.19			
	モデル	1.0	0.33	0.33	71	3.8E-04
曲がり角	誤差	5.0	0.023	0.0046		
	合計	6.0	0.35			

実験鉱山

表A.25 LR パラメータ:Direct RSSI(実験鉱山)

		値	標準誤差	t 値	Prob> t
直線	傾き:a	-0.32	0.037	-8.8	3.0E-12
	切片:b	-53	1.3	-42	1.2E-45
矮小空間	傾き:a	-5.2	0.61	-8.5	1.4E-05
	切片:b	-34	1.8	-19	1.6E-08
シャフト	傾き:a	-1.5	0.13	-12	7.1E-09
	切片:b	-41	1.2	-35	9.7E-16

表A.26 LR 統計値:Direct RSSI(実験鉱山)

	直線	矮小空間	シャフト
ポイント数	61	11	17
自由度	59	9.0	15
残差平方和	1.5E+03	92	99
ピアソンの r	-0.75	-0.94	-0.95
R 二乗 (COD)	0.56	0.89	0.90
補正 R 二乗	0.56	0.88	0.89

表A.27 ANOVA:Direct RSSI(実験鉱山)

	DF	二乗和	二乗平均	F 値	確率 >F	
直線	モデル	1.0	1.9E+03	1.9E+03	77	3.0E-12
	誤差	59	1.5E+03	25		
	合計	60	3.4E+03			
矮小空間	モデル	1.0	7.4E+02	7.4E+02	72	1.4E-05
	誤差	9.0	92	10		
	合計	10	8.3E+02			
シャフト	モデル	1.0	8.8E+02	8.8E+02	1.3E+02	7.1E-09
	誤差	15	99	6.6		
	合計	16	9.8E+02			

表A.28 LR パラメータ:Direct 通信速度 (実験鉱山)

		値	標準誤差	t 値	Prob> t
直線	傾き:a	-0.19	0.012	-16	2.3E-23
	切片:b	20	0.40	49	3.0E-49
矮小空間	傾き:a	-0.38	0.10	-3.7	0.0051
	切片:b	18	0.31	58	7.3E-13
シャフト	傾き:a	-2.9E-16	1.7E-16	-1.7	0.10
	切片:b	16	1.6E-15	1.0E+16	7.0E-233

表A.29 LR 統計値:Direct 通信速度 (実験鉱山)

	直線	矮小空間	シャフト
ポイント数	61	11	17
自由度	59	9.0	15
残差平方和	1.5E+02	2.7	1.7E-28
ピアソンの r	-0.90	-0.77	—
R 二乗 (COD)	0.82	0.60	—
補正 R 二乗	0.81	0.56	—

表A.30 ANOVA:Direct 通信速度 (実験鉦山)

	DF	二乗和	二乗平均	F 値	確率 >F
モデル	1.0	6.7E+02	6.7E+02	2.6E+02	2.3E-23
直線					
誤差	59	1.5E+02	2.6		
合計	60	8.2E+02			
モデル	1.0	4.0	4.0	14	0.0051
矮小空間					
誤差	9.0	2.7	0.30		
合計	10	6.7			
モデル	1.0	—	—	—	—
シャフト					
誤差	15	1.7E-28	1.1E-29		
合計	16	0.0			

Great Noligwa 鉦山

表A.31 LR パラメータ:Direct RSSI(Great Noligwa 鉦山)

		値	標準誤差	t 値	Prob> t
直線	傾き:a	-0.069	0.0027	-25	1.0E-40
	切片:b	-62	0.67	-93	1.5E-85
直線・漏水	傾き:a	-0.27	0.022	-12	2.1E-11
	切片:b	-58	1.6	-37	2.4E-21

表A.32 LR 統計値:Direct RSSI(Great Nologwa 鉦山)

	直線	直線・漏水
ポイント数	85	24
自由度	83	22
残差平方和	7.9E+02	3.0E+02
ピアソンの r	-0.94	-0.94
R 二乗 (COD)	0.88	0.87
補正 R 二乗	0.88	0.87

表A.33 ANOVA:Direct RSSI(Great Nologwa 鉦山)

	DF	二乗和	二乗平均	F 値	確率 >F	
直線	モデル	1.0	6.0E+03	6.0E+03	6.4E+02	1.0E-40
	誤差	83	7.9E+02	9.5		
	合計	84	6.8E+03			
直線・漏水	モデル	1.0	2.1E+03	2.1E+03	1.5E+02	2.1E+11
	誤差	22	3.0E+02	14		
	合計	23	2.4E+03			

表A.34 LR パラメータ:Direct 通信速度 (Great Nologwa 鉦山)

		値	標準誤差	t 値	Prob> t
直線	傾き:a	-0.032	0.0012	-26	8.1E-41
	切片:b	13	0.29	45	1.4E-58
直線・漏水	傾き:a	-0.13	0.0084	-15	3.1E-13
	切片:b	13	0.60	22	1.6E-16

表A.35 LR 統計値:Direct 通信速度 (Great Nologwa 鉦山)

	直線	直線・漏水
ポイント数	82	24
自由度	80	22
残差平方和	1.4E+02	45
ピアソンの r	-0.95	-0.96
R 二乗 (COD)	0.89	0.91
補正 R 二乗	0.89	0.91

表A.36 ANOVA:Direct 通信速度 (Great Nologwa 鉦山)

	DF	二乗和	二乗平均	F 値	確率 >F
モデル	1.0	1.2E+03	1.2E+03	6.8E+02	8.1E-41
直線 誤差	80	1.4E+02	1.7		
合計	81	1.3E+03			
モデル	1.0	4.8E+02	4.8E+02	2.4E+02	3.1E-13
直線・漏水 誤差	22	45	2.0		
合計	23	5.2E+02			