

**携帯・スマホ等を活用した
遭難者の位置特定に関する調査検討**

報告書

平成 29 年 3 月

携帯・スマホ等を活用した遭難者の位置特定に関する調査検討会

はじめに

近年、登山やスキーによる山岳での遭難事故が増加傾向にあり、特にスキー場のコース外等を滑走するバックカントリーにおいて、雪崩等による遭難事故が多く発生しています。

このような遭難事故の発生時には、遭難者を一刻も早く救助する必要がありますが、特に雪崩等による冬期間の遭難事故の場合には、救助までの絶対時間が生存率に大きく関わることから、遭難者の早期の位置特定が大きな課題となっています。

これまで、遭難者の位置を特定するための有効な手段として、電波を活用した多くの検討が行われてきましたが、遭難者が発信器等を持っていることが必要であること、またその機器が高価なことから普及には至っていないのが現状です。

この課題を解決する方法として、現在広く普及している携帯電話・スマートフォン等を活用することにより、雪崩等によって遭難者が雪の中に埋もれた状況においても早期に位置特定を可能とする検索システムの実現が、スキー場、警察や消防等の捜索救助機関からも期待されているところです。

このようなことから、北海道総合通信局では、携帯電話・スマートフォンを利用して遭難者の早期の位置特定を可能とする検索システムを実現し、電波の有効利用の促進に資することを目的に、平成28年6月に自治体、大学、通信機器メーカー等の協力を得て、「携帯・スマホ等を活用した遭難者の位置特定に関する調査検討会」を設置しました。

本調査検討会では、携帯電話・スマートフォン等が雪の中に埋もれた状況において、積雪等がGPS衛星電波の受信及び携帯電話基地局との通信に及ぼす影響、必要な出力・エリアについて、技術的検証に関し、実証試験を含めた調査検討を行い、この度その成果を報告書として取りまとめたところです。

本報告書が、雪山での遭難者の早期発見等に大いに役立つことを期待いたします。

最後に、ご多忙な中、本調査検討会にご参画いただきました委員各位、また、実証試験に携わられたスタッフ各位、フィールド試験等にご協力いただいた関係各位に心より感謝申し上げます。

平成29年3月

「携帯・スマホ等を活用した遭難者の位置特定に関する調査検討会」

座長 北海道大学大学院情報科学研究科インテリジェント情報通信研究室
教授 大鐘 武雄

目 次

1. 調査検討の概要	1
1.1 調査検討の背景	1
1.2 調査検討の目的及び実施項目.....	1
2. 現状と課題	2
3. 調査検討結果	4
3.1 基本検討	4
3.1.1 積雪中の電波伝搬損失推定の検討	4
3.1.1.1 積雪の概要.....	4
3.1.1.2 積雪中の伝搬損失の理論検討.....	5
3.1.1.3 積雪の多層構造に対する理論検討.....	9
3.1.1.4 空気と積雪と大地で構成される3層モデルによる理論検討.....	11
3.1.1.5 3層モデルでの積雪中の最大通信可能距離の理論検討.....	17
3.1.2 人工降雪室での電波伝搬実験	18
3.1.2.1 雪の誘電率の測定.....	19
3.1.2.2 基準アンテナを用いた積雪中の伝搬損失特性(単層構造).....	21
3.1.2.3 基準アンテナを用いた積雪中の伝搬損失特性(3層構造).....	23
3.1.2.4 参考文献.....	25
3.1.3 GPSを用いた位置特定の検討.....	26
3.1.3.1 許容損失の測定諸元.....	26
3.1.3.2 許容損失の測定構成.....	26
3.1.3.3 許容損失の測定結果.....	27
3.1.4 無線中継システムの実験構成.....	31
3.1.4.1 係留気球又はドローンを用いた実験.....	32
3.1.4.2 無線中継システム.....	33
3.1.4.3 係留気球.....	39
3.1.4.4 ドローン.....	41
3.1.4.5 電力供給・監視制御システム(気球のみ)	42

3.1.4.6	実験構成の利点.....	42
3.1.4.7	実験結果.....	44
3.1.4.8	参考文献.....	47
3.1.5	位置特定ソフトウェアの検討.....	49
3.1.5.1	位置特定ソフトウェア.....	50
3.1.5.2	実装ソフトウェアの考え方.....	51
3.1.5.3	実装ソフトウェア.....	52
3.1.5.4	参考文献.....	55
3.2	実証実験.....	55
3.2.1	フィールドにおける積雪中の電波伝搬.....	55
3.2.1.1	雪の誘電率の測定.....	55
3.2.1.2	基準アンテナを用いた積雪中における測定(単層構造).....	56
3.2.1.3	基準アンテナを用いた積雪中における測定(3層構造).....	58
3.2.2	フィールドにおける積雪中のGPSを用いた位置特定.....	62
3.2.2.1	積雪中における測定諸元.....	62
3.2.2.2	積雪中における測定構成.....	62
3.2.2.3	積雪中における測定結果.....	64
3.2.3	無線中継システムの評価.....	66
3.2.3.1	無線中継システムの実証試験構成.....	66
3.2.3.2	実証実験諸元.....	67
3.2.3.3	実証実験結果.....	69
3.2.4	位置特定ソフトウェアの評価.....	70
3.2.4.1	実証実験のシステム構成.....	70
3.2.4.2	実装ソフトウェアの評価結果.....	71
3.3	同一事業者における既存基地局との干渉について.....	72
3.3.1	臨时无線中継システムのシステムパラメータの最適化.....	72
3.3.2	基地局と臨时无線中継システムの干渉回避技術eICICによる対応.....	73
3.4	公開実証実験.....	73

3.4.1	公開実証概要	74
3.4.1.1	実施場所	75
3.4.1.2	システム構成（移動無線車、係留気球、ドローン 等）	75
3.4.2	公開実証内容	77
3.4.3	公開実証結果	79
4.	まとめ	80
資料編		
資料 1	携帯・スマホを利用した遭難者の位置特定に関する調査検討会 開催趣旨	83
資料 2	携帯・スマホを利用した遭難者の位置特定に関する調査検討会 設置要綱	84
資料 3	携帯・スマホを利用した遭難者の位置特定に関する調査検討会 委員構成	86
資料 4	検討経過報告	87

1. 調査検討の概要

1.1 調査検討の背景

昨今、雪山登山やバックカントリースキーにおいて雪崩などによる遭難が増加する傾向にあり、遭難者の救出や捜索を迅速に行うことが求められている。遭難者の救出や捜索を迅速に行うためには、遭難者の位置特定が大きな課題となっている。

位置特定は、例えば登山に関しては ビーコン等の携帯センサーが実用化されている。しかし、専用の装置（送信機、端末）が必要となること等の課題がある。

1.2 調査検討の目的及び実施項目

現在、最も普及している携帯電話やスマートフォン（携帯電話）を利用して、遭難者の位置特定を行うことができれば、ビーコンのように専用の装置を必要としないといった利点がある。

また、最近の携帯電話には人工衛星からの信号を受信して端末の位置を特定するGPS (Global Positioning System)機能が基本機能として組み込まれている。このGPS機能は上空がそれなりに開けた場所であれば、数m～10m程度の距離誤差でその端末の位置を特定することができる。

すなわち、携帯電話のGPS機能と広域での無線通信機能を活用し、遭難者が持っている端末の「位置情報」を捜索側に迅速に通知できれば、遭難者の救出や捜索に利用できることが期待される。

しかし、山岳やスキー場では携帯電話のサービスエリア外となっている場所があり、このような場合は携帯電話の通信ができない。また、雪崩などで端末が雪下に深く埋まった場合には、GPSの電波が届かない、または携帯電話の電波が届かないことがあり、そのような場合には、端末の位置情報を捜索側に通知できない等の課題がある。

本調査検討では、積雪等がGPS衛星電波の受信及び基地局との通信に及ぼす影響、必要な出力・エリア、積雪中に埋まった遭難者が持っている携帯電話等の「位置情報」を捜索側に通知できるシステム、積雪中に埋もれた遭難者の端末の「位置情報」を取得できる雪中の最大の深さ等について調査検討を行う。

2. 現状と課題

携帯電話網の一般的な構成を図2.1に示す。地理的に離れた複数の基地局と移動通信網（移動通信ネットワーク）で構成され、ゲートウェイを介して固定通信ネットワークに接続されている。基地局は、端末と送受信を行う無線装置とアンテナで構成され、基地局のアンテナは鉄塔やビルの屋上など高所に設置されることが多い。一般に基地局のアンテナ高を高くすればするほど、基地局のアンテナと端末との見通しが良くなることから基地局がカバーできるエリアが広がる。

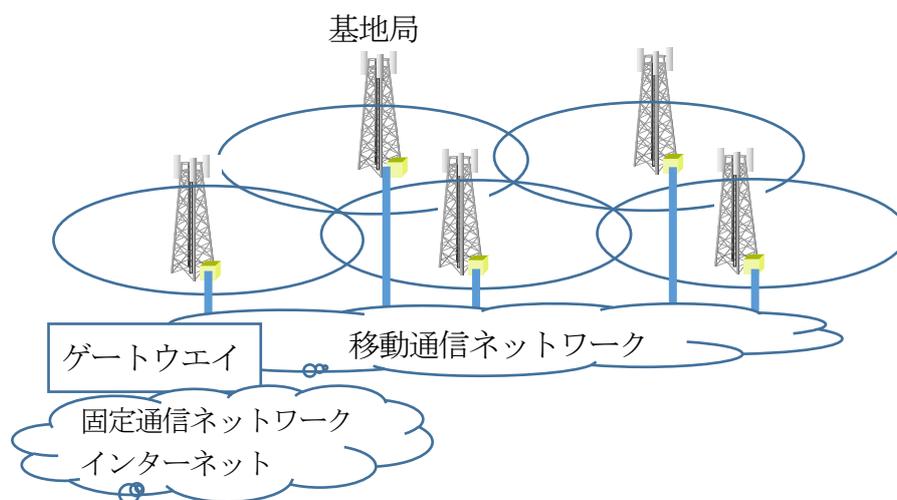


図 2.1 携帯電話網の一般的な構成

しかし、図2.2に示すように山岳地域の場合、例えば山間部では基地局アンテナからの電波が山の尾根等に遮られて電波が届かないことが多く、サービスエリア外（圏外）となる場所が多くある。

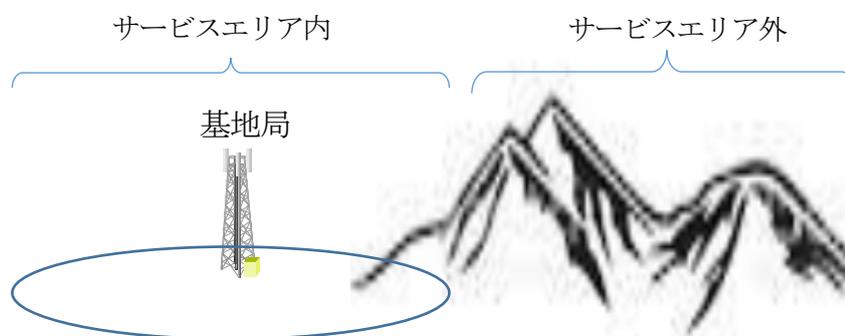


図 2.2 山岳地域の場合

サービスエリア外で遭難した場合には、端末でGPSの信号を受信することができた場合であっても、その情報を検索側に通知することができない。従って、遭難場所を携帯電話のサービスエリア内にする必要がある。

一方、端末でGPSの信号を受信できなければ、端末の正確な位置を特定することができない。遭難者の端末が携帯電話のサービスエリア内であって、検索側と通信ができたとしても、現在通信している基地局のサービスエリア内に位置しているという大雑把な情報しか得られない。

従って、端末のGPS情報の受信と端末の無線通信の確保を行うため、雪中の電波伝搬特性の解明等が必要であり、そのどちらかが欠ければ遭難者の高精度な位置を特定することができなくなる。

積雪がGPS衛星電波の受信と携帯電話の通信に及ぼす影響については、これまで明確に示されていないため、今回調査検討を行うものである。

3. 調査検討結果

本調査検討では、携帯電話等の利用を前提に、以下について検討を行う。

- ・ サービスエリア外（圏外）の端末から位置情報を取得するための方法
- ・ 積雪中に埋まった端末に対する無線通信の確保
- ・ 積雪中に埋まった端末のGPSの受信特性の評価
- ・ 遭難者端末のGPS情報を、移動通信網を介して捜索側に通知するシステム

3.1 基本検討

3.1.1 積雪中の電波伝搬損失推定の検討

積雪中の携帯電話の電波伝搬損失特性とGPS受信システムの電波伝搬損失特性は、各システムが使用する周波数が異なるだけで同じである。そこで、周波数をパラメータとして積雪中の電波伝搬特性（電波伝搬損失特性）を解析する。

3.1.1.1 積雪の概要

雪は氷と空気及び水の混合誘電体であり、大まかには表 3.1.1 のように分類されている。表層近辺にある新雪は密度が小さく、深いところにあるざらめ雪などは密度が大きい。分類の特徴としては、雪の密度、雪の含水率（水の含まれる割合）等があげられる。

ところで、任意の媒質中の電波伝搬特性を決定するのは媒質の誘電率特性であり、その特性がわかればその媒質中の電波伝搬特性は一意に決定する。

表 3.1.1 雪質の分類

大分類	小分類	密度	その他
新雪	新雪	0.05～0.15	
しまり雪	小しまり雪	0.15～0.25	
	しまり雪	0.25～0.5	
ざらめ雪	ざらめ雪	0.3～0.5	
しもざらめ雪	こしもざらめ雪	0.3程度	
	しもざらめ雪	0.3程度	結晶が大

3.1.1.2 積雪中の伝搬損失の理論検討

雪の誘電率特性は、雪の密度、体積含水率、及び使用する周波数で決定する。ここで雪の密度とは、体積 100cc 当たりの水の重さ(100g)に対する雪の重さの割合で定義される。例えば、体積 100cc の雪の重さが 30g の場合、密度は $30\text{g}/100\text{g}=0.3$ となる。また、体積含水率は雪の体積に対する雪に含まれる水の体積の割合(%)で定義される。例えば、雪の体積が 100cc に対し、その中の水の体積が 5cc の場合、含水率 $(5\text{cc}/100\text{cc})\times 100=5\%$ となる。

今、複素誘電率を ϵ_{ws} 、雪の密度を ρ_s 、含水率を m_v 、使用周波数を f とおくと、誘電率は近似的に次式の複素数（複素誘電率）で与えられる。

$$\epsilon_{ws} = \epsilon_{wsr} - j\epsilon_{wsi} \quad (2.1.1)$$

ここで、 j は虚数を表し、 $j = \sqrt{-1}$ である。また、 ϵ_{wsr} 、 ϵ_{wsi} はそれぞれ複素誘電率 ϵ_{ws} の実部、虚部を表しており、次式で表せる。

$$\begin{aligned} \epsilon_{wsr} &= 1.0 + 1.83\rho_s + 0.02m_v^{1.015} + \frac{0.073m_v^{1.31}}{1 + (f/f_0)^2} \\ \epsilon_{wsi} &= \frac{0.073(f/f_0)m_v^{1.31}}{1 + (f/f_0)^2} \\ f_0 &= 9.07 \text{ (GHz)} \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

式(2.1.2)からわかるように、実部 ϵ_{wsr} は雪の密度 ρ_s 、雪の含水率 m_v 、周波数 f に依存して変わる。しかし、虚部 ϵ_{wsi} は雪の含水率 m_v 、周波数 f に依存して変わるが、雪の密度 ρ_s には依存しないことがわかる。

表 3.1.1 から雪の密度 ρ_s は非常に乾いた雪で $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 、湿った雪で $0.3\sim 0.5\text{g}/\text{cm}^3$ 程度である。一方、雪の含水率 m_v は非常に乾いた雪で $0\sim 0.5\%$ 程度、湿った雪で $0.5\sim 5\%$ 、相当に湿った雪で $5\sim 15\%$ 程度である。

今、雪中で z 方向に進む平面波の電界強度 $E(z,t)$ とおくと、 $E(z,t)$ は次式で与えられる。

$$E(z,t) = E_0 \exp[j(2\pi ft - k_z z)] = E_0 \exp[-jk_z z] \cdot \exp[j2\pi ft] \quad (2.1.3)$$

ここで、 t は時間、 k_z は雪中での波数を表し、真空中での波長を λ_0 とおくと、雪の複素誘電率 ϵ_{ws} を用いて次式で表せる。

$$k_z = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_{ws}} = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_{ws} \equiv k_0 (n_{wsr} - j n_{wsi})$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \tag{2.1.4}$$

$$n_{ws} = \sqrt{\epsilon_{ws}}$$

但し、 k_0 は真空中での波数である。また、 n_{ws} は雪の複素屈折率を表しており、 n_{wsr} 、 n_{wsi} はそれぞれ複素屈折率 n_{ws} の実部、虚部を表わしている。

次に、平面波 $E(z,t)$ の電力を計算する。平面波 $E(z,t)$ の電力 $P(z)$ 及びその dB 値 $P_{dB}(z)$ は式(2.1.3)を用いて、次式で与えられる。

$$P(z) = |E|^2 = |E_0|^2 \exp[-2k_0 n_{wsi} z]$$

$$P_{dB}(z) = 10 \log |E|^2 = 10 \log |E_0|^2 - (20 / \ln(10)) \cdot k_0 n_{wsi} z \tag{2.1.5}$$

式(2.1.5)からわかるように、 z 方向に進む平面波の電力 $P_{dB}(z)$ は雪の複素屈折率 n_{ws} の虚部である n_{wsi} に比例して減衰することがわかる。すなわち、雪の n_{wsi} がわかれば、式(2.1.5)を用いて電波の減衰量が推定できる。

先ず、 n_{wsr} 、 n_{wsi} の3次元の計算結果例を図 3.1.1 に示す。横軸は雪の密度、含水率を、縦軸はそれぞれ n_{wsr} 、 n_{wsi} の値を示している。周波数 f は 1.5GHz、2.1GHz としている。 n_{wsr} 、 n_{wsi} は含水率が大きくなると、共にそれに応じて大きくなるのがわかる。 n_{wsr} は雪の密度が大きくなると大きくなるが、 n_{wsi} は雪の密度に関して殆ど依存していないことが分かる。一方、周波数が高くなると、 n_{wsi} は大きくなるのが分かる。

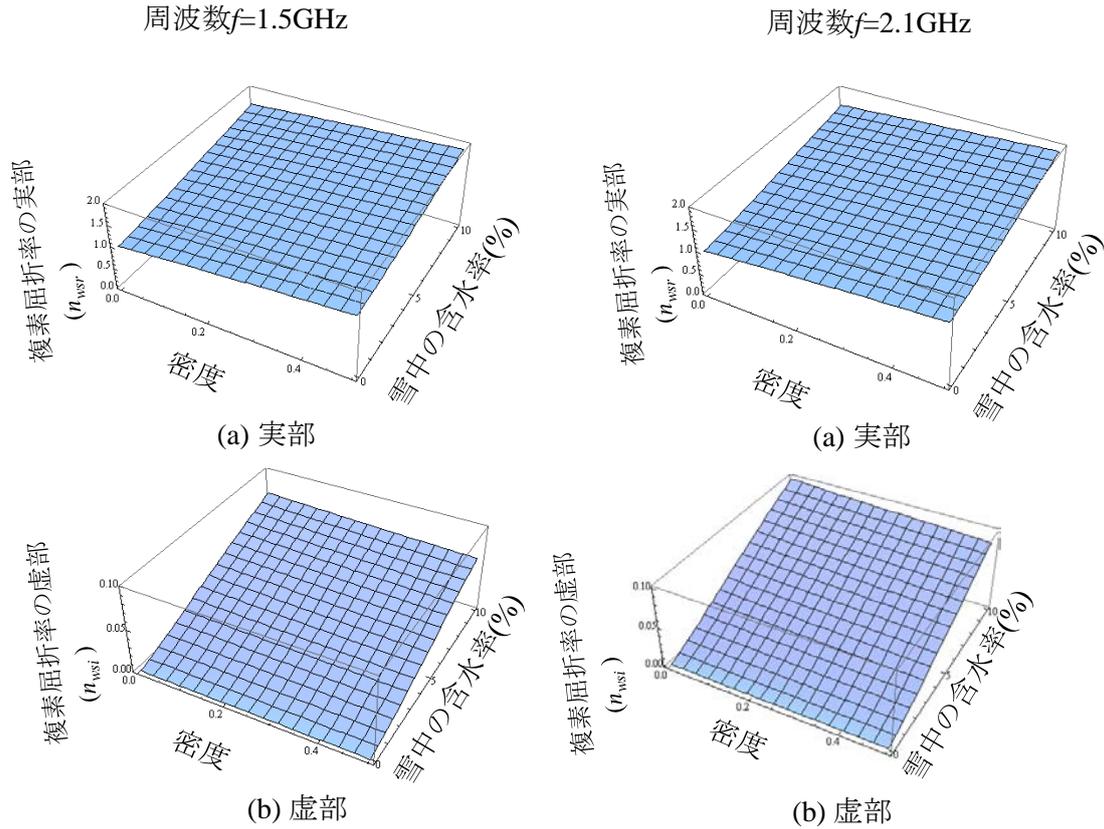


図 3.1.1 雪の複素屈折率

電波の減衰の観点からは、周波数が高くなる程、雪の含水率が大きくなる程 n_{wsi} が大きくなり、電波の減衰量（電波伝搬損失）が大きくなるのがわかる。

次に、平面波の電波伝搬損失について検討する。式(2.1.5)において $(20/\ln(10)) \cdot k_0 n_{wsi} z$ が送受信間距離 $z(\text{m})$ の場合の電波伝搬損失(dB)であり、距離 z に比例して増大することがわかる。そこで、単位距離($z=1\text{m}$)の伝搬損失である $(20/\ln(10)) \cdot k_0 n_{wsi}$ を計算する。

図 3.1.2 は周波数 f と 1 m 当たりの電波伝搬損失の関係を示す。雪の密度 ρ_s を $0.3(\text{g}/\text{cm}^3)$ とし、雪の含水率 m_v (%) をパラメータとしている。横軸は周波数 f (GHz) であり、縦軸は 1 m 当たりの電波伝搬損失である。また、横軸を雪の含水率 m_v (%)、周波数 f (GHz) とした場合の 1 m 当たりの電波伝搬損失 (dB) の 3 次元表示を示す。同図より、周波数 f が低い程、含水率 m_v が低い程、1 m 当たりの電波伝搬損失 (dB) が小さいことがわかる。

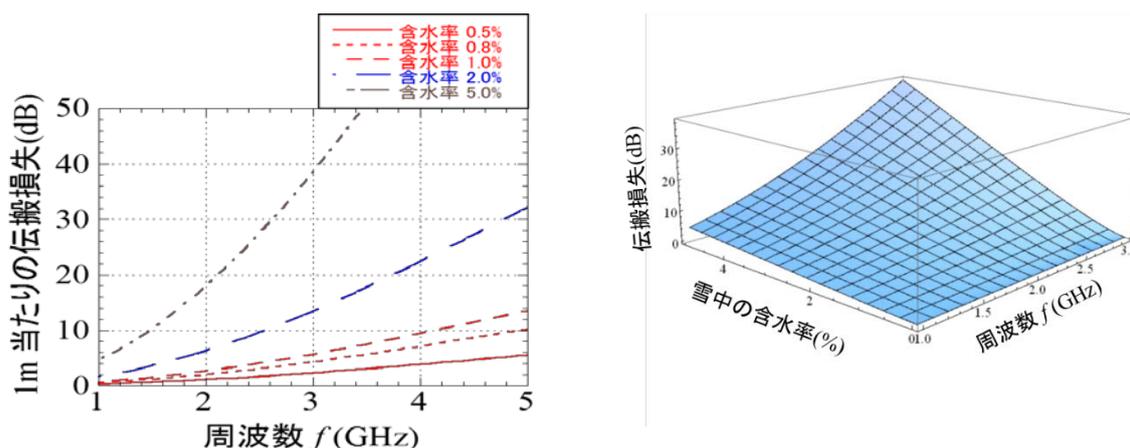


図 3.1.2 1m 当たりの電波伝搬損失

図 3.1.3 は周波数 f を 1.5GHz、2.1GHz とした場合の伝搬損失 (dB) の距離特性を示す。雪の密度 ρ_s を $0.3\text{g}/\text{cm}^3$ とし、雪の含水率 m_v (%) をパラメータとしている。 f が 1.5GHz、 m_v が 0.5% の場合、伝搬距離 z が 10m で約 5dB の伝搬損失となる。一方、 f が 2.1GHz と高くなると、 m_v が 0.5% の場合、伝搬距離 z が 10m で約 12dB と f が 1.5GHz に比べて電波伝搬損失が大きくなることわかる。

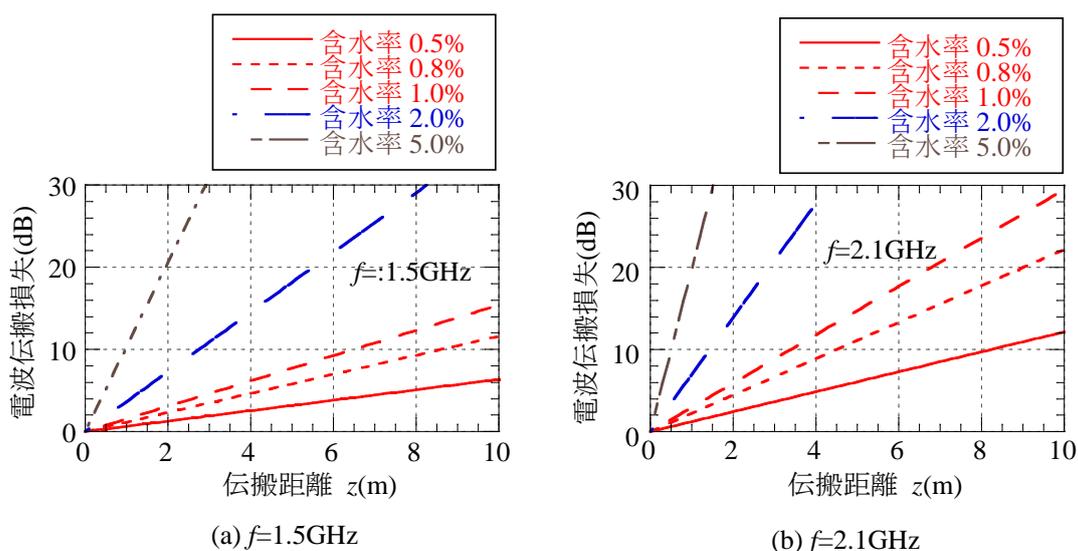


図 3.1.3 電波伝搬損失の距離特性

3.1.1.3 積雪の多層構造に対する理論検討

通常の移動通信システムでは、端末が積雪中に埋まった場合には、図 3.1.4 に示すように基地局アンテナから送信された電波は異なる媒質である積雪に斜め方向から入射し、透過した電波は積雪中を進んで端末に到達する。また、積雪中の雪質は降雪時の外気温、湿度、風速等の気象条件に影響され、実際には深さ方向に、表 3.1.1 に示すような様々な性質の積雪層で構成される。図 3.1.5 は表層からの深さ方向の積雪モデルを示す。本モデルは最上部に空気の層があり、最下部に土の層があり、その間を特性が異なる積雪層で構成される階層モデルである。

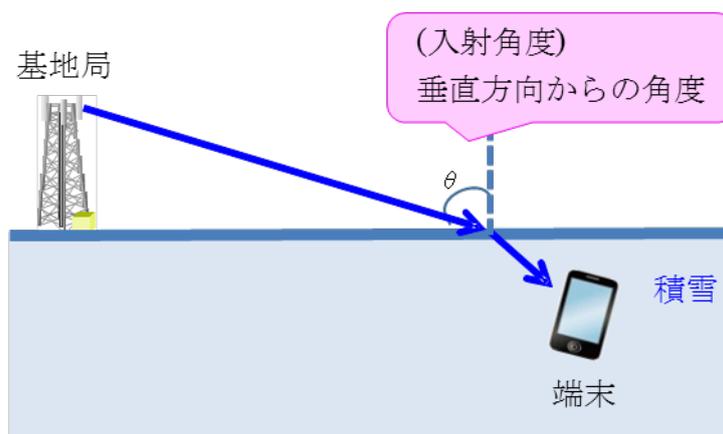


図3.1.4 積雪中への電波伝搬

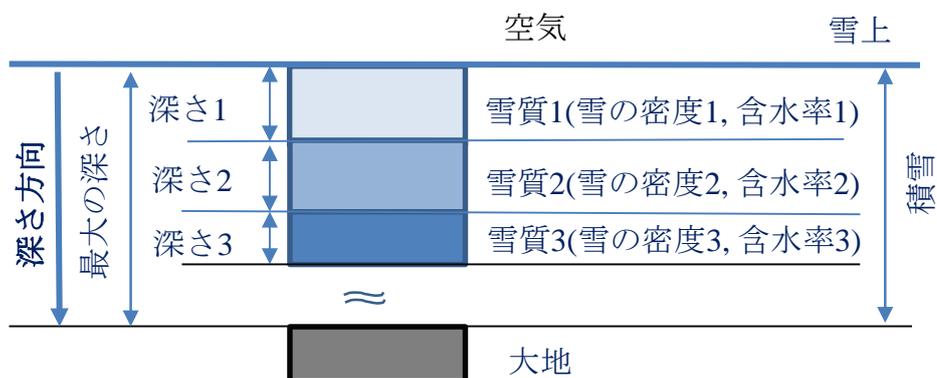


図 3.1.5 積雪モデル(階層モデル)

本階層モデルで積雪中の電波伝搬特性（伝搬損失特性）を解析する。解析モデルを図 3.1.6 に示す。雪の表面を $d_0=0\text{m}$ とし、その下深さ $-d_1$ まで雪質 1(複素誘電率 ϵ_{ws1}) の積雪層、その下深さ $-d_2$ まで雪質 2(複素誘電率 ϵ_{ws2}) の積雪層、その下深さ $-d_3$ まで雪質 3(複素誘電率 ϵ_{ws3}) の積雪層、その下深さ $-d_k$ まで雪質 k (複素誘電率 ϵ_{wsk}) の積雪層で構成される。空気層($k=0$)から雪質 1 の積雪層への入射角度を θ 、雪質 1 の積雪層へ

の透過角度を θ_1 及び雪質2の積雪層への入射角度を θ_1 、雪質2の積雪層への透過角度を θ_2 及び雪質3の積雪層への入射角度を θ_2 、雪質3の積雪層への透過角度を θ_3 とおくと、雪質 k の積雪層への透過角度 θ_k 及び雪質 $k+1$ の積雪層への入射角度 θ_k はスネルの法則より次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} n_0 \sin \theta_0 &= n_k \sin \theta_k \\ n_k &= \sqrt{\epsilon_k} \end{aligned} \quad (k=1,2,\dots) \quad (2.1.6)$$

すなわち、雪質 $k+1$ の積雪層への入射角度 θ_k は次式で求めることができる。

$$\theta_k = \sin^{-1} \left(\frac{n_0}{n_k} \sin \theta_0 \right) = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{\epsilon_0}}{\sqrt{\epsilon_k}} \sin \theta_0 \right) \quad (k \geq 1) \quad (2.1.7)$$

実際の積雪は、複素誘電率が異なる複数の積雪層で構成されている。しかし、各層の雪質は降雪時やその後の気温、風速、日射量等の気象条件で変わる。現在まで、各地の積雪の雪質（複素誘電率）を精度よく推定するモデルはない。そこで、一般性を損なわない範囲で単純な積雪モデルを用いて、積雪中の電波伝搬特性を計算する。

送信アンテナ

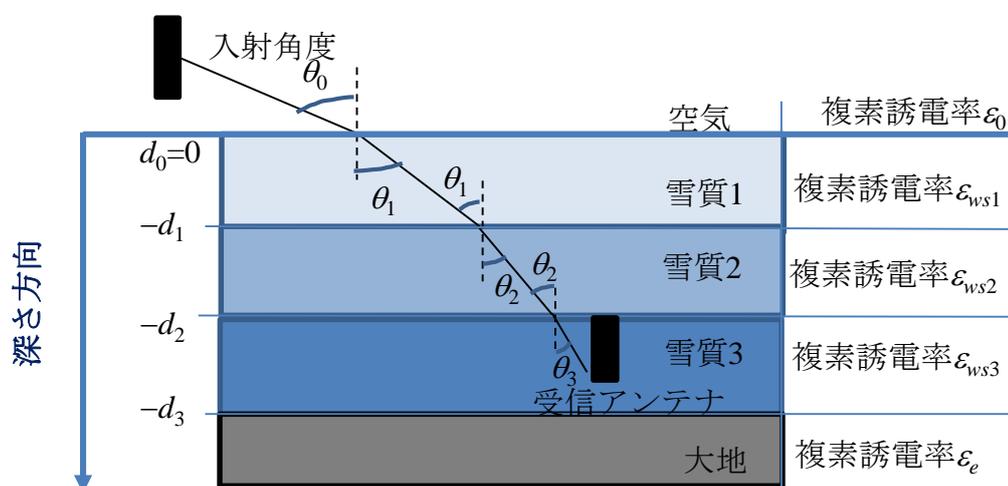


図 3.1.6 解析モデル

3.1.1.4 空気と積雪と大地で構成される3層モデルによる理論検討

積雪中の電波伝搬特性を計算する基本モデルとして、図 3.1.7 に示す空気層と積雪層と大地層で構成される3層モデルがある。3層モデルでは、各層内は均質であり、同じ特性(複素誘電率)をしているものと仮定する。すなわち、各層内で複素誘電率は同じとする。また、電波としては電界の方向を考慮して“垂直偏波”と“水平偏波”とする。

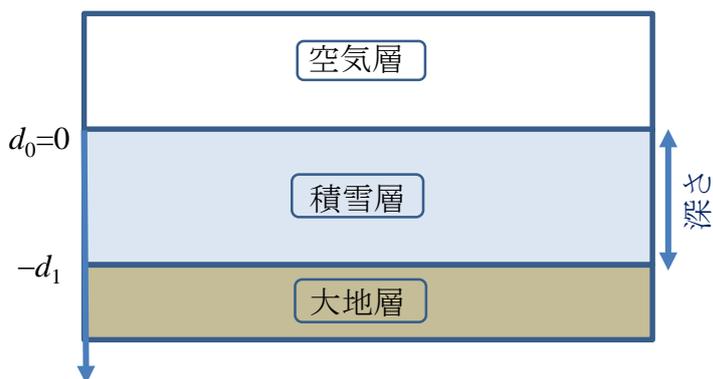


図 3.1.7 3層モデル

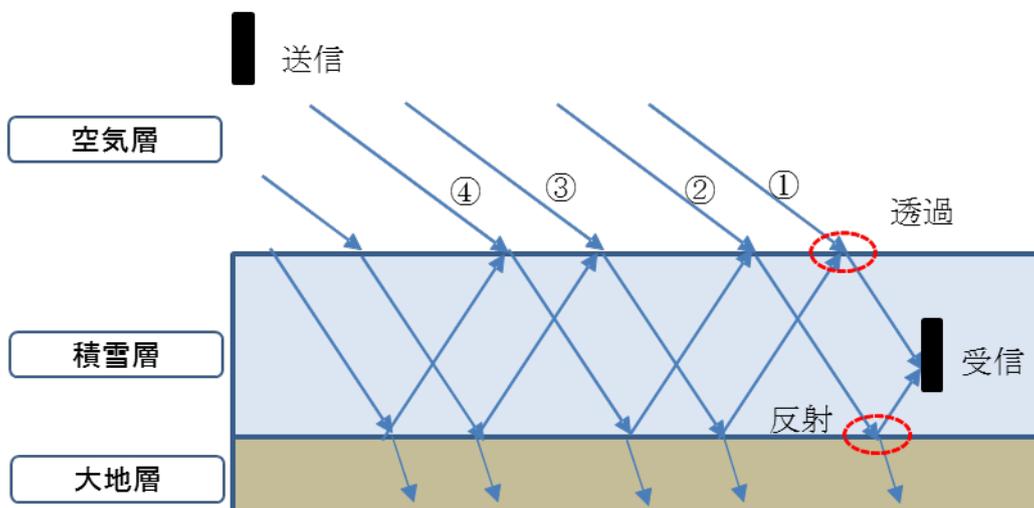


図3.1.8 3層モデルでの電波伝搬メカニズム

階層モデルでは電波は透過と反射を繰り返し、受信点に到達する。図 3.1.8 に3層モデルで電波が透過と反射を繰り返し受信点に到達する電波伝搬メカニズムを示す。第1波①は雪中に透過後、雪中を進み受信点に到達する電波である。第2波②は雪中に透過後、雪中を進み、大地で反射された後、雪中を進み、受信点に到達する電波である。第3波③は雪中に透過後、雪中を進み、大地で反射された後、雪中を進み、空気層で反射された後、雪中を進み、受信点に到達する電波である。第4波④、第5波

(⑤)、---、も同様である。第 n 波において、 n が大きくなる程、反射回数が多くなり、反射損失が増加し、受信点に到達する第 n 波の電力は小さくなる。

今、①、③、⑤、---、の奇数番号の電波 $E_{2n+1}(z)$ と ②、④、⑥、---、の偶数番号の電波 $E_{2n}(z)$ は次式で表せる。

$$\begin{aligned} E_{2n+1}(z) &= T_{01} \exp[-2jk_1 z \cos \theta_1] \cdot (R_{12} \cdot R_{10} \exp[-2jk_1 d_1 \cos \theta_1])^n \\ E_{2n}(z) &= T_{01} \exp[-2jk_1 d_1 \cos \theta_1] \cdot R_{12} \exp[-jk_1(d_1 + z) \cos \theta_1] \\ &\quad \times (R_{12} \cdot R_{10} \exp[-2jk_1 d_1 \cos \theta_1])^n \end{aligned} \quad (2.1.8)$$

ここで、 R_{10} は 1 層と 0 層の反射係数を、 R_{12} は 1 層と 2 層の反射係数を、 T_{12} は 0 層と 1 層の透過係数であり、垂直偏波、水平偏波でそれぞれ次式のように与えられる。

[垂直偏波]

$$\begin{aligned} R_{10} &\equiv R_{10}^\perp = \frac{n_0 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1} \\ R_{12} &\equiv R_{12}^\perp = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \\ T_{01} &\equiv T_{01}^\perp = \frac{2n_0 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1} \end{aligned} \quad (2.1.9)$$

[水平偏波]

$$\begin{aligned} R_{10} &\equiv R_{10}^\parallel = \frac{n_1 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1} \\ R_{12} &\equiv R_{12}^\parallel = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \\ T_{12} &\equiv T_{01}^\parallel = \frac{2n_0 \cos \theta_0}{n_1 \cos \theta_0 + n_0 \cos \theta_1} \end{aligned} \quad (2.1.10)$$

式(2.1.8)の奇数番号の電波 $E_{2n+1}(z)$ と偶数番号の電波 $E_{2n}(z)$ を全て加算することで、深さ z での電波を求めることができる。電波を $E(z)$ とおくと、 $E(z)$ は次式で表わすことができる。

$$\begin{aligned}
E(z) &= \sum_{n=0}^{\infty} E_{2n+1}(z) + \sum_{n=0}^{\infty} E_{2n+1}(z) \\
&= T_{01} \exp[jk_1 z \cos \theta_1] \frac{1}{1 - R_{12} R_{10} \exp[-2jk_1 d_1 \cos \theta_1]} \\
&\quad + T_{01} \exp[-jk_1 z \cos \theta_1] \cdot R_{12} R_{10} \exp[-2jk_1 (d_1 + z) \cos \theta_1] \frac{1}{1 - R_{12} R_{10} \exp[-2jk_1 d_1 \cos \theta_1]} \\
&= T_{01} \frac{\exp[-jk_1 z \cos \theta_1] + R_{12} \exp[-2jk_1 d_1 \cos \theta_1] \cdot \exp[-jk_1 z \cos \theta_1]}{1 + R_{12} R_{01} \exp[-2jk_1 d_1 \cos \theta_1]}
\end{aligned}
\tag{2.1.11}$$

ここで、(2.1.11)の右辺の最終式は、 $R_{10} = -R_{01}$ の関係を用いている。平面波 $E(z, t)$ の電力 $P(z)$ 及びその dB 値 $P_{dB}(z)$ は式(2.1.11)を用いて、次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
P(z) &= |E|^2 \\
P_{dB}(z) &= 10 \log |E|^2
\end{aligned}
\tag{2.1.12}$$

図 3.1.9 に実際の計算モデルを示す。ここでは、一例として、積雪層の深さ d_1 を 5m とする。送信アンテナが端末から遠方にあることを考慮して、ここでは電波を平面波とし、空気層から積雪への入射角度を θ_0 とする。また、電波としては電界の方向を考慮して“垂直偏波”と“水平偏波”とする。なお、周波数に関しては移動通信システムの周波数のひとつである 2.1GHz と GPS の周波数である 1.5GHz とする。

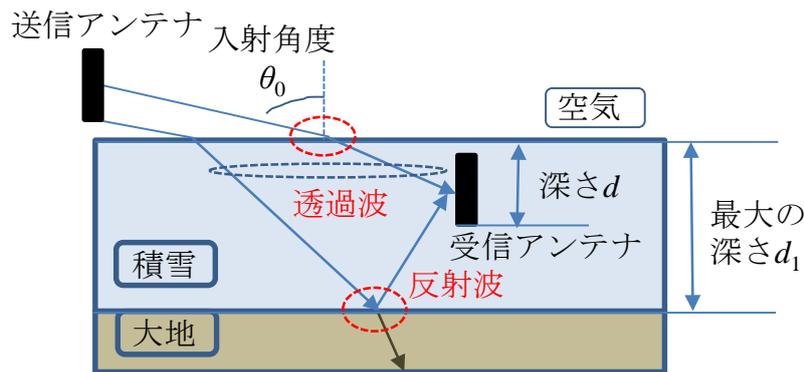


図 3.1.9 3層の解析モデル

各層の複素誘電率は、空気層の複素誘電率 ϵ_0 を 1 とし、大地の比誘電率を湿った大地の誘電率である $\epsilon_2 = 22 - j0.03$ と固定する。一方、積雪層の比複素誘電率 ϵ_1 は式(2.1.1)、式(2.1.2)に示す雪の密度 ρ_s と含水率 m_w 、周波数 f をパラメータとして、様々な雪質における式(2.1.12)の受信電力を基に電波伝搬損失を評価する。

まず、電波を垂直偏波とした場合の受信点の深さ d と電波伝搬損失の関係を図3.1.10に示す。但し、周波数 f を 2.1GHz、入射角度 θ を 0° 、雪の密度 ρ_s を 0.3g/cm^3 、含水率 m_v を 0.5% としている。図 3.1.8 に示すように受信点に到達する電波はそれぞれ位相が異なるため、それらが合成された電波の受信電力は受信点が移動すると激しく変動する。その結果、伝搬損失も激しく変動し、その変動のインターバルは波長のおおよそ半分（半波長）である。そこで、受信電力を距離で平均化した平均化受信電力から算出した平均伝搬損失を図 3.1.10 に併せて示している。

以下では、平均受信電力で算出した平均伝搬損失で評価する。図 3.1.11 は周波数 f を 2.1GHz、電波を垂直偏波として、入射角度 θ を 0° 、 30° 、 60° 、 85° と変えた時の雪の含水率 m_v をパラメータとして計算した深さ d と平均伝搬損失の関係を示す。但し、雪の密度 ρ_s を 0.3g/cm^3 としている。例えば、含水率 m_v が 0.8% 以下、入射角度が 30° 以下であれば、深さ d が 4m で平均伝搬損失は 10dB 以下である。

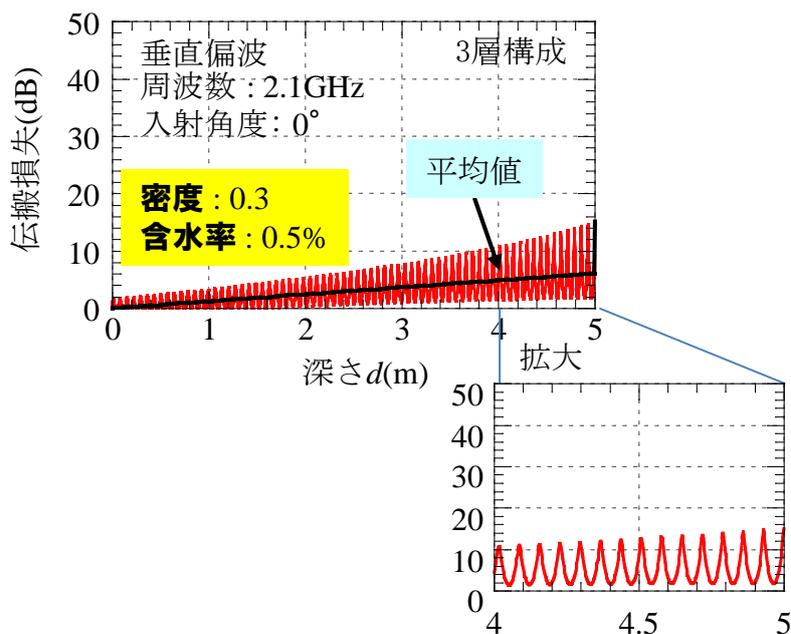


図 3.1.10 伝搬損失の計算結果例

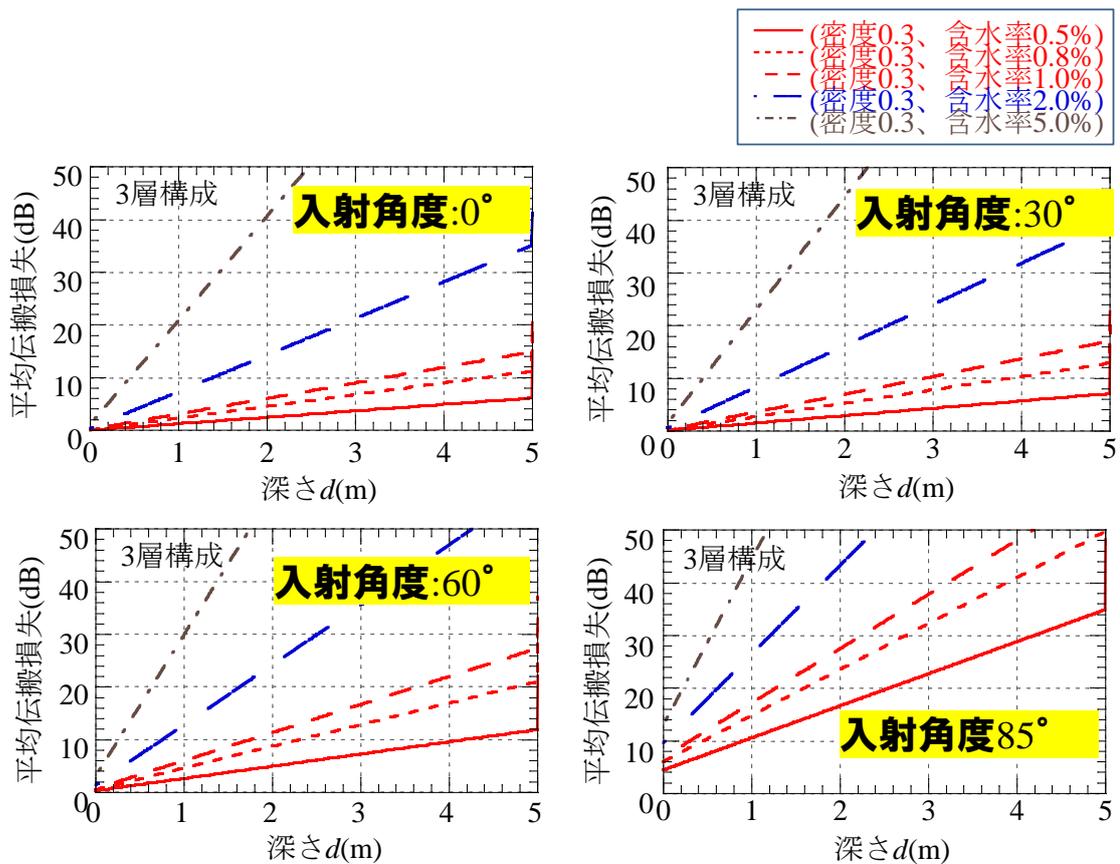


図 3.1.11 2.1GHz、垂直偏波の場合の深さ d と平均伝搬損失

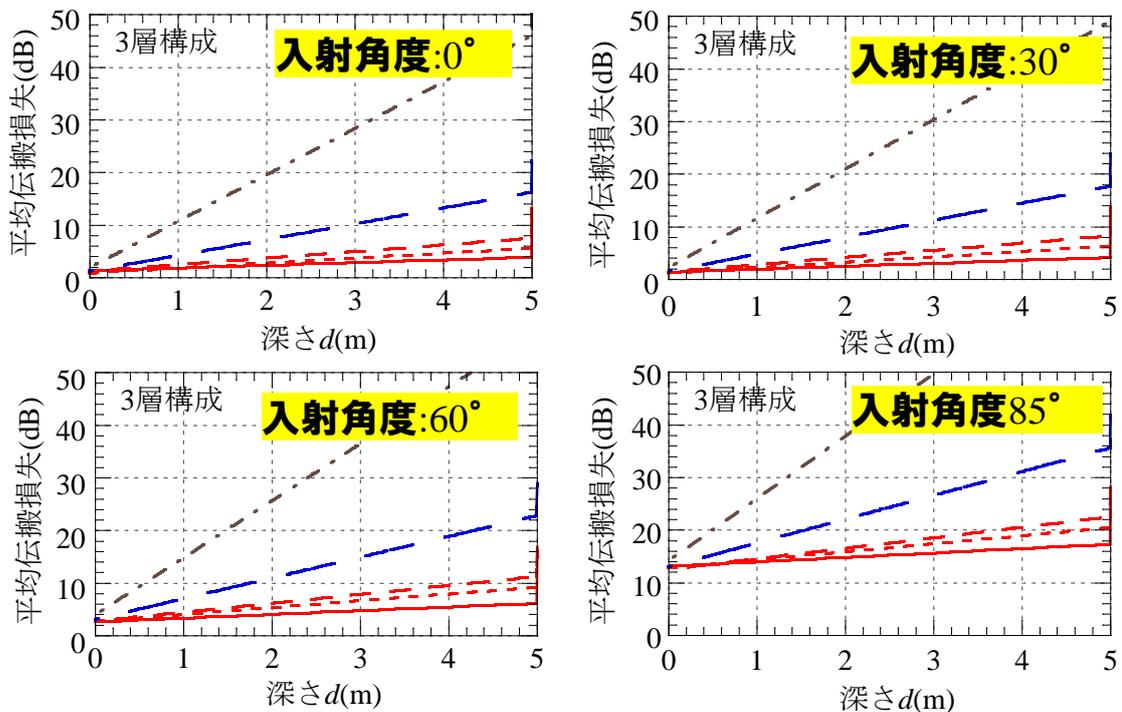


図 3.1.12 1.5GHz、垂直偏波の場合の深さ d と平均伝搬損失

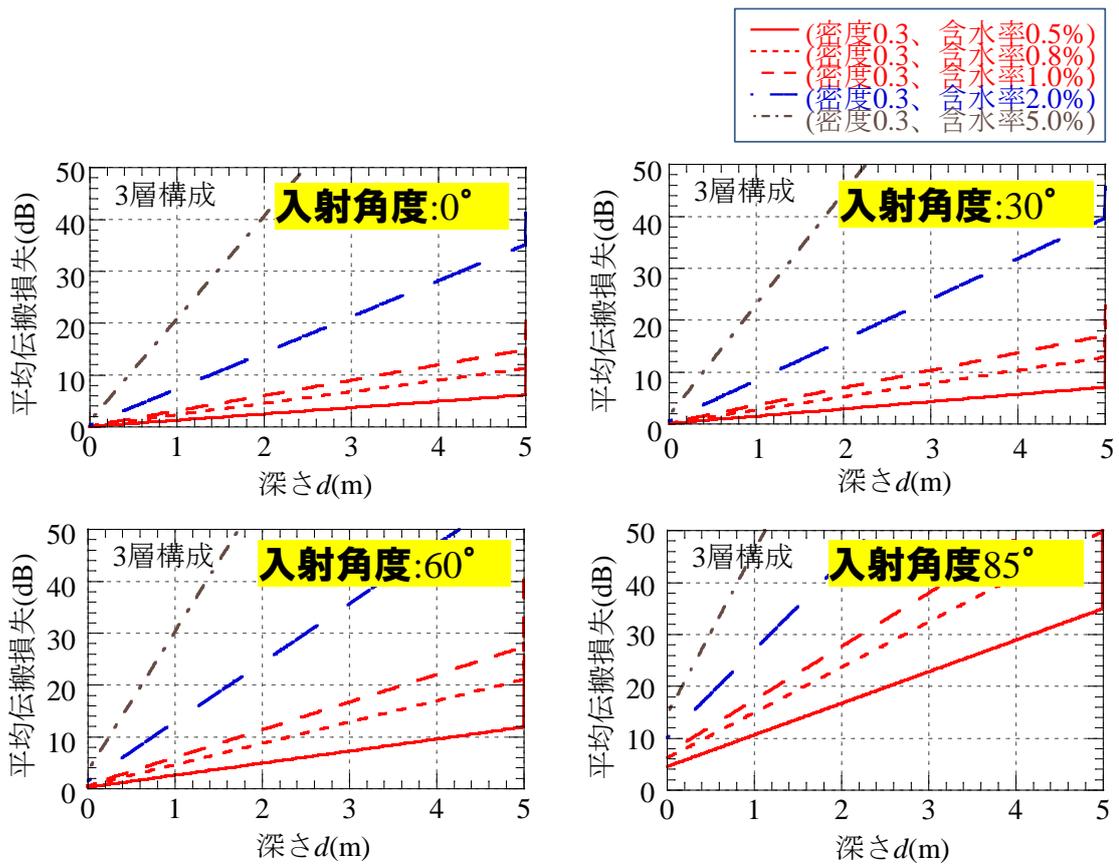


図 3.1.13 2.1GHz、水平偏波の場合の深さ d と平均伝搬損失

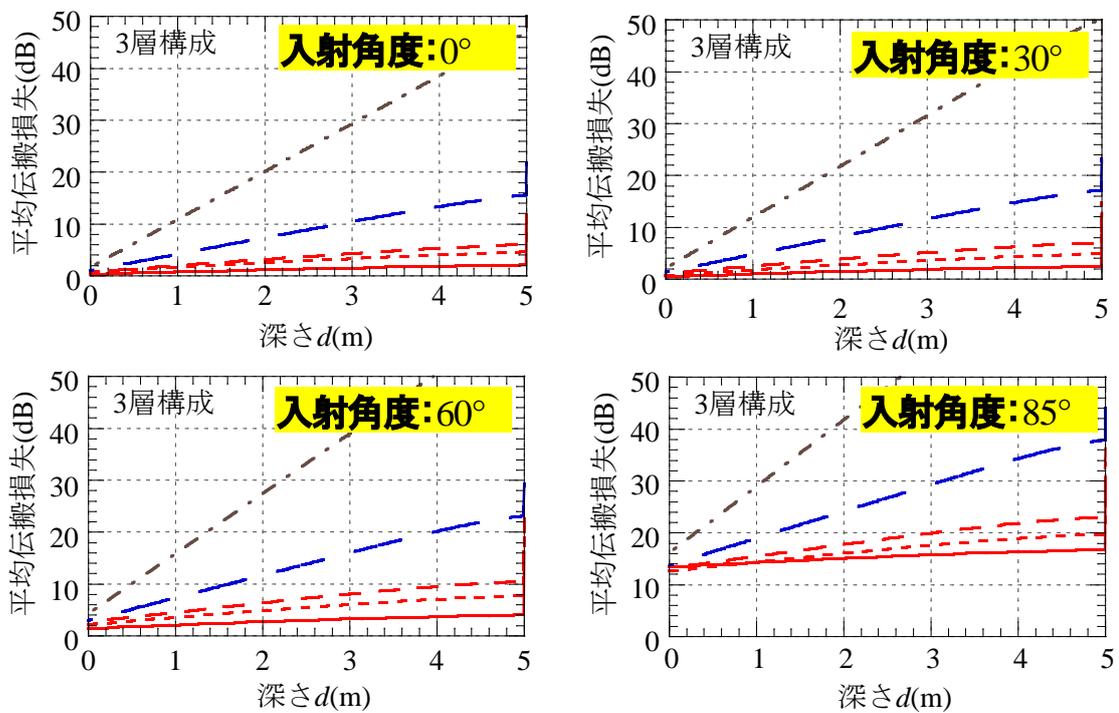


図 3.1.14 1.5GHz、水平偏波の場合の深さ d と平均伝搬損失

図 3.1.12 は周波数 f を 1.5GHz、電波を垂直偏波として、入射角度 θ を 0° 、 30° 、 60° 、 85° と変えた時の雪の含水率 m_v をパラメータとして計算した深さ d と平均伝搬損失の関係を示す。但し、雪の密度 ρ_s を 0.3g/cm^3 としている。例えば、含水率 m_v が 1.0% 以下、入射角度が 60° 以下であれば、深さ d が 4m で平均伝搬損失は 10dB 以下である。

図 3.1.13 は周波数 f を 2.1GHz、電波を水平偏波として、入射角度 θ を 0° 、 30° 、 60° 、 85° と変えた時の雪の含水率 m_v をパラメータとして計算した深さ d と平均伝搬損失の関係を示す。但し、雪の密度 ρ_s を 0.3g/cm^3 としている。例えば、含水率が 0.8% 以下、入射角度が 30° 以下であれば、深さ 4m で平均伝搬損失は 10dB 以下であり、同じ条件の垂直偏波と殆ど同じ結果である。

図 3.1.14 は周波数 f を 1.5GHz、電波を水平偏波として、入射角度を 0° 、 30° 、 60° 、 85° と変えた時の雪の含水率 m_v をパラメータとして計算した深さ d (m) と平均伝搬損失の関係を示す。但し、雪の密度 ρ_s を 0.3g/cm^3 としている。例えば、含水率 m_v が 1.0% 以下、入射角度が 60° 以下であれば、深さ d が 4m で平均伝搬損失は 10dB 以下であり、同じ条件の垂直偏波と殆ど同じ結果である。

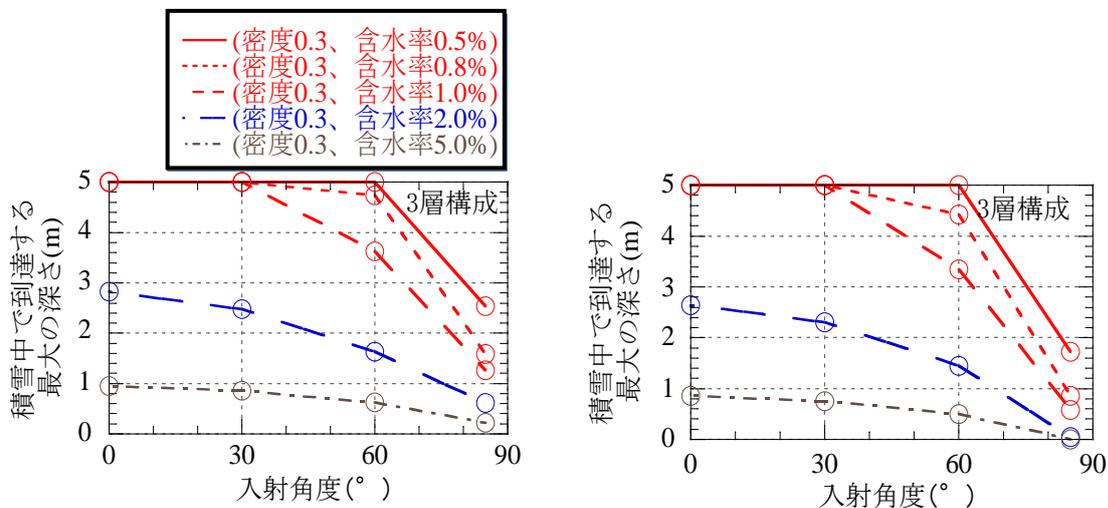
図 3.1.11～図 3.1.14 の結果から、垂直偏波と水平偏波で殆ど同じ結果であることがわかった。

3.1.1.5 3層モデルでの積雪中の最大通信可能距離の理論検討

垂直偏波と水平偏波で伝搬損失の深さ特性に殆ど差がないことが分かった。そこで、ここでは垂直偏波での最大通信可能距離を計算する。重要なパラメータとして、積雪中で許容される伝搬損失（許容伝搬損失）があり、許容伝搬損失が大きい程、最大到達距離を大きく（深く）できる。

図 3.1.9 に示す 3 層構造（積雪の最大の深さ 5m）において、冬期のニセコの含水率 0.5%、入射角度 60° において深さ 5m まで伝搬するためには、図 3.1.11 より 2.1GHz では平均伝搬損失は 12dB となる。当該 12dB にマージンを見込み許容伝搬損失を 20dB とした場合の入射角度と最大到達距離の関係を、雪質をパラメータとして図 3.1.15(a) に示す。横軸は入射角度であり、縦軸は最大到達距離である。

また、3 層構造（積雪の最大の深さ 5m）において、冬期のニセコの含水率 0.5%、入射角度 60° において深さ 5m まで伝搬するためには、図 3.1.12 より 1.5GHz では平均伝搬損失は 6dB となる。当該 6dB にマージンの見込み許容伝搬損失を 10dB とした場合の、入射角度と最大到達距離の関係を、雪質をパラメータとして図 3.1.15(b) に示す。横軸は入射角度であり、縦軸は最大到達距離である。



(a) 2.1GHz、許容伝搬損失 20dB の場合

(b) 1.5GHz、許容伝搬損失 10dB の場合

図 3.1.15 積雪中での最大到達距離特性

これらの条件の場合、積雪中の最大通信可能距離は、含水率が高くなるほど、入射角が大きくなるほど、また、周波数が低くなるほど、雪中で通信可能な深さが浅くなる。さらに、これらの条件の場合の冬期のニセコ (含水率 0.5%)及び春期のニセコ (含水率 1%、2%)における積雪中の最大通信可能距離の一例は、次のとおりとなる。

○冬期のニセコ (含水率 0.5%)

- ・携帯・スマホ等電波 (2.1GHz) : 入射角度 60° 以下の場合、深さ 5m まで通信可能
- ・GPS電波 (1.5GHz) : 入射角度 60° 以下の場合、深さ 5m まで通信可能

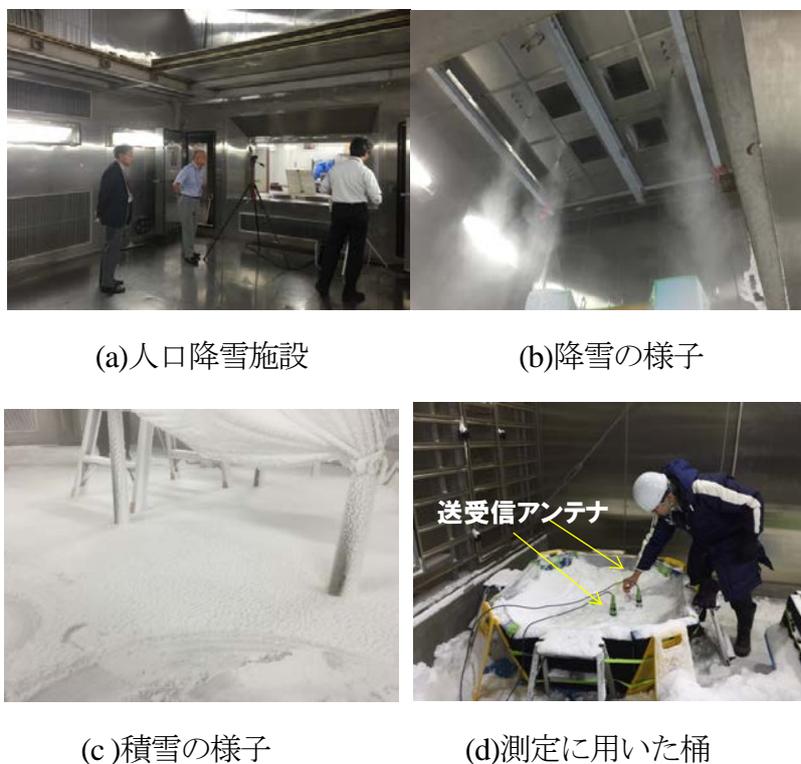
○春期のニセコ (含水率 1%、2%)

- ・携帯・スマホ等電波 (2.1GHz) :
 - 入射角度 60°、含水率 1%の場合、深さ 3.8m まで通信可能
 - 入射角度 60°、含水率 2%の場合、深さ 1.7m まで通信可能
- ・GPS電波 (1.5GHz) :
 - 入射角度 60°、含水率 1%の場合、深さ 3.2m まで通信可能
 - 入射角度 60°、含水率 2%の場合、深さ 1.5m まで通信可能

3.1.2 人工降雪室での電波伝搬実験

事前検討として、積雪がない期間 (9月~11月) には人口降雪施設で基本検討を行った。図 3.1.16 は人口降雪施設および測定の様子を示す。人口降雪部の桶を設置して

自然の積雪を模擬した。桶の深さは 70cm である。この桶は桶の壁での反射等を除去するために電波吸収帯で作成している。



(a)人口降雪施設

(b)降雪の様子

(c)積雪の様子

(d)測定に用いた桶

図 3.1.16 人口降雪施設

3.1.2.1 雪の誘電率の測定

積雪中の電波伝搬特性は雪の誘電率特性に影響を受ける(3.2.3.1)。積雪の誘電率は雪の密度と含水率、使用する周波数で決定される。積雪の誘電率を ϵ_{ws} とおくと、 ϵ_{ws} は次式で与えられる(3.2.3.1)。

$$\begin{aligned} \epsilon_{ws} &= \epsilon_{wsr} - j\epsilon_{wsi} \\ \epsilon_{wsr} &= 1.0 + 1.83\rho_s + 0.02m_v^{1.015} + \frac{0.073m_v^{1.31}}{1 + (f/9.07)^2} \\ \epsilon_{wsi} &= \frac{0.073(f/9.07)m_v^{1.31}}{1 + (f/9.07)^2} \end{aligned} \quad (3.2.3.1)$$

ここで、 ϵ_{wsr} は実部、 ϵ_{wsi} は虚部、 ρ_s は雪の密度、 m_v は雪の含水率、 f は周波数を表す。

雪の誘電率を測定するために雪の密度と含水率を測定した。表 3.1.2 は測定諸元を示す。

表 3.1.2 人口降雪の誘電率の測定諸元

測定場所	人口降雪施設(大阪府、神奈川県)
温度計	Toloyo デジタル温湿度計
質量計	島津製作所 電子上皿天秤
スノーサンプラー	角型密度サンプラー(100cm ³)
含水率計	Denoth式含水率計

図 3.1.17(a)~(d)はそれぞれ測定に用いた温度計、スノーサンプラー、質量計、含水率計を示す。



(a)温度計 (b)スノーサンプラー (c)質量計 (d)含水率計

図 3.1.17 雪の誘電率の測定器材

図 3.1.18 は測定の一例として、含水率の測定の様子を示す。人口降雪施設における雪の密度 ρ_s は0.2g/cm³、含水率 m_v は0.1%であり、12月のニセコの雪質とほぼ同じであった。



図 3.1.18 測定の様子 (含水率の測定)

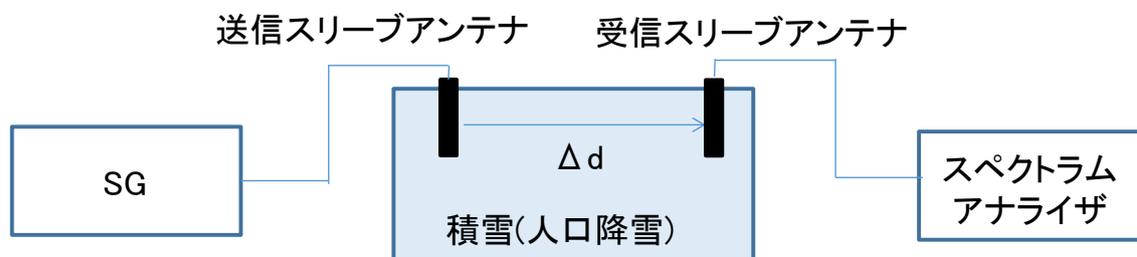
3.1.2.2 基準アンテナを用いた積雪中の伝搬損失特性 (単層構造)

本章では、基準アンテナを用いて、単層構造の積雪中の電波伝搬損失測定を行った。表 3.1.3 は測定諸元を示す。

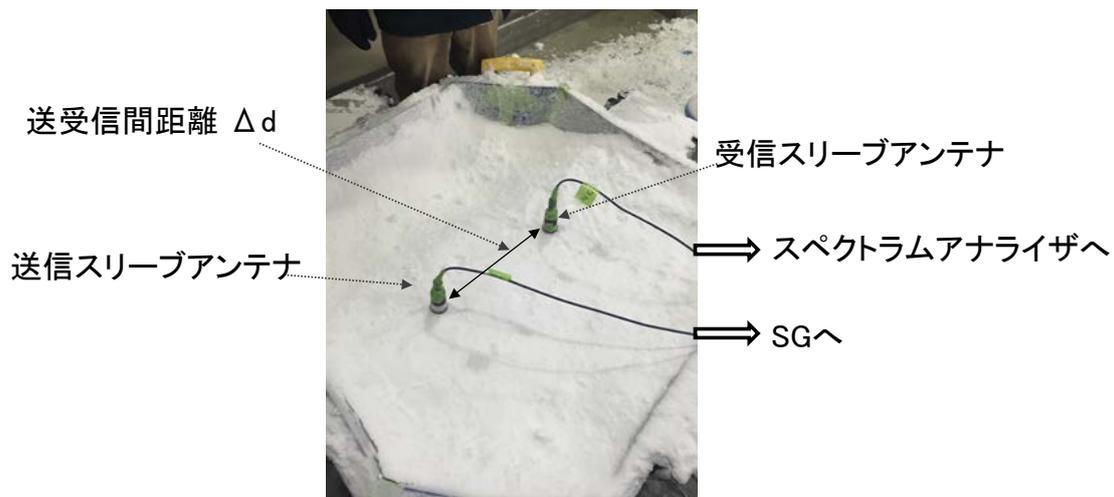
表 3.1.3 基準アンテナを用いた積雪中における測定諸元(単層構造)

測定場所	人工降雪施設(大阪府、神奈川県)
周波数	2.1GHz、5.77GHz
送受信間距離	0.1m~1m
密度	0.2g/cm ³
含水率	0.1%
気温	-10°C、-5°C

図 3.1.19 は測定構成と測定の様子を示す。送受信アンテナは共にスリーブアンテナ(利得 2.14dBi)を用いた。周波数は 2.1GHz、5.77GHz であり、送受信間距離 Δd に対する伝搬損失を測定した。



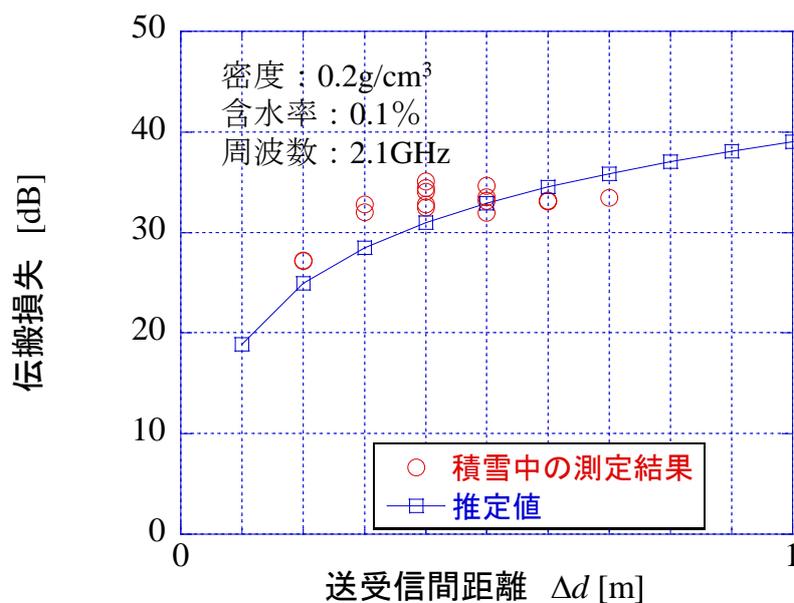
(a) 測定構成



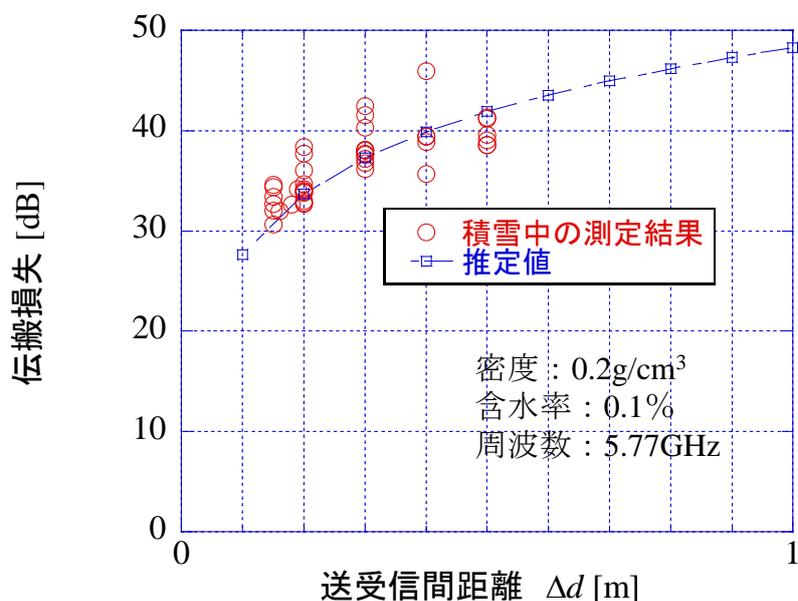
(b) 測定の様子

図 3.1.19 測定構成と測定の様子

図 3.1.20 に一例として -10°C における 2.1GHz と 5.77GHz の測定結果を示す。送受信間距離が大きくなるほど、また、周波数が高くなるほど、伝搬損失が大きくなることがわかる。また、式 3.2.3.1 を用いて推定を行った。人口降雪施設の雪質は、 $\rho_s=0.2\text{g/cm}^3$, $m_v=0.1\%$ であり、これを用いて計算した伝搬損失の推定結果を図 3.1.21 に併せて示す。推定結果と測定結果はよく一致していることがわかる。



(a) 2.1GHz(-10°C)の測定結果と推定結果



(b) 5.77GHz(-10°C)の測定結果と推定結果

図 3.1.20 測定結果と推定結果

3.1.2.3 基準アンテナを用いた積雪中の伝搬損失特性(3層構造)

本章では、基準アンテナを用いて、空気→積雪→空気の2層構造における電波伝搬損失測定を行った。表 3.1.4 は測定諸元を示す。

表 3.1.4 基準アンテナを用いた積雪中における測定諸元(2層構造)

測定場所	人口降雪施設(大阪府)
周波数	2.1GHz, 5.77GHz
送信アンテナ	スリーブアンテナ(利得:2.14dBi)
受信アンテナ	スリーブアンテナ(利得:2.14dBi)
送受信間距離	55cm~90cm
雪温	-10°C

図 3.1.21 は測定構成を示す。送受信アンテナは共にスリーブアンテナ(利得 2.14dBi)を用いた。周波数は 2.1GHz、5.77GHz であり、送受信間距離 Δd に対する伝搬損失を測定した。

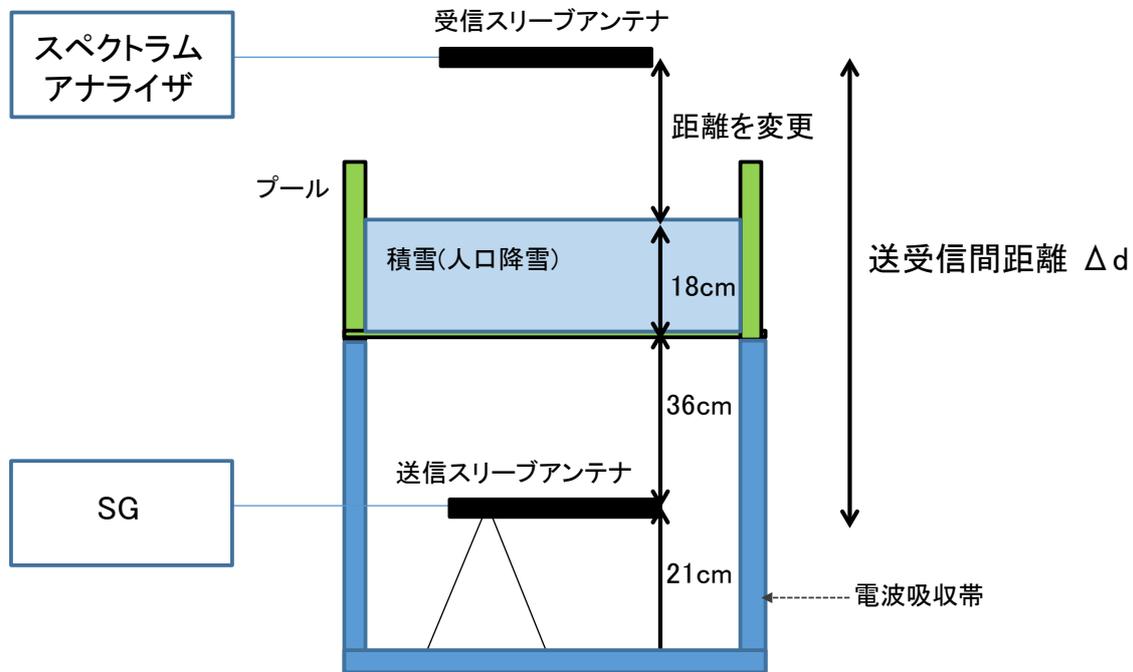
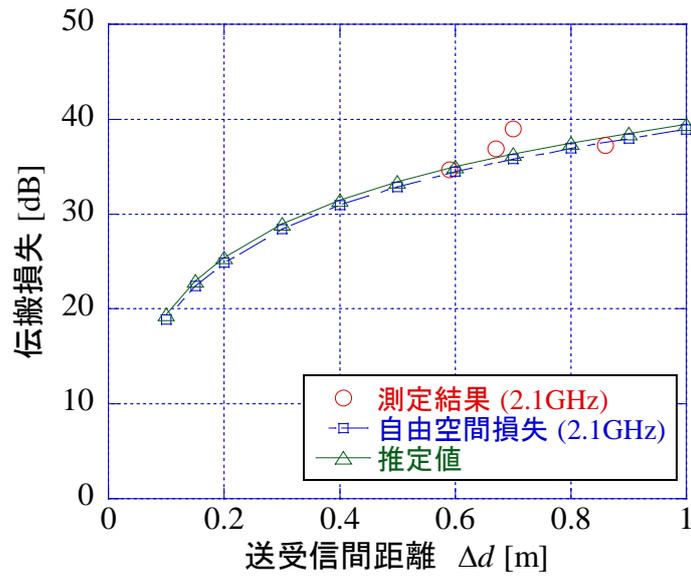
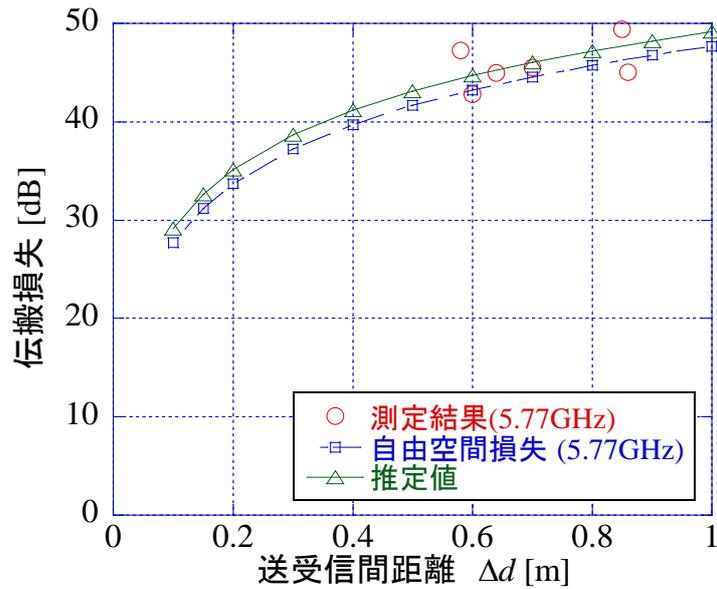


図 3.1.21 測定構成

図 3.1.22 に測定結果を示す。送受信間距離が大きくなるほど、また、周波数が高くなるほど、伝搬損失が大きくなることがわかる。伝搬損失の推定結果を図 3.1.22 に併せて示す。推定結果と測定結果はよく一致していることがわかる。また、自由空間損失も併せて示す。伝搬損失と自由空間損失の誤差の平均値は 2.1GHz の場合 1.1dB、5.77GHz の場合 1.3dB であり、空気→積雪(-10°C)→空気という 2 層構造において上記の追加損失が発生した。



(a) 2.1GHz の測定結果と推定結果



(b) 5.77GHz の測定結果と推定結果

図 3.1.22 測定結果と推定結果

3.1.2.4 参考文献

[3.2.3.1] T. Abe, etrl, “Experimental study of microwave transmission in snowpack “, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 28 [5], pp.915-921 (1990)

3.1.3 GPSを用いた位置特定の検討

一般にGNSS受信機が積雪に埋もれた場合、積雪で電波が減衰する。そこで、市販のGNSS受信機に損失を付加し、一定の測位精度を保つために必要な最大の損失を測定する（以下許容損失を定義する）。

3.1.3.1 許容損失の測定諸元

表 3.1.5 は測定諸元を示す。

表 3.1.5 許容損失の測定諸元

測定場所	東京都江東区 屋外駐車場	東京都江東区 ビル屋内
測定環境	全天 (周辺にビルがあるが全天が見通せる環境)	半天 (窓から南側の半天が見通せる環境)
受信アンテナ	パッチアンテナ (利得 2.6 dBi)	

3.1.3.2 許容損失の測定構成

図 3.1.23 は測定構成を示す。GNSS受信機のアンテナと受信機の中に減衰器(ATT)を挿入し、減衰量と測位誤差を測定した。測定は東京都江東区屋外で図 3.1.24 に示すように周辺にビルがあるが全天が見通せる環境と、東京都江東区ビル屋内で図 3.1.25 に示すように窓から南側の半天が見通せる環境で測定を実施した。

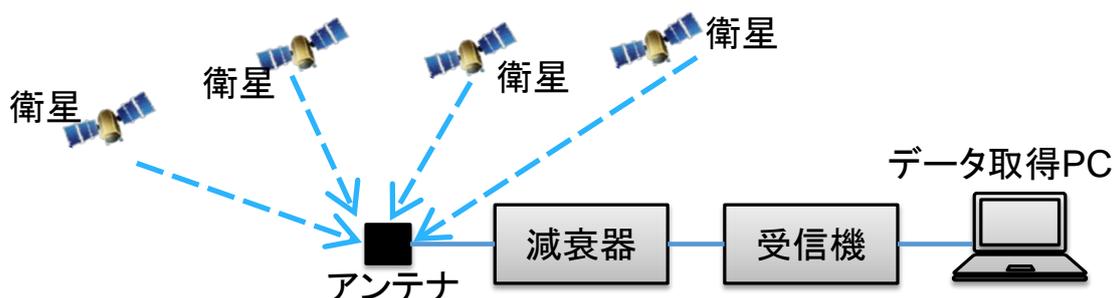


図 3.1.23 測定構成

全天(周辺にビルがあるが全天見通せる環境)



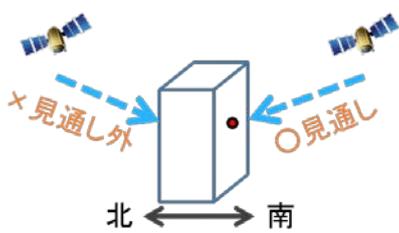
(a)測定環境



(b)測定の様子

図 3.1.24 全天環境での測定の様子

半天(南側が見通せる環境)



(a)測定環境

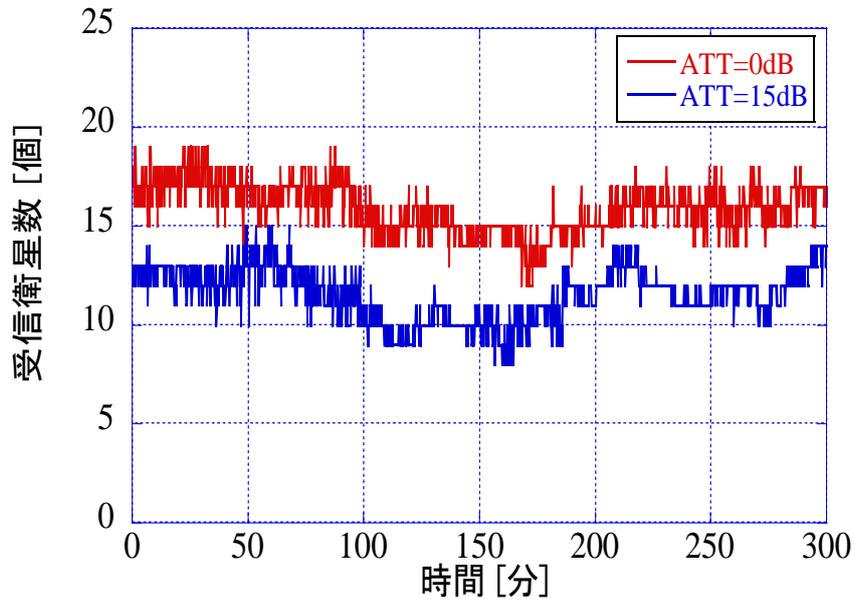


(b)測定の様子

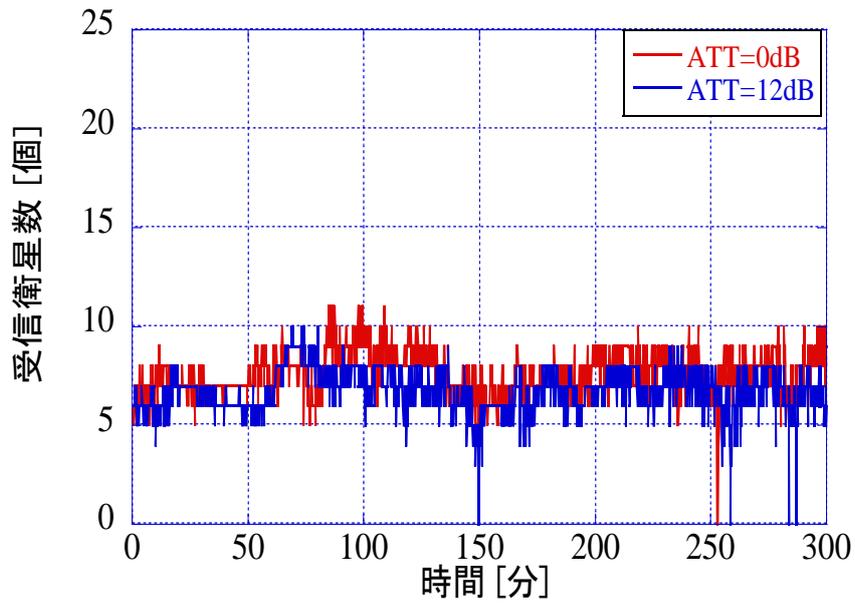
図 3.1.25 半天環境での測定の様子

3.1.3.3 許容損失の測定結果

図 3.1.26(a)は一例として $ATT=0\text{ dB}$ と $ATT=15\text{ dB}$ とした場合の全天環境での検出したGPS衛星数の時間特性を、図 3.1.26(b)は $ATT=0\text{ dB}$ と $ATT=12\text{ dB}$ とした場合の半天環境における検出したGPS衛星数の時間特性を示す。また、図 3.1.27(a)は一例として $ATT=0\text{ dB}$ と $ATT=15\text{ dB}$ とした場合の全天環境での測位誤差の時間特性を、図 3.1.27(b)は $ATT=0\text{ dB}$ と $ATT=12\text{ dB}$ とした場合の半天環境における測位誤差の時間特性を示す。GPS衛星の位置関係や受信できるGPS衛星数が変わることから測位誤差が変化することがわかる。また、 $ATT=0\text{ dB}$ の場合、検出されたGPS衛星数の中央値は全天環境では16個、半天環境は8個であり2倍の差がある。 $ATT=0\text{ dB}$ の場合、測位誤差の中央値は、全天環境では約3.5m、半天環境では約9mである。

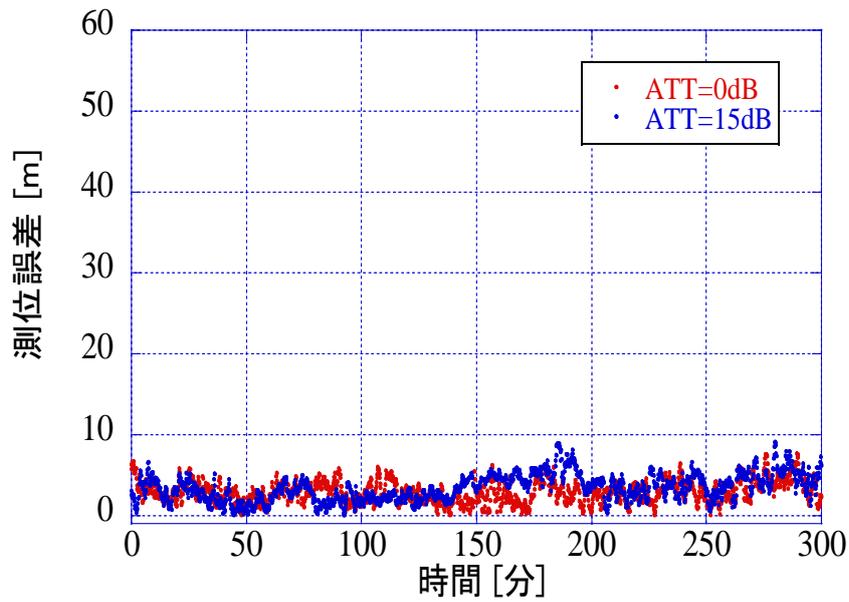


(a) 全天環境

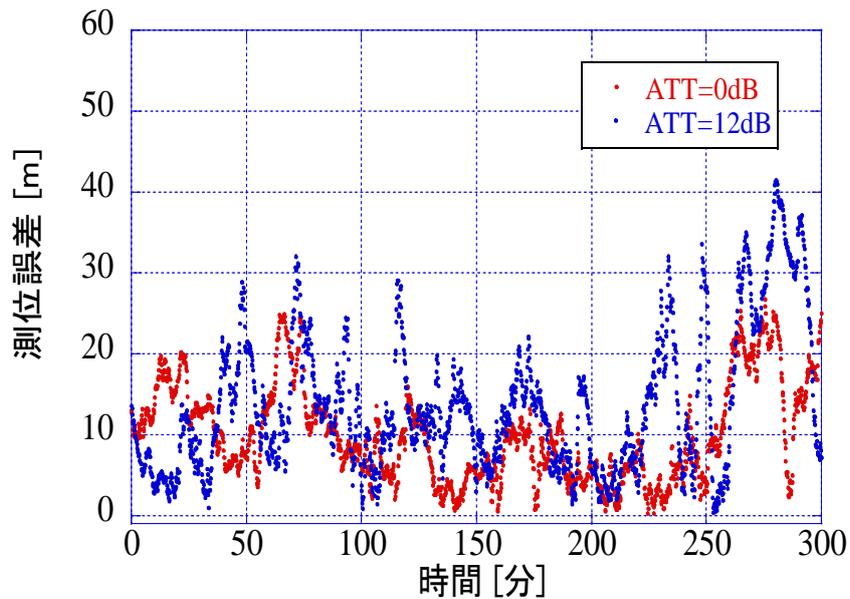


(b) 半天環境

図 3.1.26 検出したGPS衛星数の時間特性



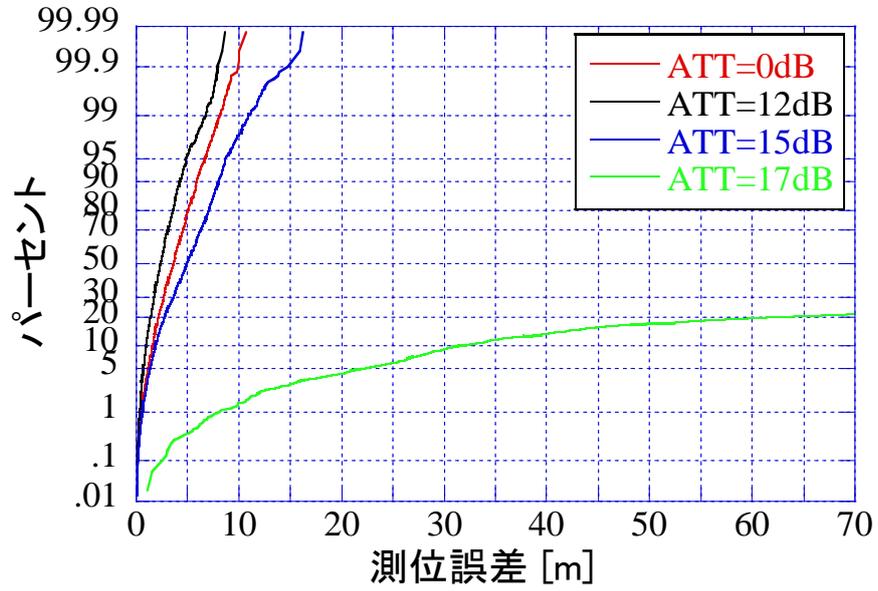
(a) 全天環境



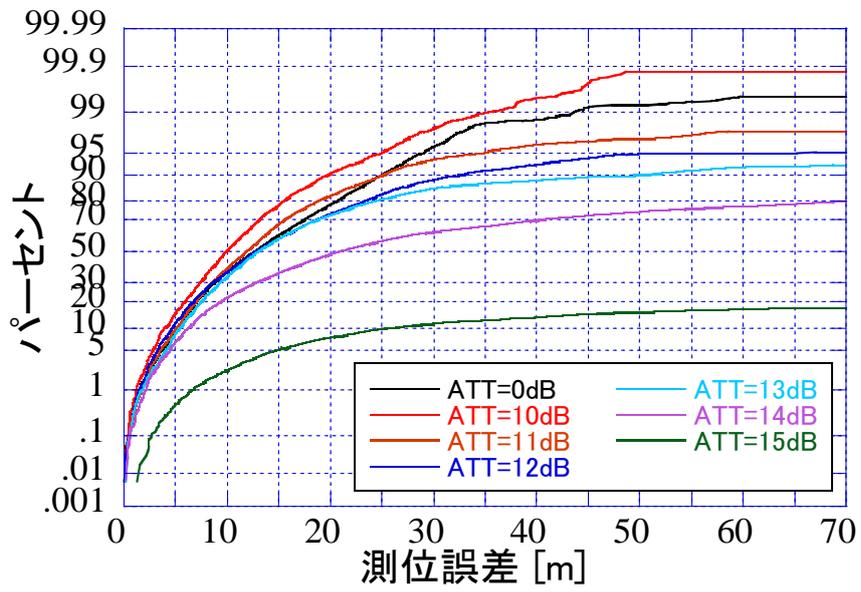
(b) 半天環境

図 3.1.27 測位誤差の時間特性

図 3.1.28(a)は ATT をパラメータとして、全天環境での測位誤差の累積確率を、図 3.1.28(b)は半天環境での測位誤差の累積確率を示す。全天環境の場合、ATT=15 dB 以下では、ATT=0 dB の場合と殆ど変わらない。また、ATT=15 dB を超えると測位誤差が徐々に大きくなる。一方、半天環境の場合、ATT=12 dB 以下では、ATT=0 dB の場合とほとんど変わらない。また、ATT=12 dB を超えると測位誤差が徐々に大きくなる。今回測定に用いたGNSS受信機の許容損失は12~15dBであることがわかった。



(a) 全天環境



(b) 半天環境

図 3.1.28 測位誤差の累積確率

3.1.4 無線中継システムの実験構成

雪山やスキー場における遭難者の位置特定手法として、遭難者の所有するGPS機能付携帯端末の位置情報をネットワーク上から取得する方法が検討されている。この場合、携帯端末は移動通信サービスへの接続が前提となっており、雪中深くに埋没した携帯端末やサービスエリア外で圏外となる携帯端末では利用できない。このような携帯端末との通信を迅速に確保する手段として、簡易かつ迅速に通信エリアを構築する必要がある場合、基地局から離れた位置にリピータを設置し、基地局の電波をそのまま増幅して中継する無線中継システムを用いた構成が有効と考えられる。

また、図 3.1.29 に中継局アンテナ高とエリア半径の関係の一例を示す。一般的に、無線中継システムでは、リピータのアンテナ高を高くすることで中継距離の増大とカバレッジエリアの拡大を同時に図ることができる。中継局アンテナ高が 40m の時にセル半径が 3km である基地局において、アンテナ高を 10m と低く設定した場合と 100m と高く設定した場合のセル半径の推定結果を図 3.1.29 に示す。但し、周波数を 2.1GHz、伝搬損失推定式として 拡張坂上式を用いて計算した。図より中継局アンテナ高を 100m に設定すればセル半径を 5km 以上取れることがわかる。

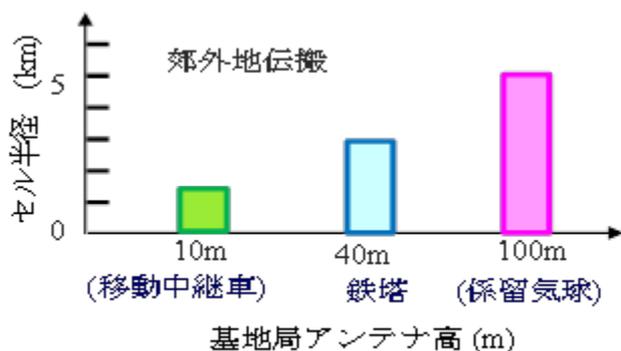


図 3.1.29 基地局アンテナ高とセル半径

以上から、本検討では遭難者の位置特定システムで使用する無線通信回線として、移動通信の電波を空から係留気球を用いて中継する構成とドローンを用いて中継する構成（図 3.1.30）を構築したので、その概要について説明する。



図 3.1.30 係留気球を用いた実験構成とドローンを用いた実験構成の外観

3.1.4.1 係留気球又はドローンを用いた実験

図 3.1.31 に係留気球を用いた実験構成を示す。本実験構成は「無線中継システム」、「係留気球」、「電力供給・監視制御システム」で構成される。

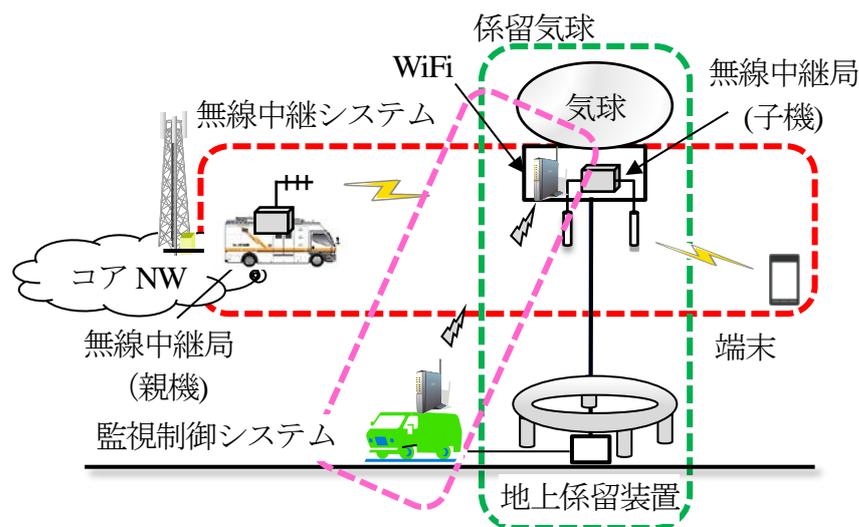


図 3.1.31 係留気球を用いた実験構成

ドローンを用いた実験構成は「無線中継システム」、「ドローン」で構成される。ドローンは、電波発射を伴う実験ではウインチを用いたリール係留により固定設置を行った。係留気球を用いた実験構成は、現地（遭難場所）到着後、地上係留システム（ウインチ）の設置、気球にヘリウムガスを注入して膨らませる作業等のため、運用開始までに4時間程度を要するため、遭難場所到着後、係留気球に比べ迅速な無線中継が可能となると考えられる。一方、バッテリー容量の制約からドローンの飛行時間は、現状20分程度と短時間となることが課題である。

表 3.1.6 に係留気球を用いた実験構成とドローンを用いた実験構成の特徴をまとめる。係留気球を用いた実験構成は地上からの電源供給により約1ヶ月間の連続運用が可能であり、長期間の遭難者捜索で利用できる。一方、ドローンを用いた実験構成はバッテリー駆動のため連続稼働時間は短い、迅速な初動対応により遭難者の救出に期待される。

表 3.1.6 係留気球を用いた実験構成とドローンを用いた実験構成の特徴

	ドローンを用いて中継する構成	係留気球を用いて中継する構成
設営時間	数10分	2～3時間
連続稼働時間	20分	24時間×1ヶ月
給電方式	バッテリー	地上給電(係留線)

3.1.4.2 無線中継システム

係留気球又はドローンを用いた実験構成では、気球又は搭載する無線中継装置を極力軽量化するため、構成が簡易な非再生無線中継システム(リピータ)を採用している。非再生無線中継システムは図 3.1.32 に示すように無線中継元基地局(親機)と無線中継局(子機)から構成される。

本実験構成で採用したリピータの無線中継用アンテナと対移動局用アンテナの離隔距離を大きく取れない(1m以下)。そのため、同一周波数を増幅するリピータでは送受信アンテナ間の電波の回り込みが大きくなり、中継増幅器の利得を最大送信電力となるように設定できない。そこで本システムでは中継周波数と対移動局周波数を異ならせることで電波の回り込みを回避し、最大送信電力で常時送信できる周波数変換リピータを採用している。

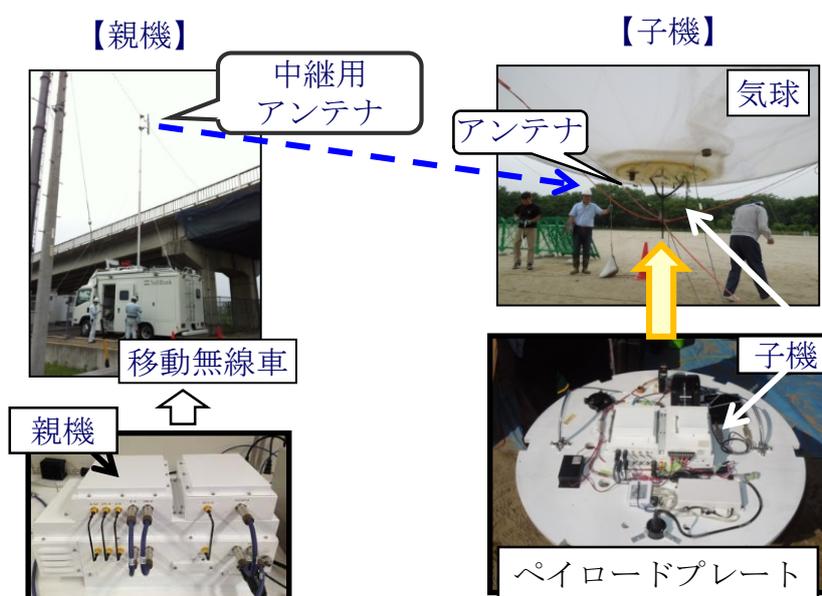


図 3.1.32 非再生無線中継システム

本実験構成は LTE 及び W-CDMA に対応している。また、無線中継は昼夜を問わず連続で中継する必要があるため、連続した電源供給が不可欠である。本実験構成では、地上から電線を用いて直流電源(DC)を供給する方法を用いて、長期間の無線中継を行っている。

また、雪中に埋没した携帯端末により近い場所から電波を発射することができ、携帯端末の上空から電波を発射することから、電波が雪面に入射する際の透過損失を減らすことができ、雪中深くに埋没した携帯端末に電波を届けて、携帯電話ネットワークに通信接続させることができる。

図 3.1.33 に係留気球を用いて中継する構成とドローンを用いた全体の実験構成を示す。

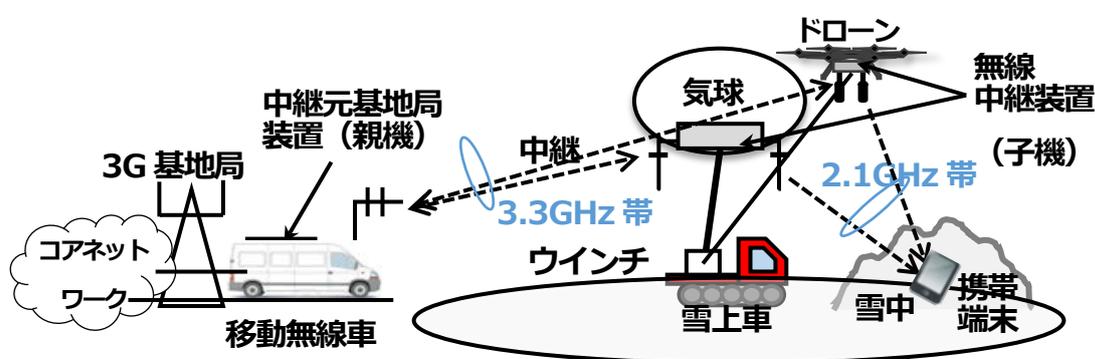


図 3.1.33 無線中継システムの全体構成

本無線中継システムは、移動無線車の無線機に接続された中継元基地局装置（親機）と係留気球又はドローンに搭載された無線中継装置（子機）で構成される。親機では移動無線車に搭載された無線機からの LTE/W-CDMA 信号 (2.1GHz 帯) を 3.3GHz 帯の中継周波数に周波数変換し、係留気球又はドローンの子機に向けて送信する。

子機では受信した 3.3GHz 帯の信号を 2.1GHz 帯の元の送信周波数に変換後、増幅して中継エリアに送信する。このように周波数を変換することで同一周波数の回り込みを無くし、中継装置の利得を最大利得で活用できる[3.1.4.3](P47「3.1.4.8 参考文献」[3.1.4.3] 参照)。そのため、中継距離を増大できるとともに雪中深くに埋没した携帯端末との通信を確保できる。

図 3.1.34 に示すように、係留気球又はドローンに搭載する子機は同一の軽量化した無線中継装置を、また親機も同一の基地局装置を使用している。

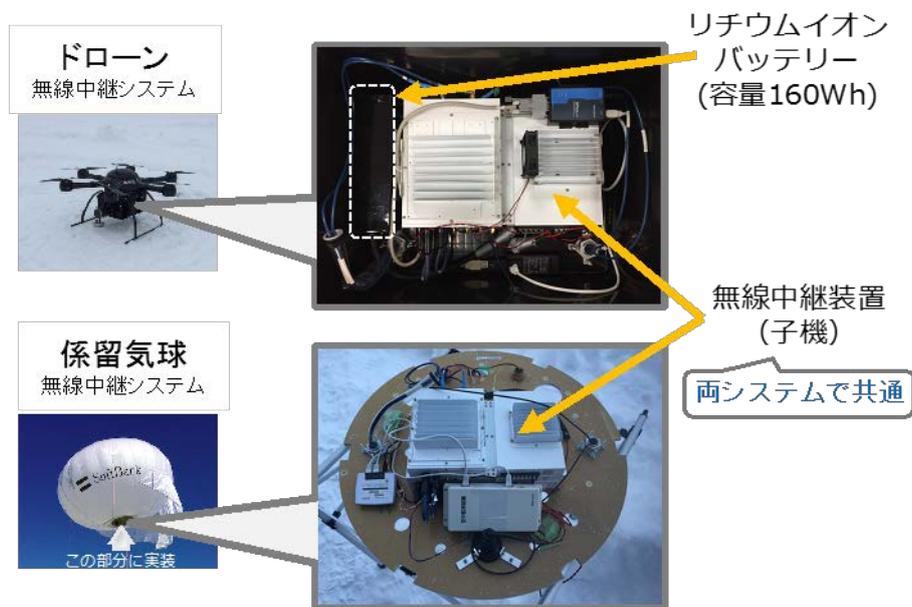


図 3.1.34 係留気球又はドローンに搭載する無線中継装置（子機）

無線中継システムを構成する中継元基地局装置（親機）と無線中継装置（子機）の諸元を表 3.1.7 に、外観を図 3.1.35 にそれぞれ示す。

表 3.1.7 中継元基地局装置（親機）と無線中継装置（子機）の諸元

項目	中継元基地局装置(親機)	無線中継装置(子機)	
		対親機	対移動機
通信方式	LTE(OFDMA), W-CDMA(DS-CDMA)		
送信周波数	3375MHz ~3395MHz	3305MHz ~3325MHz	2150MHz ~2170MHz
受信周波数	3305MHz ~3325MHz	3375MHz ~3395MHz	1960MHz ~1980MHz
信号帯域幅	LTE : 5MHz, 10MHz, 15MHz, 20MHz W-CDMA : 5MHz		
送信電力	2W(1W×2)	1W	10W(1W×2)
アンテナ種別	パッチアレイ アンテナ	コリニアアンテナ (水平面無指向)	コリニアアンテナ (水平面無指向)
アンテナ利得	20dBi	6dBi	6dBi
最大中継 距離	5km (親機 ↔ 子機が見通し)		郊外地: 半径 3km 開放地: 半径 5km



図 3.1.35 中継元基地局装置（親機）と無線中継装置（子機）の外観

本無線中継装置は 5MHz 帯域の W-CDMA 信号（1 波）に加えて、最大 20MHz 帯域の LTE 信号をそのまま周波数変換して中継する非再生周波数変換方式のリピータである。

一般に、係留気球又はドローン等にリピータを搭載する場合、飛行体のサイズの制約により中継用アンテナと対移動局用アンテナの離隔距離を大きく取るとは難しい（1m 以下）。そのため、同一周波数を増幅する非再生リピータではアンテナ間の電波の回り込みが大きくなり、増幅器の利得を大きく取ることができない。そこで本無線中継システムではアンテナ間の回り込みを回避できる非再生周波数変換方式を採用した。

本装置では親機と子機の間の中継用周波数として 3.3GHz 帯を、対移動局へのアクセス周波数として 2.1GHz 帯を使用している。このように、異なる周波数を用いることで、子機に近接して設置される中継用アンテナと対移動局用アンテナ間の同一周波数の回り込みを回避できることから、子機は常に最大電力の電波を送信することが可能となり、広いサービスエリアを確保することができる。また、構成が簡易な非再生中継方式を採用することで、係留気球およびドローンに搭載する無線中継装置重量も極力軽量化した。

さらに本無線中継装置では、デジタルフィルタを用いることで装置重量を増やすことなく LTE / W-CDMA の柔軟な周波数割り当てに対応した。図 3.1.36 に LTE / W-CDMA の周波数割り当て例を示す。複数のフィルタ（フィルタバンク）を用いる方法では、LTE の様々な周波数帯域幅に対応する場合、周波数帯域幅毎に個別のフィルタが必要になるが、デジタルフィルタでは 1 つのデジタル回路で LTE の様々な周波数帯

域幅に対応できる。また、同図に示すように LTE システムと W-CDMA システムを両方同時に利用することも可能である。

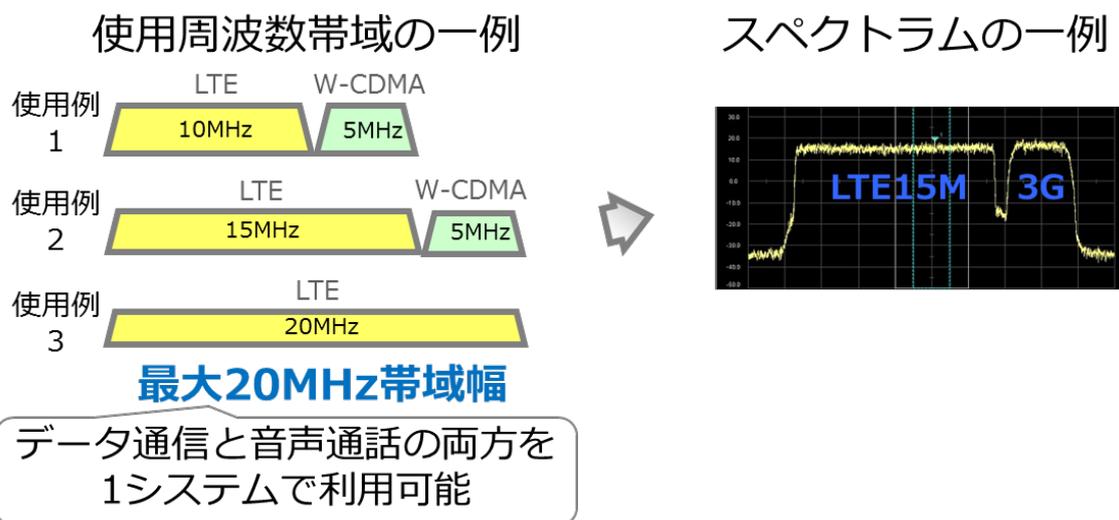


図 3.1.36 LTE/W-CDMA の周波数割り当て例

本無線中継装置では親機および子機に下り回線用の中継器を2系統実装し、図3.1.37に示すように2系統の信号をそのまま中継することで、下り回線の2×2MIMO 伝送に対応している。20MHz 帯域幅の LTE 信号を中継することで最大 150Mbps の通信速度に対応する。なお、親機の送信電力は2W であり、子機の対親機向けの送信電力は1W、中継エリア向けの送信電力は10W である。

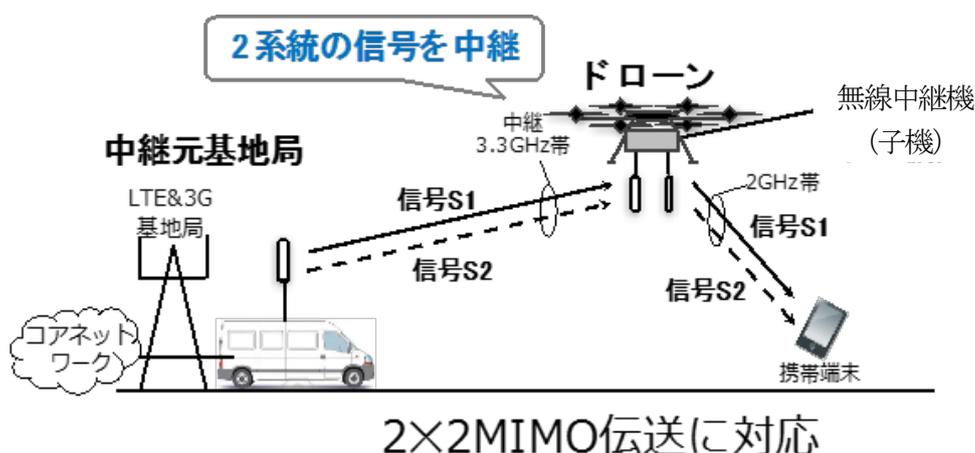


図 3.1.37 無線中継装置の下り回線無線中継方式

ところで、子機のアンテナを係留気球又はドローンに固定すると、その傾きによりアンテナ指向特性が大きく変わるため、サービスエリアを一定に保つことが難しい。そこで、アンテナが常に鉛直方向を向くように姿勢制御を受動的に行うアンテナ機構部を開発した(図 3.1.38)。このアンテナ機構部によりアンテナは常に鉛直方向を向き、サービスエリアを一定に保つことができる。係留気球又はドローンに搭載する子機のアンテナは対親機向けと中継エリア向けに利得が約 6dBi の水平面内無指向性の VH 偏波共用アンテナを用いた。子機のアンテナでは、図 3.1.39 に示すように 1 つの筐体に V 偏波素子と H 偏波素子を内蔵しており、直交偏波を利用することで雪中端末の傾きによる受信レベルの低下を低減している。親機のアンテナは利得が約 20dBi の VH 偏波共用セクタアンテナを用いている。

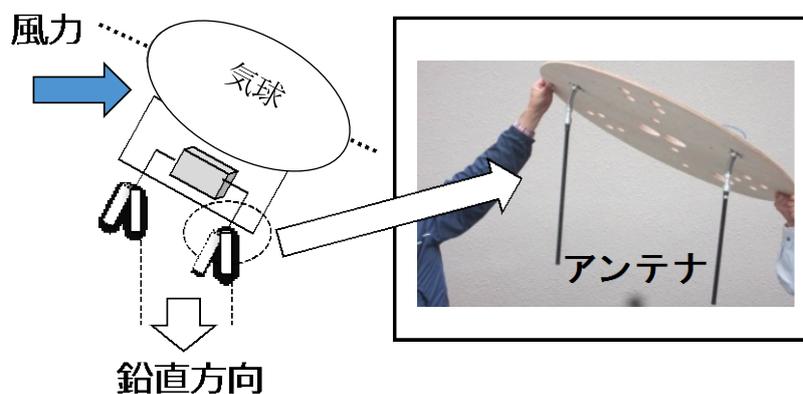


図 3.1.38 アンテナ姿勢制御

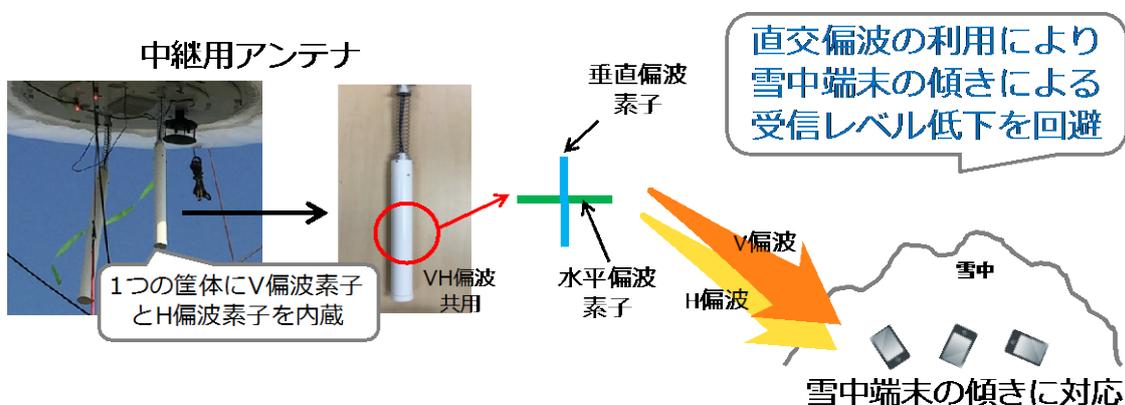


図 3.1.39 子機用 VH 偏波共用アンテナ

3.1.4.3 係留気球

係留気球は地上から1本の係留索で固定する一本係留気球を用いた。図3.1.40に係留気球システムの構成を、図3.1.41に係留気球の外観を、表3.1.8に係留気球の諸元を示す。係留気球は同図に示すように気球本体と地上係留装置（ウインチ）で構成される。

スクープ付扁平気球

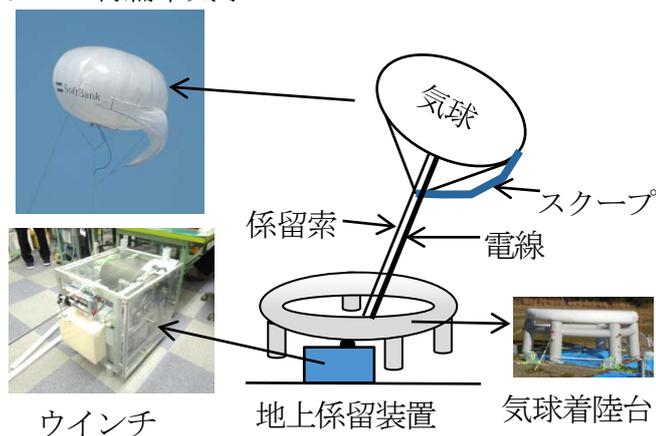


図3.1.40 係留気球



図3.1.41 係留気球の外観

表 3.1.8 係留気球の諸元

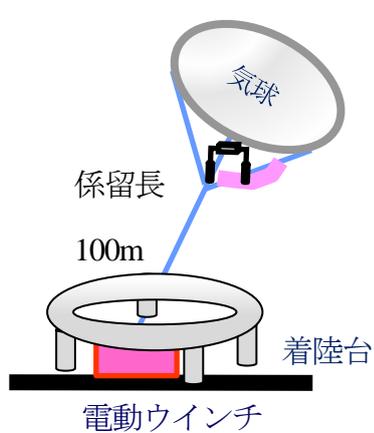
項目	値	備考
大きさ	直径:5.2m × 高さ:3m	スcoop付
容積	42m ³	
係留方法	1点係留	
充填する気体	ヘリウムガス	不燃性
積載重量	10kg以下	係留線、電線を含む

係留気球に搭載される無線中継装置（リピータ）は、図 3.1.35 に示すようにペイロードプレートに固定され、気球内部の搭載機器格納部に収納される。一方、アンテナは気球下部に露出する。無線中継装置の電源は係留索に編み込まれた電線を用いて地上から供給（DC250V）しており、長期間の気球係留及び無線中継が可能である。

地上係留装置（ウインチ）は地上に固定され、係留索により気球を係留する。気球の昇降はウインチに搭載された電動モータで行う。尚、本検討では図 3.1.41 に示すように、雪上車上に設置したウインチから気球を係留することで、柔軟な設置が可能である。

気球は風速、風向に対する安定性を向上させるために、スcoop（布）付扁平気球を用いている。気球の大きさは直径 5.2m、高さ 3m、容積 42m³ で、不燃性のヘリウムガスを充填する。扁平気球本体は強度の高いナイロン製二重構造であり、気球外袋の内部にはヘリウムガス用内袋、空気袋を有し加圧用ファンを備えている。気球外袋は外部の衝撃や太陽光（紫外線）から内袋を守るために用いている。この二重構造によりヘリウムガスが漏れることがなく、長期間の連続係留（6 か月以上）を可能としている。扁平気球は風速が増大すると揚力が向上し、垂直方向の安定化が図れる。一方、スcoopは常に風をはらむように動作し、横風に対して極めて高い安定性が保たれる。また、無線中継装置はペイロードプレートに搭載して気球の内側に収められ、アンテナのみが気球下部に露出していることから風力に対する抵抗が小さくなる。これらの仕組みにより、本係留気球は風速 20m/s の強風下においても安定して浮揚させることができる。地上係留装置は気球着陸台とウインチで構成され、共に杭で地上に固定される。気球着陸台は形状がドーナツ状であり浮き輪と同様の構造で、空気でその形状を維持する。一方、ウインチは気球を昇降させる係留索の巻き取り装置であり、昇降は電動モータで行う。

なお、係留気球を用いた実験構成の基本の係留方法は、遭難場所やその周辺での地上係留である。一方、雪山やスキー場での遭難者の捜索では、険しい山岳地形での機動性を重視して、図 3.1.42 に示すように雪上を自在に移動可能な雪上車（圧雪車）により気球を係留する方法も考えられる。



(a) 地上に気球を係留



(b) 雪上車に気球を係留

図 3.1.42 気球の係留方法

3.1.4.4 ドローン

図 3.1.43 と表 3.1.9 にドローンの外観と諸元をそれぞれ示す。ドローンは、サイズが幅 1.34m、奥行き 1.18m、高さ 0.72m の大型のものを使用した。使用したドローンはカーボン製の軽量な機体で、機体重量は約 10kg である。6 個のロータを搭載し、44.4V のリチウムイオンバッテリー 4 本を用いることで、10kg のペイロードを載せた状態で約 20 分の飛行が可能である。



図 3.1.43 ドローンの外観

表 3.1.9 ドローンの諸元

筐体サイズ	W:1.34m、D:1.18m、H:0.72m
ロータ数	6個
モーターピッチ	1.2m
機体重量	10kg
最大飛行時間	約20分
最大ペイロード	約10kg
最大搭載バッテリー	44.4V(12,000mA × 4本)
最大飛行可能高度	1,000m
最高速度	65km/h
飛行可能風速	最大10m

無線中継装置は 図 3.1.43 に示すようにドローンの下部に吊り下げた機器収容ボックス中に收容し、アンテナは機器収容ボックスの下部にぶら下げる形とした。

ここで無線中継装置に電源を供給するバッテリーも同ボックスに格納されており(図 3.1.43)、無線中継装置自体はバッテリーにより約 60 分の連続運用が可能である。

3.1.4.5 電力供給・監視制御システム (気球のみ)

搜索時には無線中継装置の長時間運用が期待されることから、長期間の運用を実現するために地上の電源から電線により電力を供給し、電源は、蓄電池または発動発電機としている。また、監視制御システムは本システムの運用を監視制御する。上空に係留されている気球は風の影響を大きく受けるため、許容できる風速を超えると気球を安全に係留できなくなることから、降下させるなどの対処が必要となる。そのため、監視制御システムでは上空の風速と無線中継装置の状態を監視し、適宜制御する。なお、気球監視制御装置と地上監視制御装置間のデータ通信は WiFi で行っている。

3.1.4.6 実験構成の利点

係留気球又はドローンを用いた実験構成は既存の基地局でのサービスエリア外を臨時のサービスエリア内にすることで、端末の通信を確保できる一方で、子機と積雪中に埋もれた端末との通信距離を短縮して、端末の受信電力を大きくできること、積雪中への電波の透過特性を改善できる利点もある。

既存の基地局と積雪中に埋もれた端末の位置関係を図 3.1.44 に示す。端末が基地局近傍の積雪中に埋もれている場合、基地局アンテナと端末との通信距離が小さいため伝搬損失が小さいこと、更に積雪中への入射角度が小さいため積雪中への電波の透過率が大きくなり、透過損失も小さくできる。その結果、端末へ到達する電力を大きくできるため、積雪中の深くまで通信を行うことが期待できる。

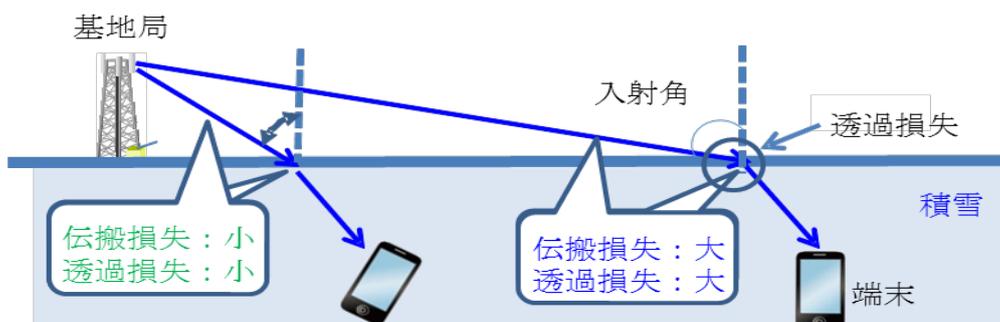


図3.1.44 既存の基地局と積雪中に埋もれた端末の受信電力

一方、端末が基地局から遠く離れた積雪中に埋もれている場合、基地局のアンテナと端末との通信距離が大きくなるため伝搬損失が増大すること、積雪中への入射角度が大きいため積雪中への電波の透過率が小さくなり、透過損失も増大する。その結果、端末へ到達する電力が小さくなり、積雪中の深くまで通信を行うことが困難となる。

また、係留気球を用いた実験構成とした場合、図 3.1.45 に示すように子機と端末の通信距離を小さくできること、積雪中への電波の入射角度も小さくできることから、積雪中の端末との通信に大幅な改善が期待できる。

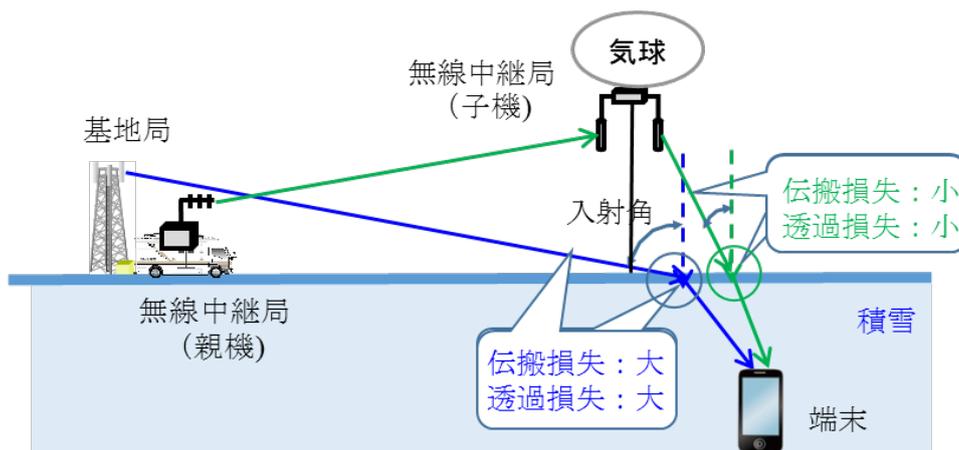


図3.1.45 係留気球を用いた実験構成と積雪中に埋もれた端末の受信電力

さらに、図 3.1.46 に示すように雪上車に係留気球（子機）を乗せて、積雪中に埋まっている端末の近辺に移動させることで、係留気球を固定設置する場合と比べて子機

端末との通信距離を更に小さくできること、積雪中への電波の入射角度を更に小さくできることから、積雪中の端末との通信に更なる改善が期待できる。

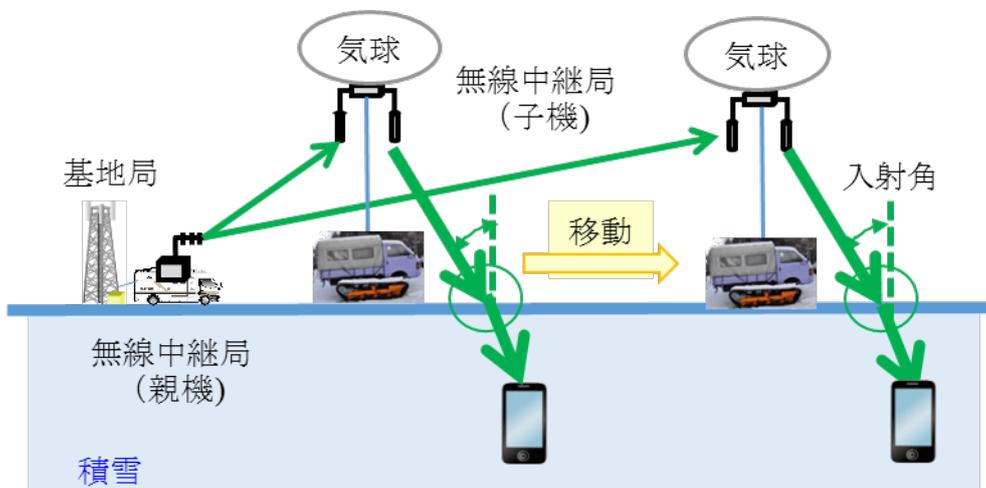


図3.1.46 雪上車で移動可能な係留気球を用いた実験構成と積雪中に埋もれた端末の受信電力

3.1.4.7 実験結果

係留気球を用いた実験構成の実験は北海道広尾郡大樹町の多目的航空公園で実施した[3.1.4.11] (P47 「3.1.4.8 参考文献」[3.1.4.11] 参照)。本実験の測定諸元を表 3.1.10 に示す。実験では中心周波数 2155MHz の LTE 信号(帯域幅 10MHz)を使用した。係留気球は係留索の長さを 100m とし、係留気球のアンテナは図 3.1.4.7 に示す 3 つのアンテナ構成 (V 偏波、V・V 偏波、V・H 偏波構成) とした。

ここで V 偏波構成は SISO 伝送であり、V・V および V・H 偏波構成は MIMO 伝送である。尚、V・V 偏波構成のアンテナ離隔距離は係留気球の底面プレートサイズの制約により 0.5m である。実験では係留気球から半径約 6km 以内の送受信間が見通しとなる複数のポイントで受信レベルとスループットを測定した。尚、受信端末は LTE 対応の携帯端末を用い、今回の実験では帯域幅が 10MHz であることから最大スループットは MIMO 適用時で 75Mbps である。

表 3.1.10 係留気球無線中継実験の測定諸元

送信周波数	2155MHz
送信信号	LTE
信号帯域幅	10MHz
送信電力	10W(5W+5W)
係留気球アンテナ	VH偏波共用アンテナ
係留気球アンテナ利得	6dBi
係留気球アンテナ高 (係留線長)	100m

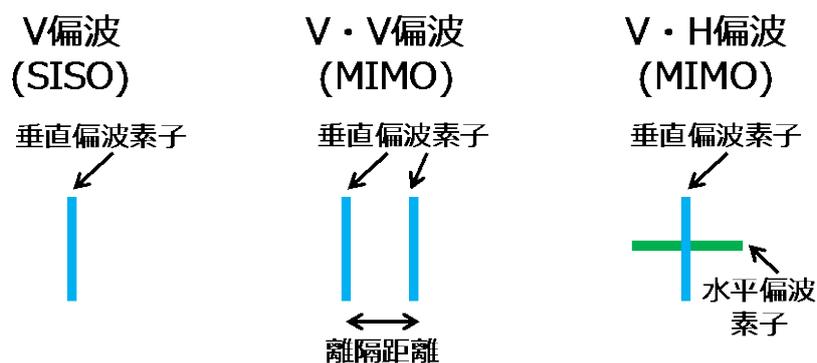


図 3.1.47 係留気球のアンテナ構成

図 3.1.48 に受信電力の測定結果を示す。同図から見通しとなる地点では、気球から 5km 離れた場合でも十分な受信電力が得られていることが分かる。

表 3.1.11 に係留気球から距離 1.8km 地点における図 3.1.47 の各アンテナ構成に対応するスループットの測定結果を示す。V、V・V、V・H 偏波構成のスループットはそれぞれ 35Mbps、53Mbps、73Mbps となった。V・H 偏波構成では、V 偏波の SISO 構成と比べて約 2 倍のスループットを実現できている。一方、V・V 偏波構成ではアンテナ離隔が十分に取れていないため、V 偏波構成と比べて 1.5 倍程度のスループットになっていることがわかる。

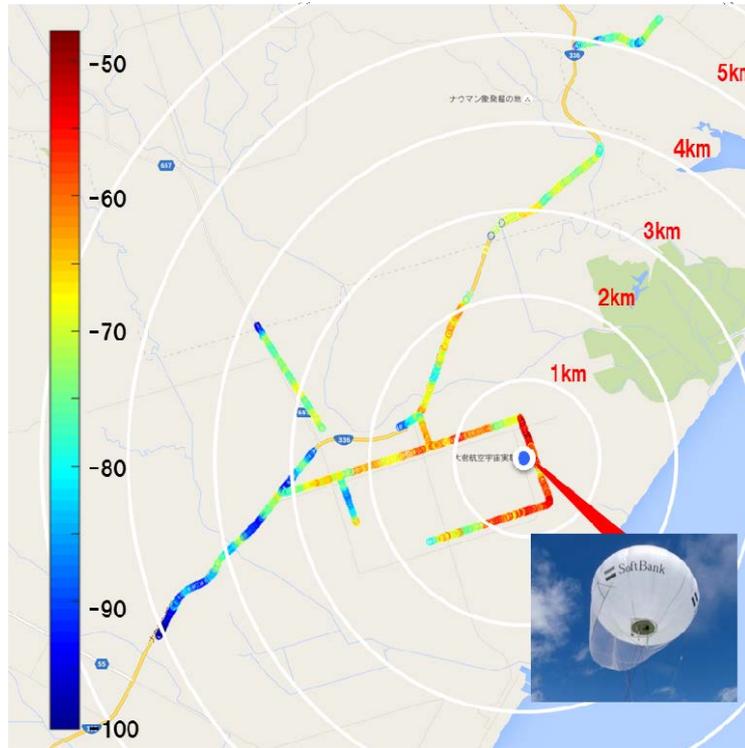


図 3.1.48 見通しとなる地点の受信電力

表 3.1.11 各アンテナ構成のスループット

アンテナ構成	SISO (V)	MIMO (VV)	MIMO (VH)
スループット (Mbps)	35	53	73

図 3.1.50 に V・H 偏波による MIMO 構成時のスループット特性を示す。同図の括弧内に V 偏波による SISO 構成のスループットを併せて示す。図からほぼ全てのポイントで V・H 偏波構成は V 偏波構成と比較して約 2 倍のスループットを実現できており、係留気球無線中継において MIMO の効果を最大限に発揮できることが確認できた。

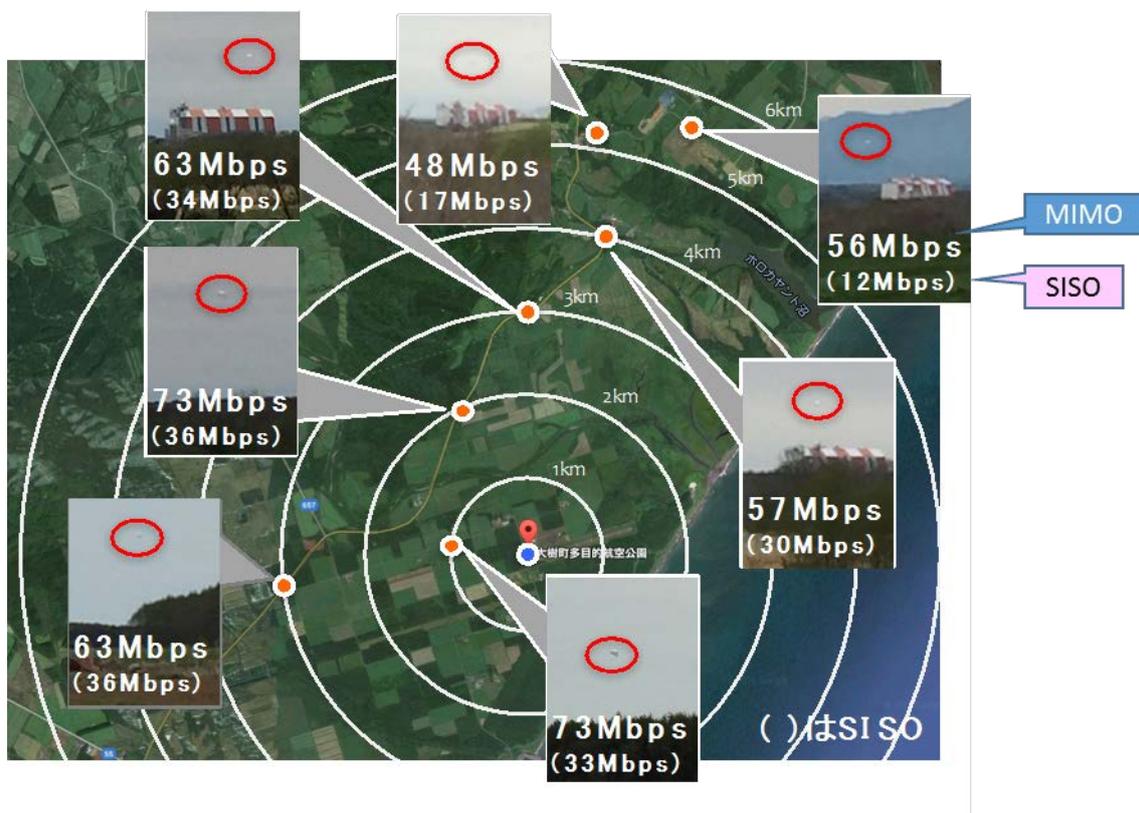


図3.1.50 V・H偏波によるMIMO構成時のスループット特性

ドローンを用いて中継する実験では、搭載している無線中継装置が、係留気球無線中継装置と同様なことから、無線中継装置を搭載した状態での飛行試験（係留線により半固定での飛行）を中心に屋内および屋外で実験を実施した。なお、ドローンを用いた無線中継実験については3.2.3章に記載する。

3.1.4.8 参考文献

- [3.1.4.1] 太田喜元, 杉田洋祐, 表英毅, 藤井輝也, ”移動通信における係留気球無線中継システム - 無線中継システム -, ”2012 信学ソ大, B-5-34, 富山, 2012年9月.
- [3.1.4.2] 杉田洋祐, 太田喜元, 表英毅, 山口良, 藤井輝也, ”移動通信における係留気球無線中継システム -実証実験結果-, ”2012 信学ソ大, B-5-36, 富山, 2012年9月.
- [3.1.4.3] 藤井輝也, 太田喜元, 中島潤一, 宮島春弥, 徳永光芳, 杉田洋祐, 表英毅, 林秀樹, ”係留気球を用いた災害対応臨時無線中継システム, ”信学技報, vol. 113, no. 37, RCS2013-26, pp. 19-24, 2013年5月.
- [3.1.4.4] 太田喜元, 藤井輝也, 中島潤一, 宮島春弥, 杉田洋祐, 表英毅, ”災害対応係留気球無線中継システムの開発, ”2013 信学ソ大, AI-3-2, 福岡, 2013年9月.

[3.1.4.5] 中島潤一, 宮島春弥, 太田喜元, 表英毅, 杉田洋祐, 林秀樹, 藤井輝也, “移動通信における係留気球無線中継システムの開発-システム概要-,” 2013 信学ソ大, B-5-16, 福岡, 2013 年 9 月.

[3.1.4.6] 藤井輝也, 中島潤一, 宮島春弥, 太田喜元, 光武雄一郎, “係留気球無線中継システムの高度化 -システム概要-,” 2015 信学総大, B-5-59, 滋賀, 2015 年 3 月.

[3.1.4.7] 太田喜元, 藤井輝也, 木村翔, 光武雄一郎, “係留気球無線中継システムの高度化 – 無線中継システム –,” 2015 信学総大, B-5-60, 滋賀, 2015 年 3 月.

[3.1.4.8] 木村翔, 表英毅, 杉田洋祐, 宮下真行, 太田喜元, 藤井輝也, “係留気球無線中継システムの高度化 -実証実験結果-,” 2015 信学総大, B-5-63, 滋賀, 2015 年 3 月.

[3.1.4.9] 木村翔, 太田喜元, 藤井輝也, “MIMO 対応係留気球無線中継システム,” 2015 信学ソ大, B-5-44, 仙台, 2015 年 9 月.

[3.1.4.10] 木村翔, 太田喜元, 藤井輝也, “LTE 対応係留気球無線中継システムの MIMO 受信特性,” 2016 信学総大, B-1-6, 福岡, 2016 年 3 月.

[3.1.4.11] 木村翔, 太田喜元, 藤井輝也, “MIMO 対応係留気球無線中継システム -実証実験結果-,” 2016 信学ソ大, B-5-63, 札幌, 2016 年 9 月.

3.1.5 位置特定ソフトウェアの検討

現在の携帯電話の多くは、GPS対応機能が標準装備されており、所有者の許可を得てその位置情報をネット上で見る事が出来る。遭難者の端末が取得したGPS情報を、移動通信網を介して捜索側に通知できるGPS対応機能を活用する位置特定ソフトウェアの開発を検討し、実際に試作検証を行った。

GPSはアメリカ合衆国が軍事用に打ち上げた約30個のGPS衛星のうち、上空にある4個以上の衛星からの信号をGPS受信機で受信し、受信機の現在位置を知るシステムである。図3.1.51にその概要を示す。

山岳などの上空が開けた場所の地表では、多くのGPS衛星の信号を受信することができることから、位置の測定精度は良好で、数mから10m程度である。一方、積雪中に深く埋もれた端末では積雪中での電波の減衰により、地表ほど多くのGPS衛星の信号を受信することができなくなり、位置の測定精度が劣化する。特に積雪中での電波の減衰が大きい場合には、最小の4個の衛星からの信号を受信できなくなり、位置の特定ができなくなる。すなわち、積雪中で4個の衛星からの信号を受信できる深さが位置特定の最大の深さとなる。

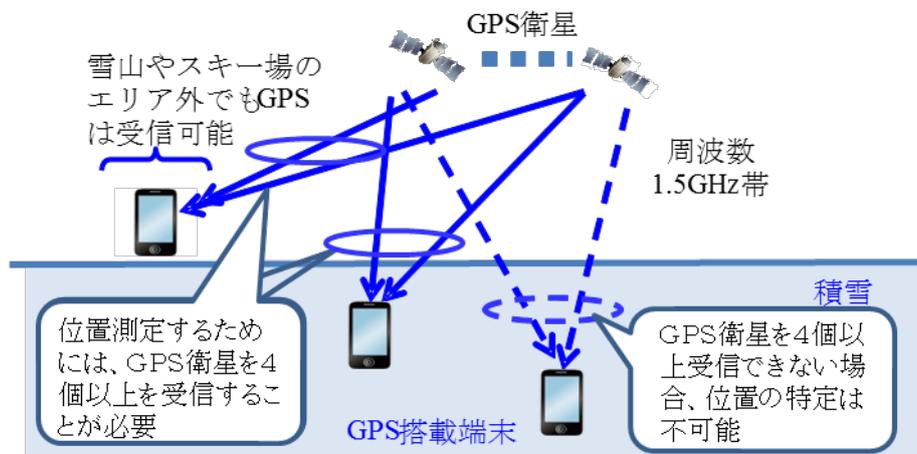


図3.1.51 GPS受信の概要

3.1.5.1 位置特定ソフトウェア

図 3.1.52 にシステム構成を示す。位置特定システムはインターネット網に位置する位置情報特定サーバ、移動通信網を介して、GPSで取得した端末の位置情報を取得し、パソコンなどの表示装置に表示する。位置情報取得の手順（番号①～⑧）を図 3.1.52 に併せて示している。本システムは、スマホに標準装備されている“位置情報取得アプリケーション”を利用している。パソコン等で位置情報取得アプリケーションを立ち上げて、検索する端末の位置情報取得のための情報（電話番号、ID等）を入力することで、端末の位置情報（緯度、経度）を取得できる。図 3.1.53 に表示結果例を示す。検索する端末毎の緯度、経度の表示及び地図上の位置を示すことが可能である。

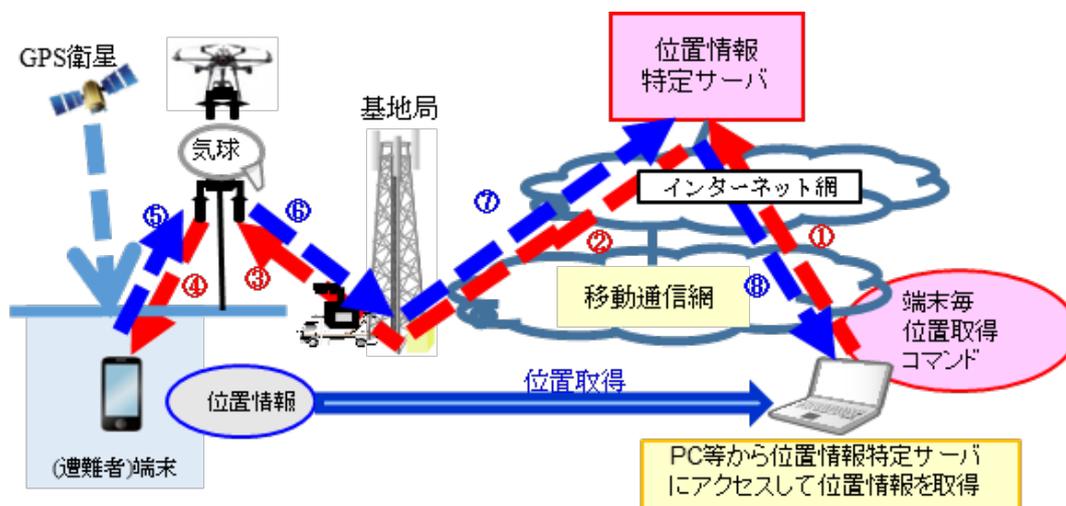


図3.1.52 位置特定システム構成

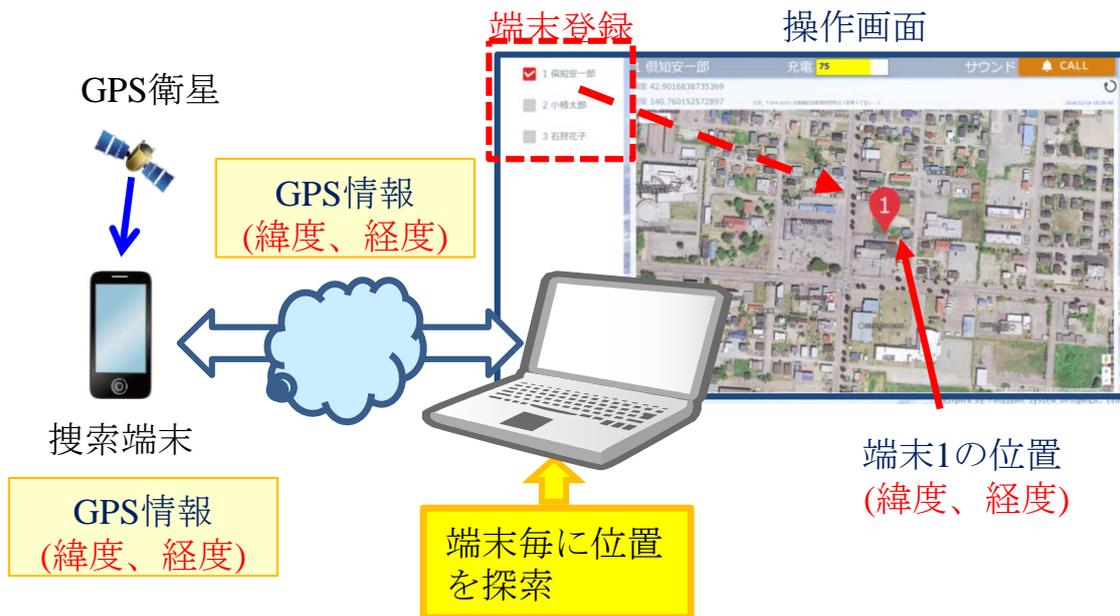


図 3.1.53 位置特定システムの表示例

3.1.5.2 実装ソフトウェアの考え方

位置特定システムは、大きく分けて二段階から構成される。端末毎に位置検索（遭難者が所持する端末の検索）を行う段階及び位置情報の表示（その端末の位置情報の表示）を行う段階の2段階であり、ネット上に置かれた位置特定システムサーバー上に実装される。図 3.1.54 を参照。

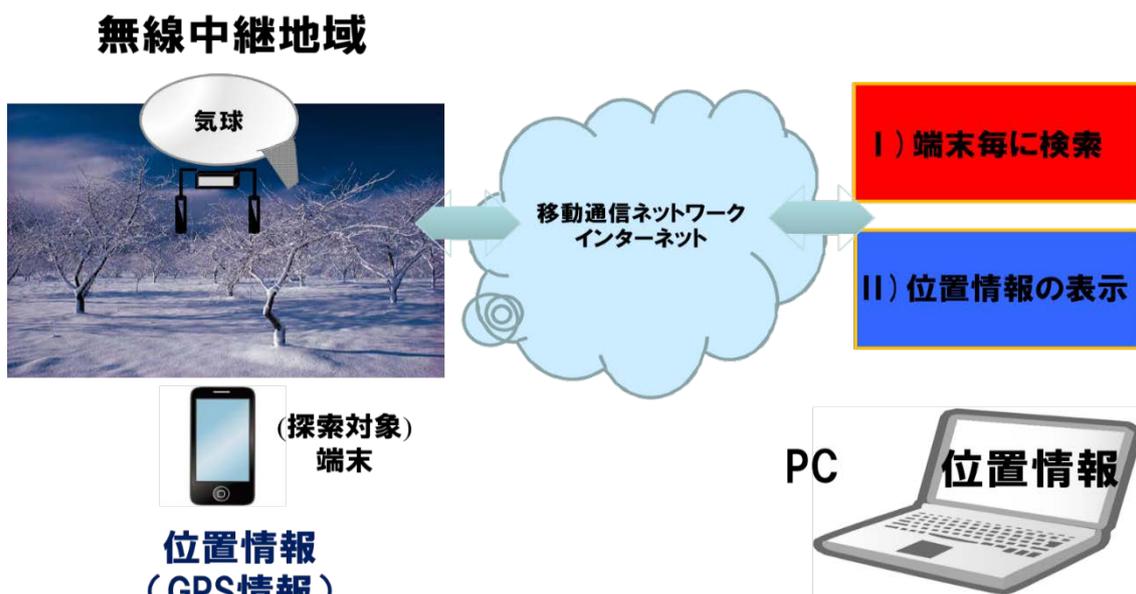


図 3.1.54 位置特定システムの概要

D) 端末毎に検索においては、ユーザへの負担を軽減する目的で、端末には新たなアプリケーションのインストールを避けることとした。よって、IOS やアンドロイドのスマホに標準装備されている機能をそのまま利用した。iPhone の場合は、「iPhone を探す」[3.1.5.1] (P55 「3.1.5.4 参考文献」[3.1.5.1] 参照)で、アンドロイドの場合は、「Android Device Manager」[3.1.5.2] (P55 「3.1.5.4 参考文献」[3.1.5.2] 参照)である。

II)位置情報の表示においては、マップ上に位置を分かり易く表示し、付随した情報(端末の充電情報)をも合わせて表示できるように新たなアプリケーションとして作成を行った。PC のみならずタブレット端末等からも見られるように実装した。実証実験における位置特定アプリケーションは、ソフトバンク株式会社とパナソニックシステムデザイン株式会社の協力により開発を行った。

このように D) 端末毎に検索の段階では、出来るだけ既存のアプリケーションを利用し、II) 位置情報の表示の段階においては、分かり易さや重要な情報(充電等)を網羅する考え方で「位置特定ソフトウェア」を作成することとした。

一方、D) 端末毎に検索において既存アプリケーションを利用する場合、ユーザの ID とパスワードを予め知る必要がある。個人情報に関わる事柄である為、今後慎重に検討をする必要はあるが、下記のような解決策も考えられる。

- ① 公的な機関に届け出をする。
- ② 入山前に現地消防等への届け出の一環として ID とパスワードを知らせておく。
- ③ 緊急時の連絡先の方(家族、友人等)に予め ID とパスワードを知らせておく。
- ④ 宿泊先ホテル等のチェックインの際に ID とパスワードを書いて、封をした封筒に入れ渡しておく。チェックアウトの際に封をしたままの封筒を戻してもらう。

3.1.5.3 実装ソフトウェア

位置特定ソフトウェアは、移動体網及びインターネットに繋がっている位置特定システムサーバー上に実装される。この位置特定システムにおける情報の流れを図 3.1.55 に示す。

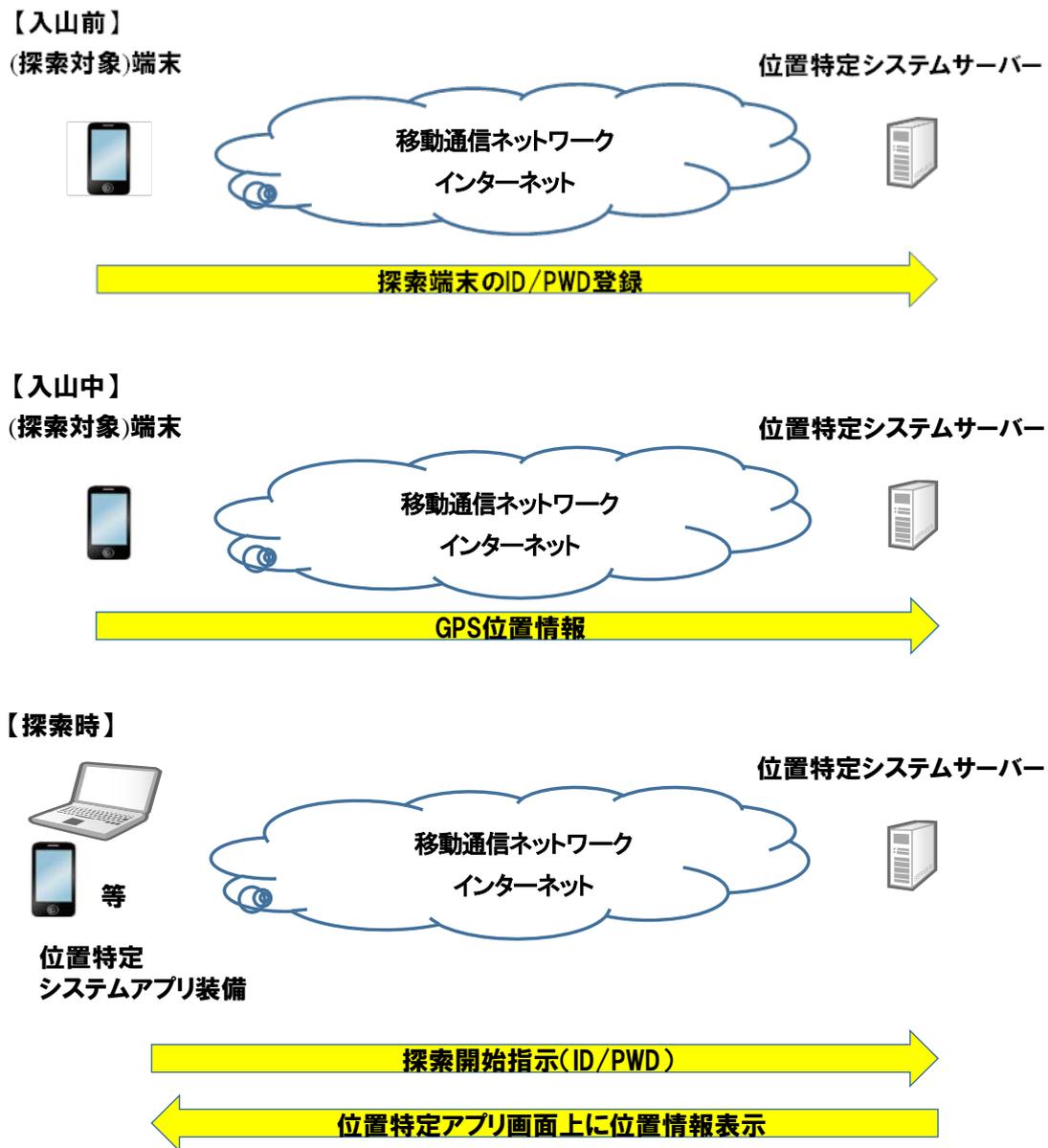


図 3.1.55 位置特定システムの情報の流れ

入山前の対応として、ID とパスワードを位置特定システムサーバーに登録しておく必要がある。前章で述べた様に、今後の検討課題を含み、登録の仕方には色々な仕組みが考えられるが、ユーザ端末に位置特定システムアプリがインストールされていれば、図 3.1.55 に示すようにネットを介して位置特定システムサーバーに直接登録をすることも出来る。

入山中においては、端末側で既に具備されているGPS対応機能をオンにしておくだけで、位置特定システムサーバーはその端末の位置を把握することが出来る。

探索時においては、探索を行う端末（PC、タブレット等）に位置特定システムアプリケーションがインストールされており、位置特定システムサーバーに対して探索対象となる端末のIDとパスワードを入力することにより、同サーバーより探索対象端末の位置（緯度、経度）を含む情報が位置特定システムアプリケーション画面上に表示される。よって、迅速に探索対象端末を見つけ出すことが可能となる。

位置特定システムアプリケーションにおける画面イメージを図3.1.56に示す。



図 3.1.56 位置特定システムアプリケーション画面イメージ

登録ボタンから端末のIDとパスワードを登録することができる。設定ボタンは、地図のデフォルト緯度経度を設定する。全国どこでも利用できるアプリケーションであるため、対象となる雪山やスキー場のおおよその緯度経度を設定しておく。探索時には、探索ボタンを使うことで、探索対象となる端末の位置が特定される。図3.1.57に探索時の画面イメージを示す。

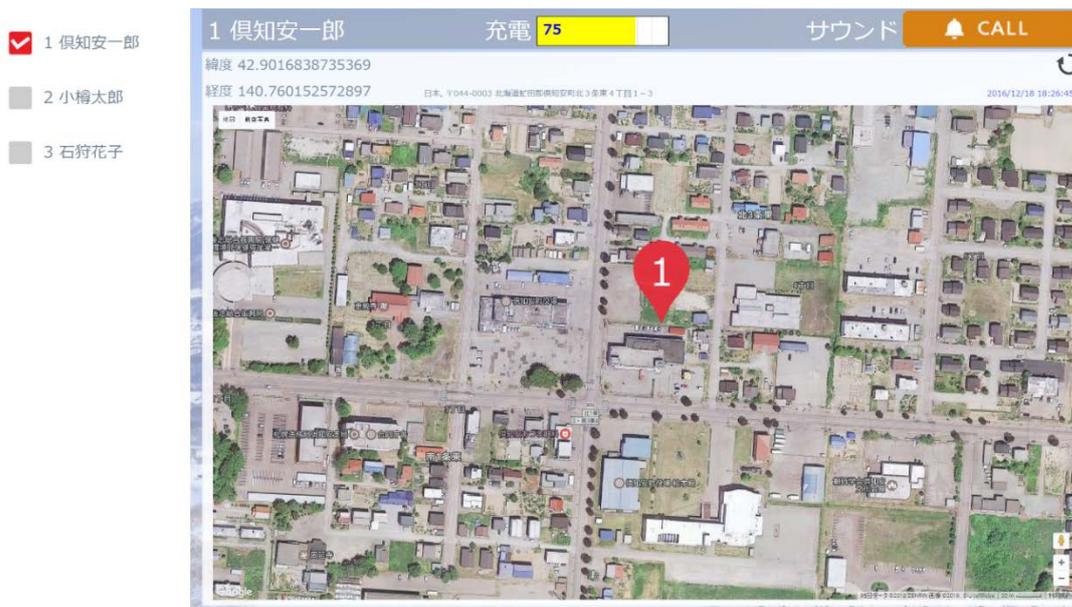


図 3.1.57 特定された端末の位置等の表示イメージ

画面の左上に登録された端末の所持者名が表示され、地図上に対象者の端末の位置と番号が表示される。更に、端末の充電状態がパーセント表示で示される。画面右上のサウンドを使うことで、端末を遠隔から鳴らすことができる。以上の機能を駆使することによって、迅速に探索者の端末の位置を特定する。

3.1.5.4 参考文献

【3.1.5.1】 iCloud : 「iPhone を探す」機能概要

https://support.apple.com/kb/PH2696?viewlocale=ja_JP&locale=ja_JP

【3.1.5.2】 Android デバイス マネージャーのオンとオフの切り替え

<https://support.google.com/accounts/answer/3265955?hl=ja>

3.2 実証実験

3.2.1 フィールドにおける積雪中の電波伝搬

3.2.1.1 雪の誘電率の測定

フィールドにおける雪の誘電率を測定するために、3.1.2.1 と同様に雪の密度と含水率を測定した。表 3.2.1 は測定諸元を示す。測定場所は北海道虻田郡倶知安町ニセコグラン・ヒラフスキー場である。測定日は2016年12月である。

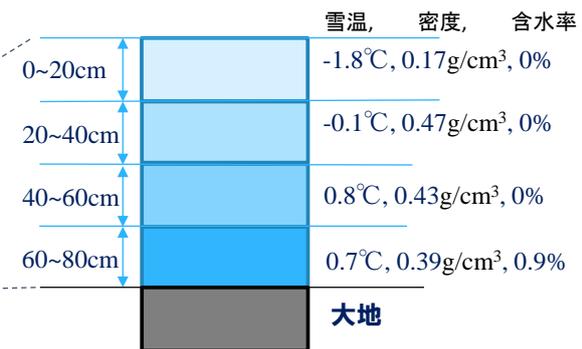
表 3.2.1 雪の誘電率の測定諸元

測定場所	北海道虻田郡倶知安町ニセコグラン・ヒラフスキー場
温度計	Toloyo デジタル温湿度計
質量計	島津製作所 電子上皿天秤
スノーサンプラー	角型密度サンプラー(100cm ³)
含水率計	Denoth式含水率計

図 3.2.1(a)は測定の様子を、図 3.2.1(b)は測定した北海道虻田郡倶知安町ニセコグラン・ヒラフスキー場の積雪の特性の一例(2016年12月9日の測定結果)を示す。雪の深さ80cmに対して、20cm毎に雪温、密度、含水率を測定した。測定の結果、12月の北海道虻田郡倶知安町ニセコグラン・ヒラフスキー場の積雪の特性の一例は、雪の密度 $\rho_s=0.2\text{g/cm}^3$ 、含水率 $m_v=0.1\%$ であった。

グラン・ヒラフ(ゴンドラ山腹駅近辺)

12月9日 ニセコの積雪(各層)の特性の一例



(a)測定の様子

(b)グラン・ヒラフスキー場の積雪の特性の一例

図 3.2.1 測定結果の一例

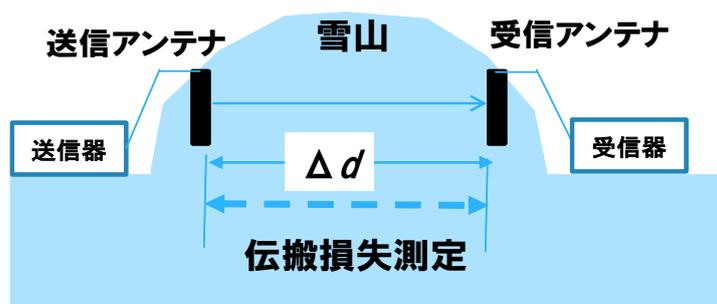
3.2.1.2 基準アンテナを用いた積雪中における測定(単層構造)

本章では、基準アンテナを用いて、単層構造の積雪中の電波伝搬損失測定を行った。表 3.2.2 は測定諸元を示す。

表 3.2.2 基準アンテナを用いた積雪中における測定諸元(単層構造)

測定場所	北海道虻田郡倶知安町ニセコグラン・ヒラフスキー場
周波数	1.5GHz, 2.1GHz, 3.3GHz
送信アンテナ	スリーブアンテナ(利得:2.14dBi)
受信アンテナ	スリーブアンテナ(利得:2.14dBi)
送受信間距離	1m~10m

図 3.2.2 に電波伝搬測定構成と測定に用いた雪山を示す。送受信アンテナは共にスリーブアンテナ(利得 2.14dBi)を用いた。周波数は 1.5GHz, 2.1GHz, 3.3GHz であり、送受信間距離 Δd に対する伝搬損失を測定した。



(a)測定構成



(b)測定に用いた雪山

図 3.2.2 測定の様子

図 3.2.3 は測定結果を示す。送受信間距離が大きくなるほど、また、周波数が高くなるほど、伝搬損失が大きくなることがわかる。式 3.2.3.1 を用いて伝搬損失の推定を行った。図 3.2.2 の雪質は、 $\rho_s=0.2\text{g/cm}^3, m_v=0.5\%$ であり、これを用いて計算した伝搬損失の推定結果を図 3.2.3 に併せて示す。

フィールド実証の結果は、周波数帯が相違していても「机上検討の値」とおおむね一致していることから、積雪中の最大通信可能距離に関する机上検討の結果は妥当と考えられる。

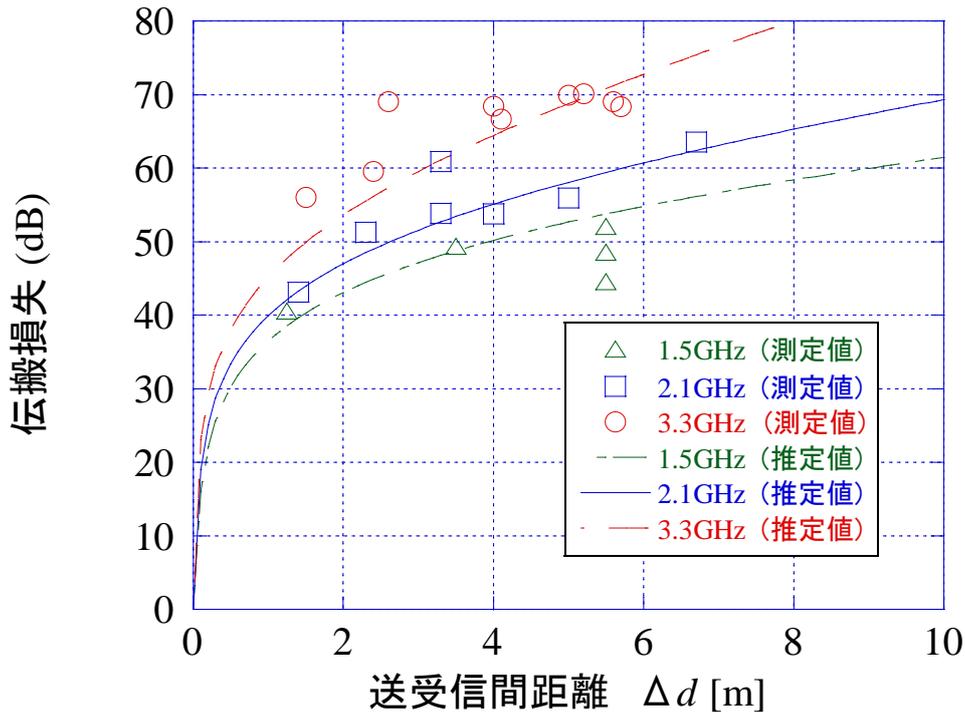


図 3.2.3 測定結果と推定結果

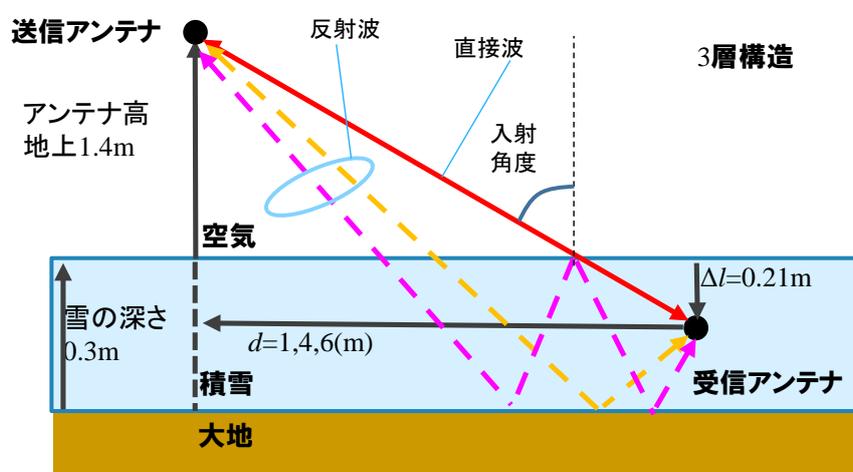
3.2.1.3 基準アンテナを用いた積雪中における測定（3層構造）

次に、空気中に送信アンテナを、積雪中に受信アンテナを設置した場合の伝搬損失を測定した。表 3.2.3 は測定諸元を示す。周波数は 3.35GHz である。

表 3.2.3 基準アンテナを用いた積雪中における測定諸元(3層構造)

測定場所	北海道虻田郡倶知安町ニセコグラン・ヒラフスキー場
周波数	3.35GHz
送信アンテナ	スリーブアンテナ(利得:2.14dBi)
受信アンテナ	90度指向性アンテナ(利得:12.1dBi)
送受信間距離(水平)	1, 4, 6m
受信アンテナ深さ	0.21m
送信アンテナ高(地面から)	1.4m

図 3.2.4 は測定の構成 (モデル) と様子を示す。測定構成は空気、積雪、大地の 3 層構成の伝搬モデルと等価である。雪の深さは 0.3m, 送信アンテナ高は地上 1.4m, 受信アンテナの深さ Δl は 0.21m (地上高 0.09m) である。送信アンテナはスリーブアンテナ(利得 2.14dBi)を、受信アンテナは 90 度指向性アンテナ(利得 12.1dBi)を用いた。周波数は 3.3GHz である。



(a)測定構成



(b)測定の様子

図 3.2.4 測定の様子

送受信間の水平距離 d を 1m、4m、6m とした測定結果を図 3.2.5 に示す。縦軸は受信アンテナの深さ Δl である。

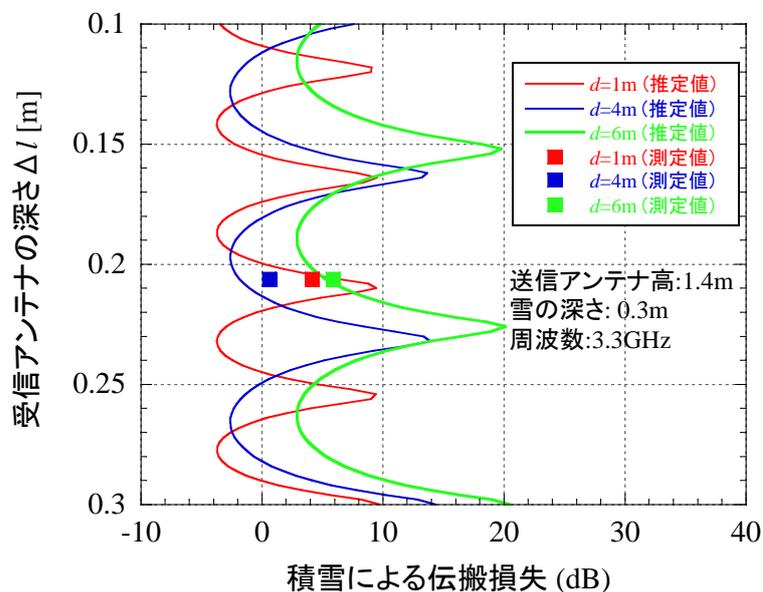


図 3.2.5 測定結果と推定結果

次に、図 3.2.4 の測定環境に対する推定を行った。この場合の雪質は、 $\rho_s=0.2\text{g/cm}^3$, $m_v=0.1\%$ であり、この値を用いて空気、積雪、大地の 3 層構成における積雪層の伝搬損失の推定結果を図 3.2.5 に併せて示す。推定結果では大地からの反射波など多数の電波が到来することにより伝搬損失が大きく変動していることがわかる。図 3.2.6 は位相の異なる透過波と反射波が高さ方向で重畳されて変動する様子（ハイトパターン特性）を示す。推定結果は、深さ $\Delta l=0.21\text{m}$ の場合の測定結果とよく一致していることがわかる。

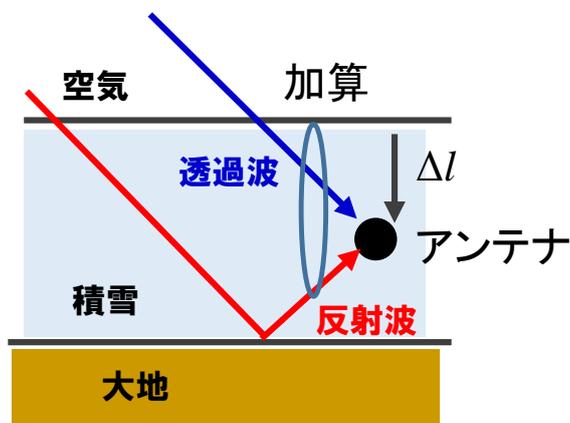


図 3.2.6 ハイトパターン特性

推定法が測定結果をよく説明できることから、図 3.2.4 と同じ 3 層構成を仮定し、積雪の深さを 5m とした場合の積雪中の最大到達距離を計算した。図 3.2.7 は、計算のモデルを示す。1.5GHz と 2.1GHz に対して、電波の入射角と端末までの雪の深さを考慮している。図 3.2.8 は一例として 1.5GHz で 10dB、2.1GHz で 20dB の減衰が積雪中で許容される場合の、1.5GHz と 2.1GHz における積雪中の最大到達距離の推定結果を示す。但し、雪質は $\rho_s=0.2\text{g/cm}^3$ 、 $m_v=0.5\%$ とした。横軸は入射角度である。この雪質では、入射角度を 60° 以下にすることで、1.5GHz と 2.1GHz 共に 5m の深さまで通信可能であることがわかる。

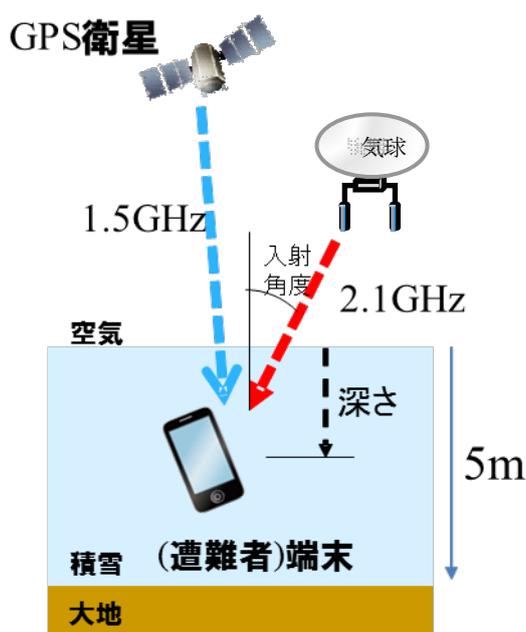


図 3.2.7 積雪中の最大到達距離の計算モデル

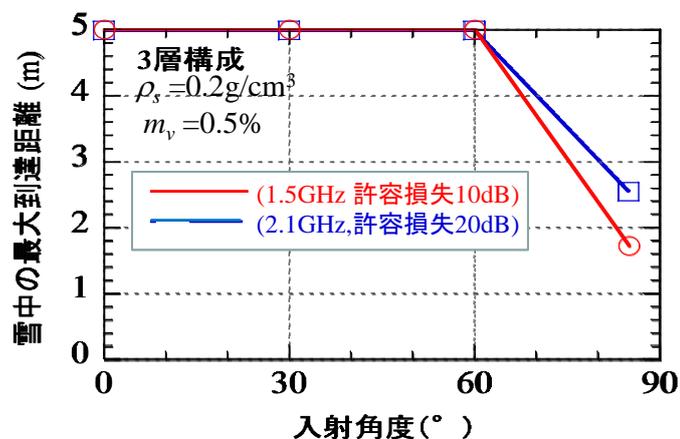


図 3.2.8 積雪中の最大到達距離の推定結果

3.2.2 フィールドにおける積雪中のGPSを用いた位置特定

北海道虻田郡倶知安町ニセコグラン・ヒラフスキー場で、積雪中にGNSS受信機のアンテナを埋設し、測位誤差を測定した。雪の深さは60cmと3.5mであった。また、北海道大学において、70cmの積雪にGNSS受信機のアンテナを埋設し、長時間測定を行った。

3.2.2.1 積雪中における測定諸元

表 3.2.4 は測定諸元を示す。

表 3.2.4 積雪中における測定諸元

測定場所	ニセコ		北海道大学
雪の深さ	0.6m	3.5m	0.7m
密度	0.2g/cm ³	0.2g/cm ³	0.4g/cm ³
含水率	0.5%	0.1%	0.1%
受信アンテナ	パッチアンテナ(利得:26dBic)		

3.2.2.2 積雪中における測定構成

図 3.2.9 は北海道虻田郡倶知安町ニセコ・グランスキー場での測定構成を示す。雪面から0.6mと3.5mの場所にアンテナを埋設した環境で、積雪中に埋設していないアンテナ(基準アンテナとする)を基準とし、積雪中にアンテナを埋設した場合の測位誤差を測定した。図 3.2.10 は、一例として雪面から0.6mの場所にアンテナを埋設した様子を示す。

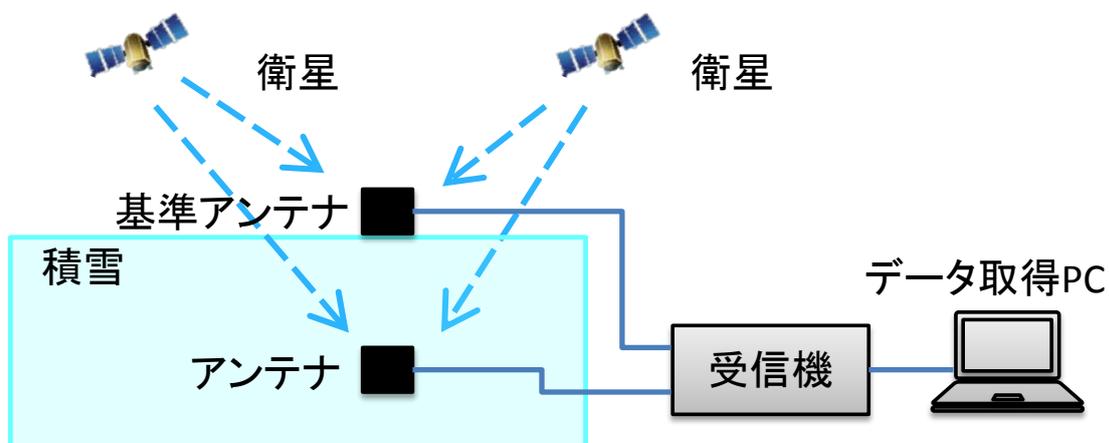
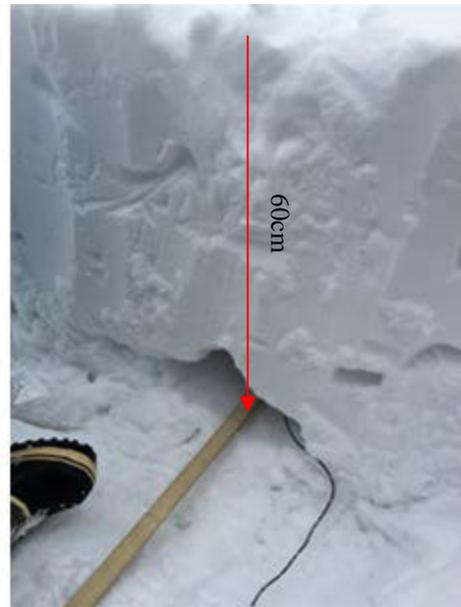


図 3.2.9 測定構成(ニセコ)



(a)基準アンテナ



(b)埋設アンテナ

図 3.2.10 雪面から 0.6m の場所にアンテナを埋設した様子(ニセコ)

また、図 3.2.11 は北海道札幌市北海道大学構内での測定構成を示す。雪面から 70cm の場所にアンテナを上下方向に埋設した環境で長時間の測定を実施した。

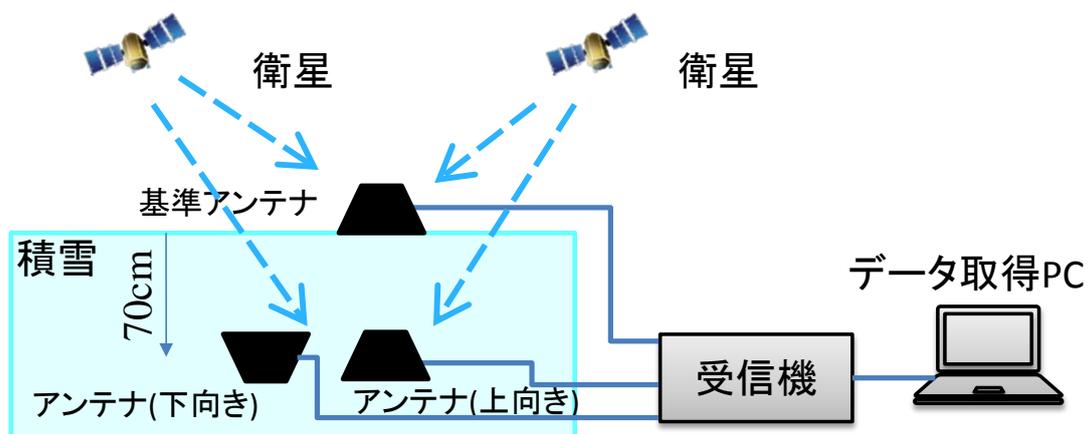


図 3.2.11 測定構成(北海道大学)

3.2.2.3 積雪中における測定結果

積雪中の電波伝搬特性は雪の密度、含水率、周波数に影響を受ける。北海道虻田郡倶知安町ニセコ・グランスキー場での測定時の積雪の密度 ρ_s は 0.2g/cm^3 、含水率 m_v は $0.1\sim 0.5\%$ であり、周波数も 1.5GHz と低いことから伝搬損失は小さく、雪の深さが 60cm の場合でも 3.5m の場合でも積雪上に設置した基準アンテナの測位結果とほぼ同じ結果が得られ、精度良く測位できることを確認した。

一方、北海道札幌市北海道大学での測定では、測定時の積雪の密度 ρ_s は 0.4g/cm^3 、含水率 m_v は 0.1% であった。図3.2.12は、積雪中にアンテナを上向きと下向きに埋設したGNSS受信機の測位誤差の時間特性を示す。また、図3.2.13は基準アンテナのGNSS受信機と、積雪中に上下にアンテナを埋設したGNSS受信機の検出したGPS衛星数の時間特性を示す。GPS衛星の位置関係や受信できるGPS衛星数が変わることから測位誤差が変化することがわかる。ただし、測位誤差、検出したGPS衛星数ともアンテナを上向きに埋設した場合と下向きに埋設した場合で顕著な差は見られない。

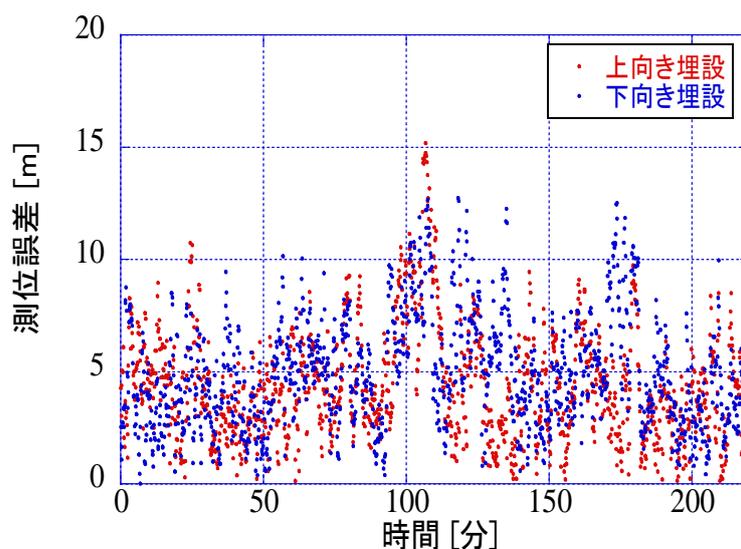


図 3.2.12 上下に埋設したアンテナの測位誤差の時間特性

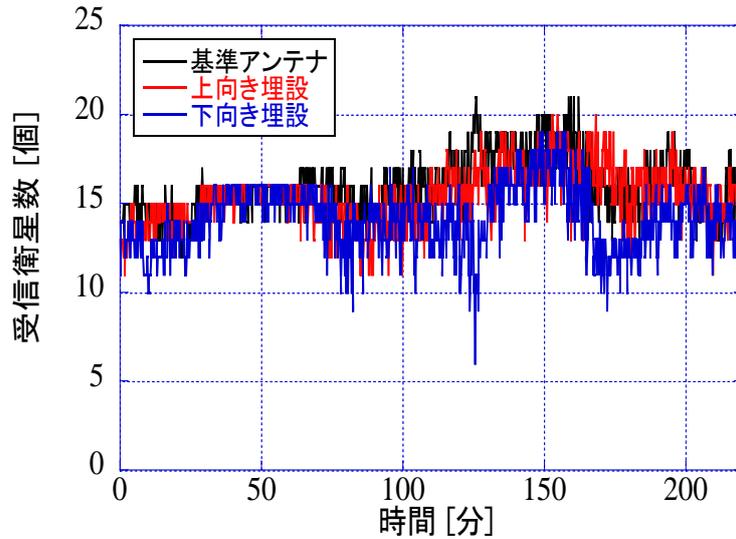


図 3.2.13 基準アンテナと上下に埋設したアンテナの受信したGPS衛星数

図 3.2.14 は測位誤差の累積確率を示す。積雪中に上向きに埋設したアンテナでも下向きに埋設したアンテナでも、測位誤差にほとんど差がないことが分かる。また、測位誤差の中央値は約4mと小さいことがわかる。これは、測定時の含水率 m_v が0.1%であり、周波数も1.5GHzと低いことから伝搬損失は小さいためであると考えられる。また、下向きに埋設したアンテナのGNSS受信機でも同等の結果が得られたことは、積雪をほとんど減衰せずに透過して大地で反射した電波を受信しているためと考えられる。

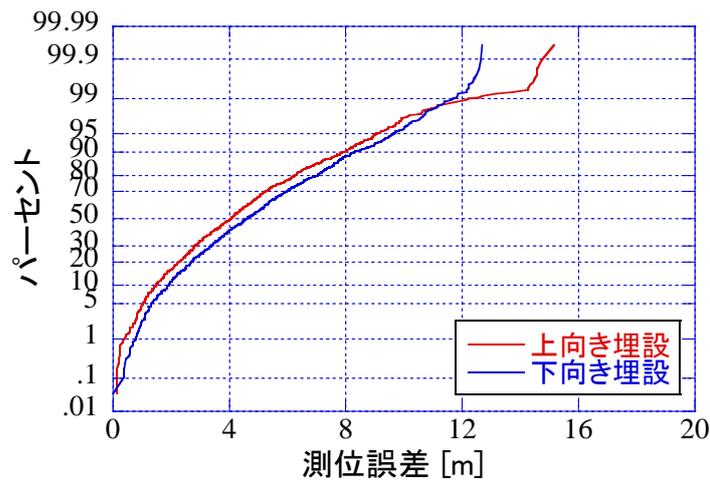


図 3.2.14 測位誤差の累積確率

3.2.3 無線中継システムの評価

北海道虻田郡倶知安町のニセコグラン・ヒラフスキー場において無線中継システムの実証実験を実施した。実験では、遭難者の位置特定システムで使用する無線通信回線として、移動通信の電波を空から係留気球を用いて中継する実験構成とドローンを用いて中継する実験構成の2種類の無線中継システムを使用した。このように無線中継を用いて無線機・携帯端末間の距離を近づけることにより、携帯端末へ送信および携帯端末から受信する電波を強くすることができ、雪中深くに埋没してエリア外となった遭難者の携帯端末を移動通信ネットワークに接続することができる。

本章では無線中継システムの実証実験構成とその評価結果について報告する。

3.2.3.1 無線中継システムの実証試験構成

図 3.2.15 と図 3.2.16 に実験で使用した係留気球を用いて中継する構成とドローンを用いて中継する構成の基本構成を示す。本システムは、移動無線車に搭載した中継元基地局装置(以下、親機)と、係留気球、もしくはドローンに搭載した無線中継装置(以下、子機)で構成される。無線局としての諸元は全く同じであり、飛行体が係留気球かドローンかの違いとなっている。

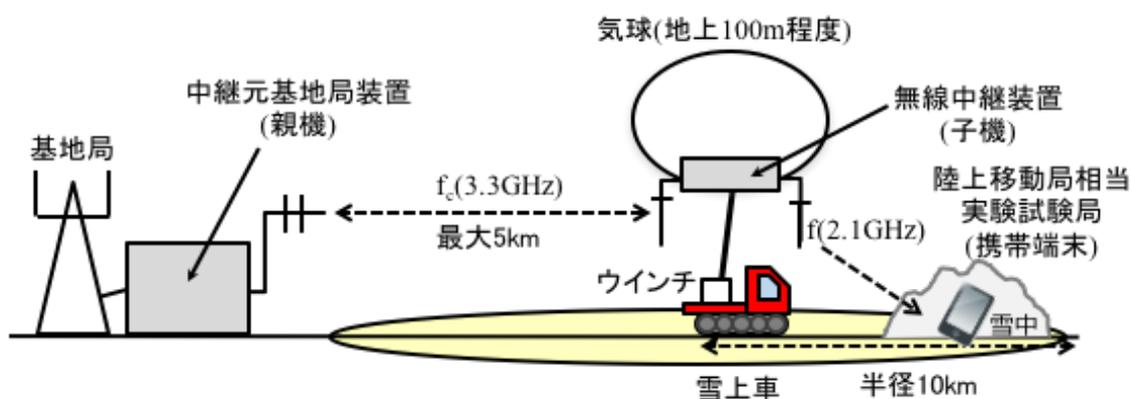


図 3.2.15 係留気球を用いた実験の基本構成

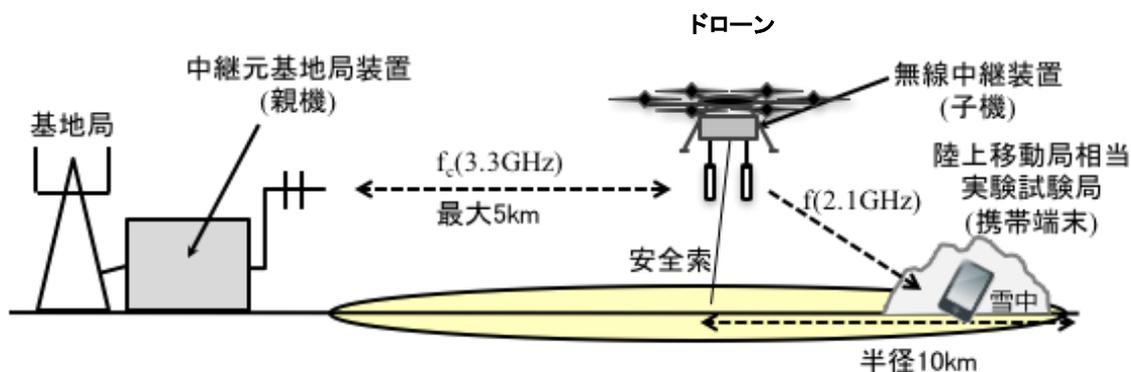


図 3.2.16 ドローンを用いた実験の基本構成

無線中継装置への電力供給については、係留気球を用いた実験構成では係留気球の係留索に編み込まれた電線を用いて地上から電源供給を行い、一方、ドローンを用いた実験構成ではドローン内部に搭載したバッテリーにより電源供給を行った。また、係留気球を用いた実験構成では雪上車上に設置したウインチから気球を係留しており、無線中継をしながらの移動が可能である。

実験では移動無線車に搭載した親機から 3.3GHz 帯の周波数を用いて、W-CDMA 信号 (5MHz 帯域幅) の電波を、係留気球およびドローンに搭載した子機へ向けて送信した。ここで、親機・子機間は見通しとなる環境で、距離は約 600m である。子機では、3.3GHz 帯周波数を 2.1GHz 帯周波数に変換し、2.1GHz 帯の 5MHz 帯域幅の W-CDMA 信号を約 3.5m の深さの雪中の中に埋没させた携帯端末に向けて送信した。

なお、実験では、商用システムに影響を及ぼさないように、携帯端末は実験用周波数のみに接続できるように携帯端末にあらかじめアクセス規制を実施した。また同様に、実験周波数で商用移動端末が利用できないように、実験用基地局装置にはあらかじめアクセス規制を実施している。

3.2.3.2 実証実験諸元

表 3.2.5、表 3.2.6、表 3.2.7 に実験で使用した中継元基地局装置 (親機)、無線中継装置 (子機)、陸上移動局相当実験試験局 (携帯端末) の実験諸元をそれぞれ示す。

表3.2.5 中継元基地局装置(親機)の実験諸元

項目	中継元基地局装置(親機)
送信周波数	3384.9MHz
占有帯域幅	5MHz
通信方式	W-CDMA(DS-CDMA)
変調方式(1次変調)	BPSK、QPSK
電波の型式	5M00 G7W,N0N
空中線電力	2W
空中線	VH偏波共用指向性アンテナ(空中線半値幅:40°)
空中線利得	20dBi
空中線損失	5dBi

表3.2.6 無線中継装置(子機)の実験諸元

項目	無線中継装置(子機) (親機対向、3.3GHz帯)	無線中継装置(子機) (携帯端末対向、2.1GHz帯)
中心周波数	3314.9MHz	2167.4MHz
占有帯域幅	5MHz	5MHz
通信方式	W-CDMA(DS-CDMA)	W-CDMA(DS-CDMA)
変調方式(1次変調)	BPSK、QPSK	BPSK、QPSK
電波の型式	5M00 G1D,G1E,N0N	5M00 G7W,N0N
空中線電力	1W	10W
空中線	VH偏波共用 コリニアアンテナ (無指向性)	①VH偏波共用コリニアアンテナ (無指向性) ②VH偏波共用パッチアンテナ (指向性) ※①、②は付け替えて使用
空中線利得	6dBi	6dBi/8dBi
空中線損失	1dB	
地上高	最大100m	

表3.2.7 陸上移動局相当実験試験局(携帯端末)の実験諸元

項目	陸上移動局相当実験試験局(携帯端末)
送信周波数	1977.4MHz
占有帯域幅	5MHz
通信方式	W-CDMA(DS-CDMA)
変調方式(1次変調)	BPSK、QPSK
電波の型式	5M00 G1D,G1E,N0N
空中線電力	250mW
空中線	無指向性アンテナ
空中線利得	0dBi
移動範囲	子機から半径10km以内の陸上
地上高	雪中(数m)

3.2.3.3 実証実験結果

図 3.2.17 に北海道虻田郡倶知安町ニセコグラン・ヒラフスキー場での実証実験風景を示す。実証実験では図 3.2.18 に示すように係留気球を用いた実験構成およびドローンを用いた実験構成を用いて中心周波数2167.4MHzのW-CDMA信号(5MHz帯域幅)の無線中継を行い、音声通話、パケット通信が良好に行えることを確認した。また、無線中継を行うことにより、雪中 3.5m に埋没させた携帯端末のGPS情報を移動通信ネットワーク経由で取得し、その位置を特定できることを確認した。

なお、ドローンを用いた実験構成では、実際の電波を発射しない擬似的な子機を搭載しイメージとして係留線なしで飛行させた。



図 3.2.17 係留気球を用いた実験構成とドローンを用いた実験構成による無線中継実験風景

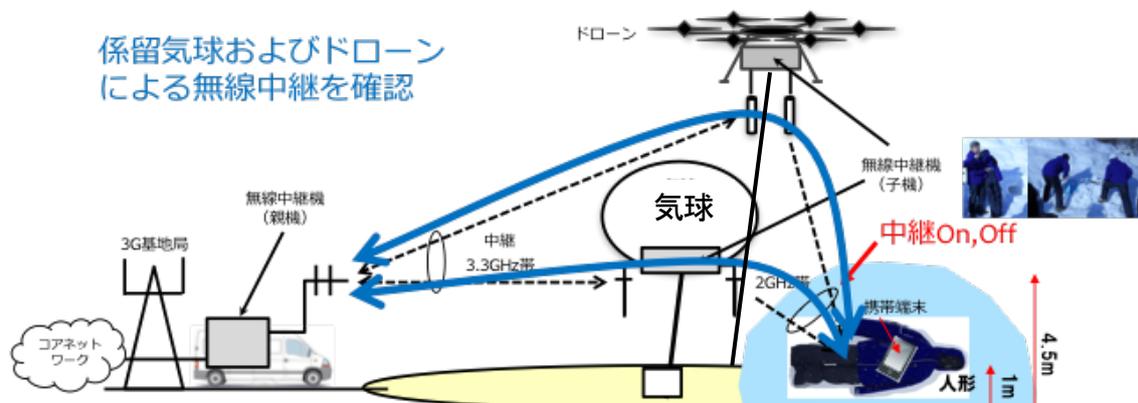


図 3.2.18 実証実験構成

3.2.4 位置特定ソフトウェアの評価

北海道虻田郡倶知安町ニセコグラン・ヒラフスキー場に実証実験システムを構築し、携帯端末のGPS情報を取得し、移動端末の位置を特定できることを評価した。

3.2.4.1 実証実験のシステム構成

位置特定システムは、位置情報特定サーバーを介して、移動端末のGPS情報を取得し、パソコンなどの表示装置に表示する。実証実験のシステム構成を図 3.2.19 に示す。

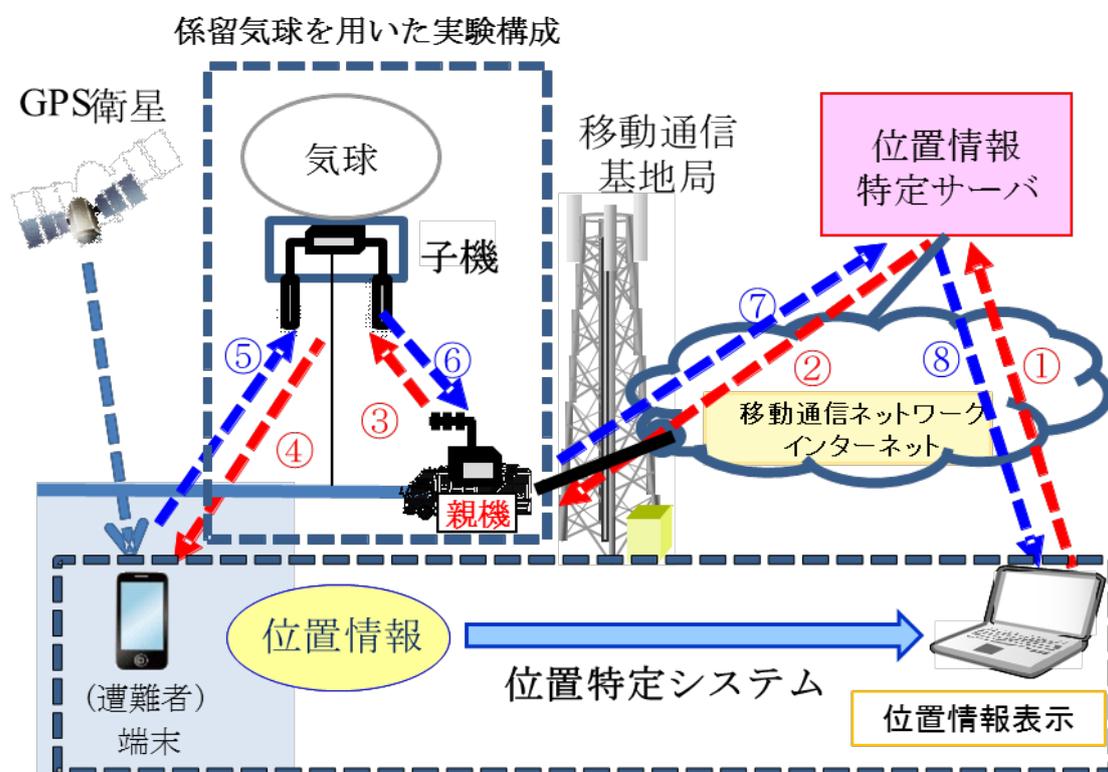


図 3.2.19 実証実験システム構成

本システムは、保留気球を用いた実験構成と位置特定システムとから構成されている。実証実験では、更なる運用の迅速化を図るためにドローンを用いた実験構成も併用された。両方のシステムに対して、同一の「位置特定システム」が利用され、移動端末毎の緯度、経度及び地図上での位置情報をパソコンなどの表示装置に表示した。

図 3.2.19 では、位置情報取得の手順（番号①～⑧）を併せて示している。手順①において、位置情報表示端末より位置情報特定サーバーに対して探索対象となる移動端末の探索を開始するため、その ID とパスワードが入力される。手順②～④では、位置

情報特定サーバーより探索対象移動端末に対して、インターネット網と移動通信網（係留気球を用いた実験構成を含む）を介して位置情報の取得が行われる。対象となる移動端末は、手順⑤～⑦によって、自分の位置情報（緯度、経度）を位置情報特定サーバーに知らせ、その情報をサーバーが地図上に表示し易いように加工し、手順⑧によって位置情報表示端末に送る。この一連の手順が実行されて探索対象移動端末の位置情報が表示端末に表示されることになる。

3.2.4.2 実装ソフトウェアの評価結果

位置特定ソフトウェアは、北海道虻田郡倶知安町ニセコグラン・ヒラフスキー場内に構築された実証実験場で、積雪中 3.5m の深さにおいて携帯端末のGPS情報を取得し、移動端末の位置を特定できることを確認した。図 3.2.20 に実証実験で使われた移動端末の位置表示がされていることを示す



図 3.2.20 移動端末の位置表示

実証実験では、位置情報表示端末に表示された位置と、実際の探索対象移動端末の位置とがよく一致していることが確認された。また、図 3.2.20 に示すように、移動端末名や番号が色分けされて分かり易く表示されることも確認できた。

3.3 同一事業者における既存基地局との干渉について

同一事業者が設置した既存の基地局と臨時無線中継システム図3.3.1との間の干渉について考察を行った。

今回の検討は、同一事業者同士の干渉のみを考察したため、他事業者が設置する基地局等との間の詳細な干渉検討について、改めて検討を行うことが必要である。

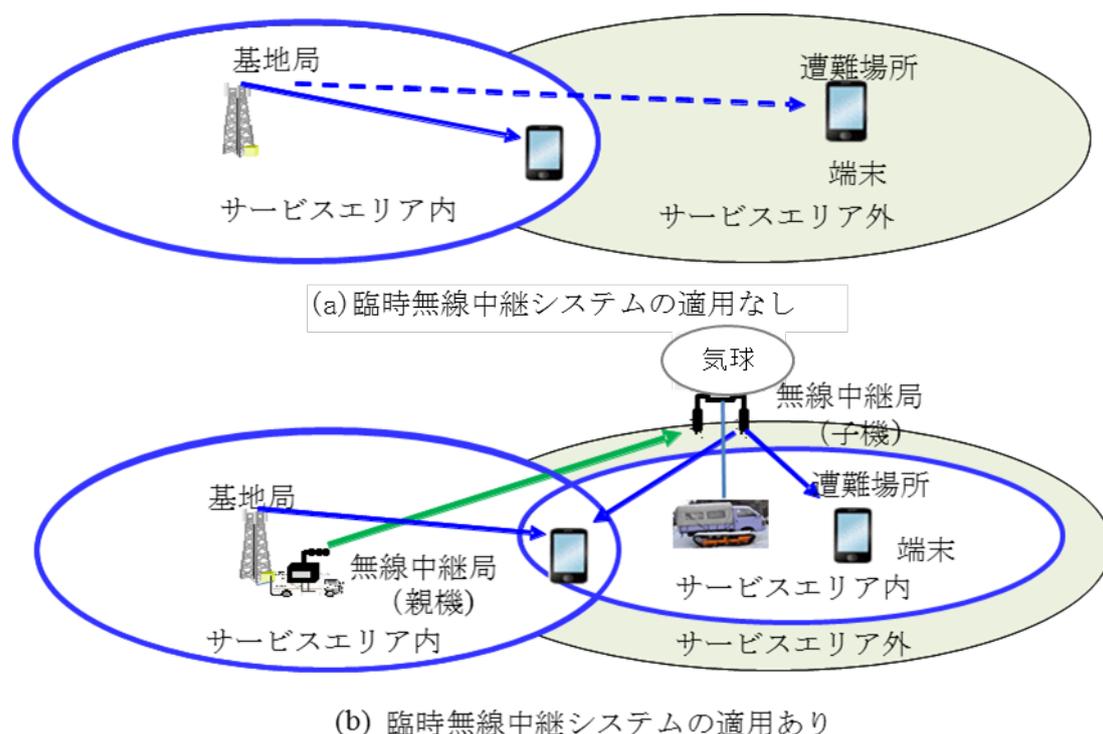


図3.3.1 臨時無線中継システムによるサービスエリアの拡張

3.3.1 臨時無線中継システムのシステムパラメータの最適化

第3世代移動通信システムや第4世代移動通信システムでは、隣接基地局で同一周波数を用いており（周波数の1セル繰り返し）、干渉を抑えるため送信電力や基地局のシステムパラメータの最適化を行っている。

臨時無線中継システムについても、通常隣接基地局との間で送信電力や基地局のシステムパラメータを最適化することにより、周辺の基地局との間の干渉を抑えることができると思われる。

3.3.2 基地局と臨時無線中継システムの干渉回避技術 eICIC による対応

第4世代移動通信システムでは隣接基地局間干渉を回避する技術として、eICIC(Enhanced Inter-Cell Interference Coordination)が標準化されている。この技術は図3.3.2に示すように、隣接基地局が時間軸上で異なるサブフレーム（タイムスロット）を用いることで、基地局間が完全に時刻同期することが条件となるが、時間軸上で送信信号を直交化させて同一周波数干渉を回避するものである。

LTE方式を用いた移動通信システムでは、同一周波数干渉を回避するために基地局と臨時無線中継システムにeICICを適用することが有効と考えられる。

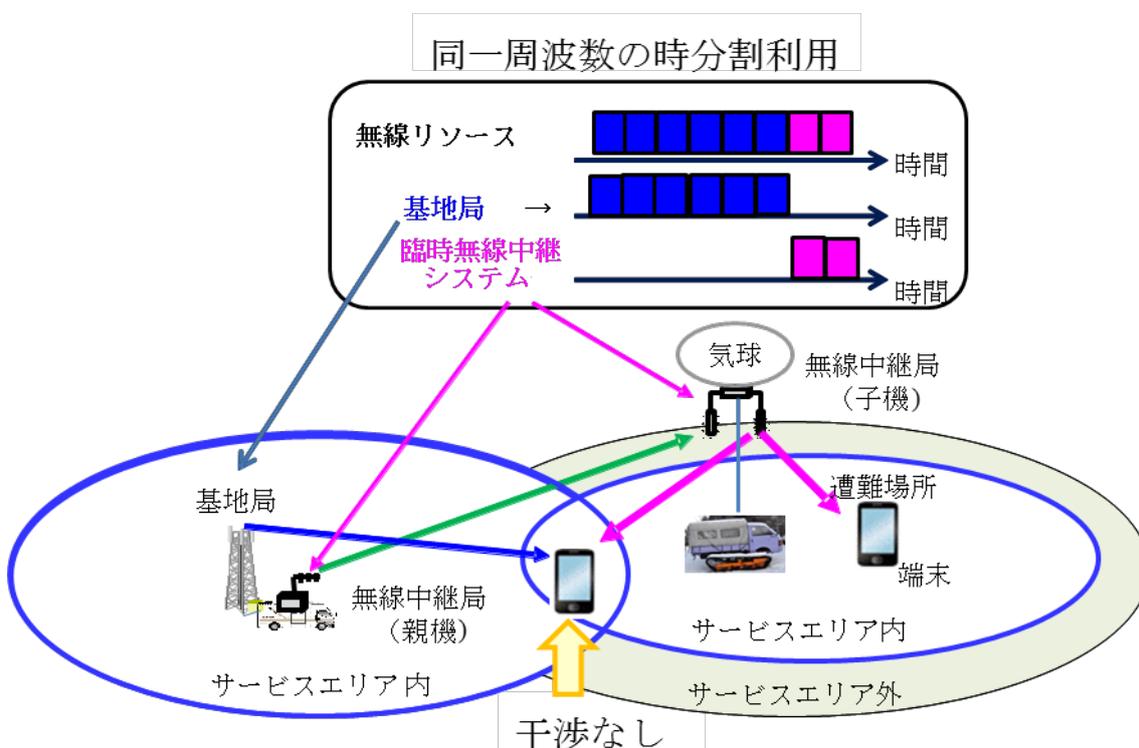


図 3.3.2 eICIC による同一周波数干渉回避

今後、同一帯域や隣接帯域を利用する既存の無線システムへの影響について、更なる検証を行うことが必要である。

3.4 公開実証実験

雪山やスキー場において、雪崩などの遭難事故による遭難者の迅速な救助を目的としてフィールドでの公開実証実験を実施した。

3.4.1 公開実証概要

公開実証概要および実演場所は、以下のとおり。

日時： 平成28年12月19日（月）10時40分から14時30分

場所： 北海道虻田郡倶知安町

説明会場： 羊蹄山ろく消防組合消防庁舎

デモ会場： ニセコグラン・ヒラフスキー場

参加者： 約120名（警察、消防、自治体、陸上自衛隊他）

図3.4.1に説明会の様子を、図3.4.2にデモの様子を示す。



図 3.4.1 説明会の様子



図 3.4.2 デモの様子

説明会では、主催者である総務省北海道総合通信局 局長 中道 正仁 からの挨拶の後、調査検討会座長の北海道大学大学院情報科学研究科 教授 大鐘 武雄 氏からの調査検討会の概要説明があった。次に、事務局から公開実証試験内容の説明があった。

公開実証は、場所を会場であるスキー場に移し実施された。

3.4.1.1 実施場所

公開実証は、ニセコグラン・ヒラフスキー場で行われた。図 3.4.3 にデモ会場を示す。図の左側下の雪上車駐車がデモ会場となった。駐車場の真ん中に高さ 4.5m の雪山を造成し、頂上の下 3.5m の位置に人体を模擬した人形に移動端末を装着して埋め、公開実証実験が行われた。

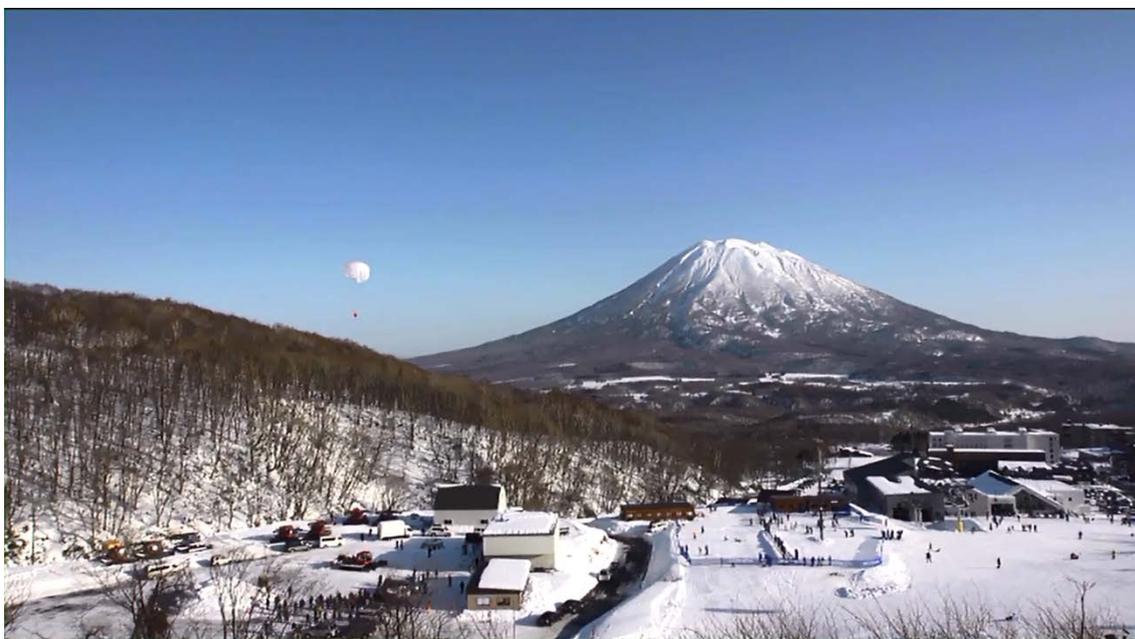


図 3.4.3 デモ会場と羊蹄山

3.4.1.2 システム構成（移動無線車、係留気球、ドローン 等）

公開実証で想定したシステム構成を図 3.4.4 に、実験諸元を表 3.4.1 に示す。地図上での実験装置（移動無線車、係留気球、ドローン等）の配置を図 3.4.5 に示す。

なお、ドローンを用いた実験構成では、実際の電波を発射しない擬似的な子機を搭載しイメージとして係留線なしで飛行させた。

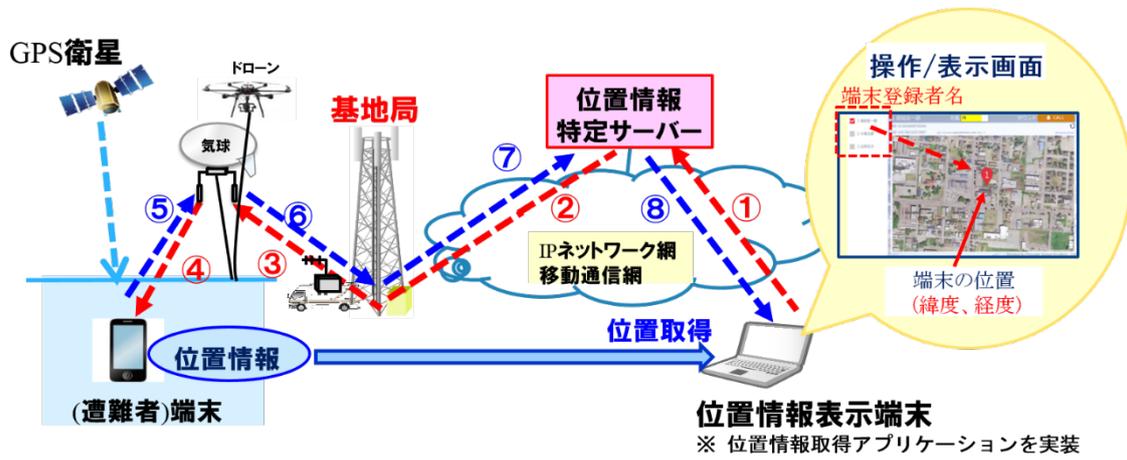
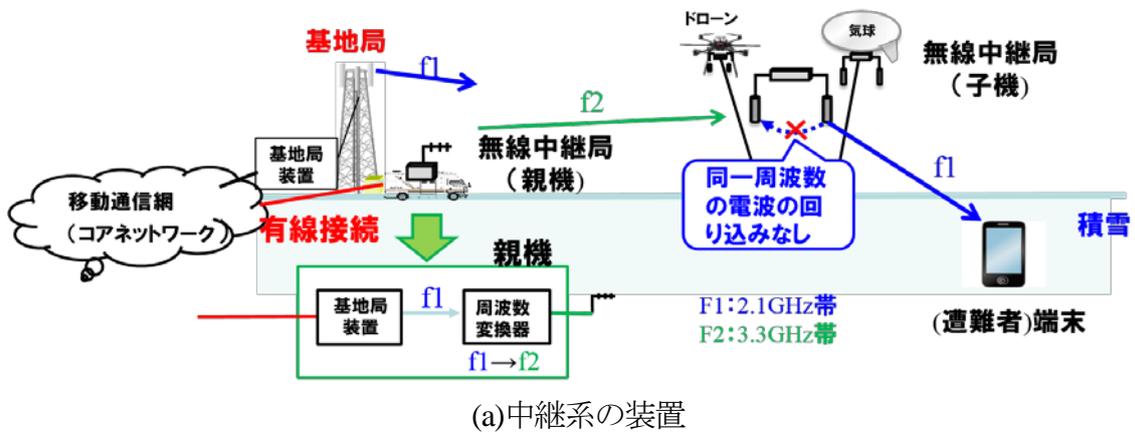


図 3.4.4 公開実証のシステム構成

表 3.4.1 実験諸元

項目	諸元
占有周波数帯幅	W-CDMA 5MHz
中継区間中心周波数	3.3GHz
アクセス区間中心周波数	2.1GHz
中継区間送信電力	1W
アクセス区間送信電力	10W



図 3.4.5 実験装置の配置

3.4.2 公開実証内容

係留気球を用いた実験では、無線中継元装置（親機）と係留気球に搭載した無線中継装置（子機）で構成され、図 3.4.6(a)に示すように雪上車上に固定し、移動可能とした。一方、ドローンを用いた実験については、親機とドローンに搭載した子機で構成され、親機と子機は係留気球を用いた実験構成と同一のものが使用可能であり、図 3.4.6(b)に示す。なお、本実証のドローンを用いた実験では、時間の都合上、実際の電波を発射せず、擬似的な子機を搭載しイメージとして係留線なしで飛行させた。



図 3.4.6 無線中継システム

公開実証実験では、移動通信方式として 5MHz 帯域幅の WCDMA 方式を用い、親機と子機の中継周波数を 3.3GHz 帯、送信電力を 1W、対移動端末へのアクセス周波数を 2.1GHz 帯を用い、送信電力を 10W とした。

図 3.4.7 に示すように高さ 4.5m の雪山を造成し、頂上の下 3.5m の位置 (積雪深 3.5m と等価) に人体を模擬した人形に移動端末を装着して埋めた。造成した雪山の雪質は、雪の密度が 0.2g/cm^3 、含水率が 0~0.2% 以下の典型的な“さらさら雪”であった。係留気球、ドローンは共に造成した雪山から約 30m 離れた地点の上空約 70m の位置に揚げた。

公開実証では、以下の事柄の確認を行った。

- ① 無線中継 Off 時に位置特定ができないこと
- ② 無線中継 On 時に位置特定ができること
- ③ 位置特定ソフトウェアが移動端末の GPS 情報を取得し、その位置を特定できること

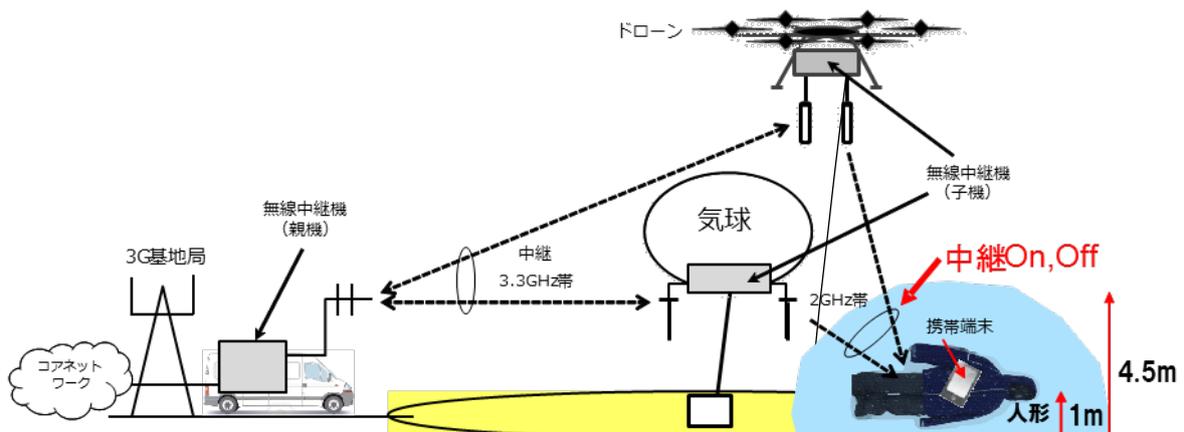


図 3.4.7 デモンストレーションの内容

3.4.3 公開実証結果

公開実証の結果として、以下の確認が全てできた。

- ① 無線中継 Off 時に位置特定ができないことが確認できた。
- ② 無線中継 On 時に位置特定ができることが確認できた。
- ③ 位置特定ソフトウェアが移動端末のGPS情報を取得し、その位置を特定できることが確認できた。

図 3.4.8 に位置特定結果の例を示す。



図 3.4.8 位置特定結果

4. まとめ

携帯電話のGPSで取得した位置情報を、携帯電話ネットワークを用いて取得することで、雪崩などで雪に埋まった遭難者の捜索手法として活用することを念頭に、積雪中における電波伝搬特性等について調査検討を行った。

雪中で通信が可能な距離は、雪の含水率（雪質）、周波数、積雪中で許容される伝搬損失（許容伝搬損失）によって異なり、許容伝搬損失が大きくなれば、最大到達距離を大きく（深く）することができるとの結果が得られた。

図 4.1 に示す 3 層の積雪モデル（積雪の最大の深さ 5m）で、図 4.2(a)（図 3.1.15(a)再掲）に 2.1GHz の周波数（携帯電話の電波）で許容伝搬損失 20dB の場合の最大到達距離、図 4.2(b)（図 3.1.15(b)再掲）に 1.5GHz の周波数（GPS の電波）で許容伝搬損失 10dB の場合の最大到達距離の関係を示す。

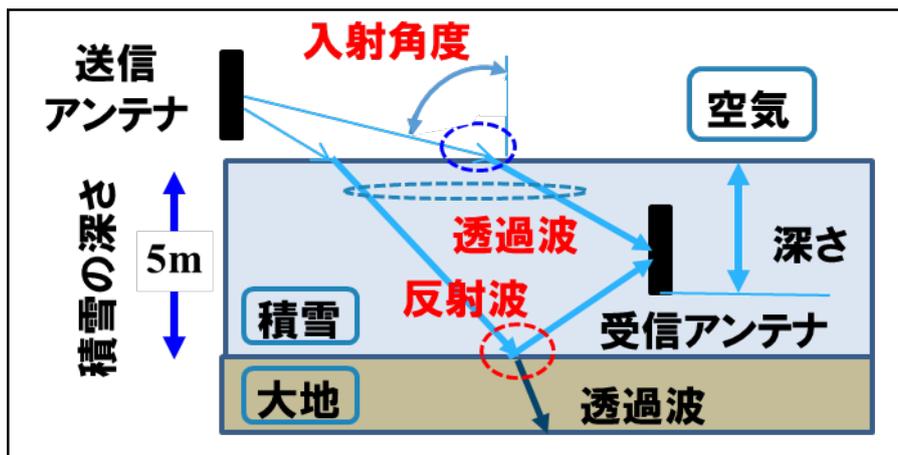


図 4.1 3層の積雪モデル

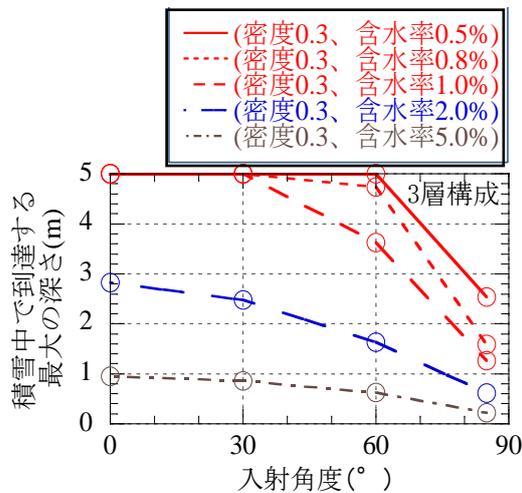


図 4.2(a) 2.1GHz、許容伝搬損失 20dB
の場合の最大到達距離
(図 3.1.15(a)の再掲)

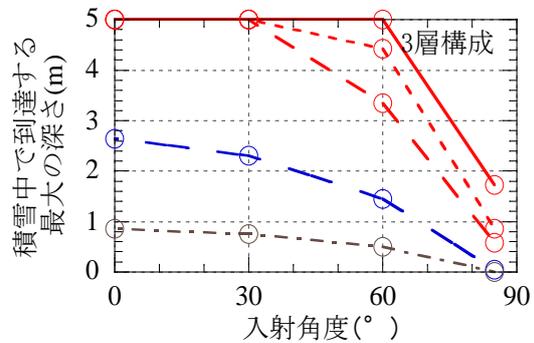


図 4.2(b) 1.5GHz、許容伝搬損失 10dB
の場合の最大到達距離
(図 3.1.15(b)の再掲)

積雪中の最大通信可能距離は、含水率が高くなるほど、入射角が大きくなるほど、また、周波数が低くなるほど、雪中で通信可能な深さが浅くなることから分かる。

冬期のニセコ (含水率 0.5%) 及び春期のニセコ (含水率 1%、2%) における積雪中の最大通信可能距離の一例は、次のとおりとなる。

○冬期のニセコ (含水率 0.5%)

- ・携帯・スマホ等電波 (2.1GHz) : 入射角度 60° 以下の場合、深さ 5m まで通信可能
- ・GPS 電波 (1.5GHz) : 入射角度 60° 以下の場合、深さ 5m まで通信可能

○春期のニセコ (含水率 1%、2%)

- ・携帯・スマホ等電波 (2.1GHz) :
入射角度 60°、含水率 1% の場合、深さ 3.8m まで通信可能
入射角度 60°、含水率 2% の場合、深さ 1.7m まで通信可能
- ・GPS 電波 (1.5GHz) :
入射角度 60°、含水率 1% の場合、深さ 3.2m まで通信可能
入射角度 60°、含水率 2% の場合、深さ 1.5m まで通信可能

北海道虻田郡倶知安町の冬期(12月～2月)の雪の含水率は0.8%以下であり、2.1GHz 及び 1.5GHz のいずれの場合でも入射角度が 60° 以下であれば端末が 5m(雪の最大の深さ)埋もれた場合でも通信が可能である。春期になり雪の含水率が 1%、2% となる高くなると、入射角度が 60° の場合で、2.1GHz ではそれぞれ 3.8m、1.7m、1.5GHz ではそれぞれ 3.2m、1.5m と通信の最大到達距離は浅くなるとの結果が得られた。

また、係留気球又はドローンを用いて中継する実験構成によるフィールド実証により、積雪中3.5mの深さに設置した携帯電話端末の位置を特定できることを確認した。

今後、同一帯域や隣接帯域を利用する既存の無線システムへの影響についての更なる検証、ドローンに基地局又は陸上移動中継局を設置して運用を行う際に、その安全な運用を確保するために必要となるドローンの技術的条件及び運用の条件（運用可能な高度、風速、空域等）等について、引き続き検討を行うことが必要である。

資料編

資料1 携帯・スマホを利用した遭難者の位置特定に関する調査検討会 開催趣旨

近年、登山やスキーによる山岳での遭難事故が増加傾向にあり、特にスキー場のコース外等を滑走するバックカントリーにおいて、雪崩等による遭難事故が多く発生している。

このような遭難事故の発生時には遭難者を一刻も早く救助する必要があるが、特に雪崩等による冬期間の遭難事故の場合には、救助までの絶対時間が生存率に大きく関わることから、遭難者の早期の位置特定が大きな課題となっている。

これまで、遭難者の位置を特定するための有効な手段として、電波を活用した多くの検討が行われてきたが、遭難者が発信器等を持っていることが必要であり、その機器が高価なため普及には至っていない。

そこで、現在広く普及している携帯・スマホ等を活用することにより、雪崩等によって遭難者が雪の中に埋もれた状況においても早期に位置特定を可能とする捜索システムの実現が、スキー場、警察や消防等の捜索救助機関からも期待されている。

このようなことから、本調査検討会では、携帯・スマホ等が雪の中に埋もれた状況において、積雪等がGPS衛星電波の受信及び基地局との通信に及ぼす影響、必要な出力・エリアについて、技術的検証を交えた調査検討を行い、遭難者の早期の位置特定に向けた方策等を提言し、電波の有効利用の促進に資することを目的として開催するものである。

資料2 携帯・スマホを利用した遭難者の位置特定に関する調査検討会 設置要綱

1 名称

本調査検討会は、「携帯・スマホ等を活用した遭難者の位置特定に関する調査検討会（以下「調査検討会」という。）」と称する。

2 目的

スキー場等での雪崩等の遭難を想定し、遭難者が所有する携帯・スマホ等を活用したGPS信号の受信状況や基地局との通信状況、また、必要な出力や通信エリアについて技術的検証を交えた調査検討を行い、遭難者の早期の位置特定に向けた方策等について提言し、電波の有効利用の促進に資することとする。

3 検討項目

調査検討会の目的を遂行するために、携帯・スマホ等を活用した遭難者の位置特定に関する次の項目について、調査検討する。

- (1) 電波を活用した遭難者の位置特定方法の現状と課題
- (2) 携帯・スマホ等の雪中環境下での通信状況等についての技術的条件等
- (3) 携帯・スマホ等を活用した遭難者の位置特定の方策等の提言
- (4) その他必要な事項

4 構成

調査検討会の構成は、次のとおりとする。

- (1) 調査検討会は、北海道総合通信局長が委嘱した委員により構成する。
- (2) 調査検討会に、座長1名を置く。
- (3) 座長は、委員の互選により選出する。
- (4) 座長は、調査検討会を代表し、会務を総理する。
- (5) 座長は、委員の中から副座長を指名する。
- (6) 副座長は、座長を補佐し、座長に事故あるとき又は座長が欠けたときは、その職務を代理する。
- (7) 調査検討会には、具体的な検討を行う作業班（WG）を置くことができる。
- (8) 作業班の構成は、調査検討会で定める。

- (9) 調査検討会には、必要に応じて専門家の参加を認めることができる。
- (10) 調査検討会の事務局は、北海道総合通信局無線通信部企画調整課に置く。

5 運 営

調査検討会の運営は、次のとおりとする。

- (1) 調査検討会は、座長が招集し、主宰する。
- (2) 調査検討会は、必要に応じ電子メール等による運営を行う。
- (3) 作業班の開催に必要な事項は、別途定める。
- (4) その他運営に関して必要な事項は、調査検討会において定める。

6 開催期間

設置の日から平成29年3月31日までの間で、報告書を取りまとめる日までとする。

7 その他

- (1) 調査検討会における調査検討事項に関する成果を公表するときは、あらかじめ北海道総合通信局の承認を得るものとする。
- (2) 調査検討会の成果物に関する権利（例えば、調査検討結果を記した著作物等）は、原則として北海道総合通信局に帰属する。

附 則

この要綱は、平成28年6月17日から施行する。

資料3 携帯・スマホを利用した遭難者の位置特定に関する調査検討会 委員構成

敬称略・氏名五十音順（座長・副座長除く）

平成29年3月15日現在

座長 大鐘 武雄	北海道大学 大学院情報科学研究科 インテリジェント情報通信研究室 教授
副座長 筒井 弘	北海道大学 大学院情報科学研究科 情報通信ネットワーク研究室 准教授
副座長 日景 隆	北海道大学 大学院情報科学研究科 ワイヤレス情報通信研究室 助教
赤木 裕二	倶知安町 参事 危機管理室 室長
江戸 研治	シャープ株式会社 IoT 通信事業本部 パーソナル通信事業部 協業開発部部長
木村 茂典	北海道警察本部 地域部地域企画課長 警視
佐藤 文雄	ニセコマウンテンリゾート グラン・ヒラフ 株式会社東急リゾート サービスニセコ東急リゾート 業務統括ユニット 総支配人
里見 英樹	一般社団法人 北海道モバイルコンテンツ・ビジネス協議会 代表理事/会長 (株式会社メディアマジック代表取締役)
三本杉 国秀	日本電気株式会社 国内ネットワークソリューション事業部 マネージャー
鈴木 敦	ソフトバンク株式会社 北海道技術統括部 北海道技術部 部長
外山 隆行	パナソニック株式会社 AVC ネットワークス社 技術本部 技術開発研究所技術開発4部 部長
高橋 政博	羊蹄山ろく消防組合 消防本部 消防課長 消防司令
辻井 宏文	北海道 総務部 危機対策局 危機対策課 課長
土井 敏則	株式会社東芝 放送・ネットワークシステム部 通信システム機器設計担当参事
中川 篤	KDD I 株式会社 技術企画本部 電波部長
古川 憲志	株式会社NTTドコモ 電波部 電波企画担当部長
三木 啓嗣	北海道総合通信局 無線通信部 部長

資料4 検討経過報告

No	開催日時	開催会場	議題
第1回	平成28年6月17日 13:30～15:30	北海道総合通信局 第1会議室	<ul style="list-style-type: none"> 調査検討会の設置について 座長選出・副座長指名について 調査検討概要等について
	最新の情報提供 総務省 総合通信基盤局 電気通信事業部 電気通信技術システム課 課長補佐 影井 敬義 ・「総務省技術試験事務「移動型の携帯電話用災害対策無線通信システムに関する調査検討」の取組み状況について」 北海道警察本部 地域企画課 安全対策第二補佐 松本 孝志 ・「北海道の冬山シーズンにおける山岳遭難発生状況について」		
第2回	平成28年9月12日 14:00～16:00	北海道総合通信局 第1会議室	<ul style="list-style-type: none"> 経過報告について 実証試験計画（案）について
	最新の情報提供 北海道大学 大学院 情報科学研究科 ワイヤレス情報通信研究室 助教 日景 隆 ・「人体による電波の吸収や遮蔽に起因する送受信特性」 ソフトバンク株式会社 研究開発本部フェロー兼研究開発本部特別研究室 室長 藤井 輝也 ・「係留気球無線中継システムの概要」		
第3回	平成28年11月9日 メール審議	—	<ul style="list-style-type: none"> 経過報告について 全体スケジュールの変更について フィールド試験の実施場所について 公開実証試験の実施について 実証試験結果（中間報告）について
第4回	平成29年2月16日 メール審議	—	<ul style="list-style-type: none"> 経過報告について 実証試験結果について 携帯・スマホ等を活用した遭難者の位置特定に関する調査検討報告書骨子（案）について
第5回	平成29年3月15日 15:30～17:00	北海道総合通信局 第1会議室	<ul style="list-style-type: none"> 経過報告について 調査検討報告書（案）について （本体版・概要版）

平成29年3月

携帯・スマホ等を活用した遭難者の位置特定に関する調査検討
報告書

携帯・スマホ等を活用した遭難者の位置特定に関する調査検討会

事務局：北海道総合通信局 無線通信部企画調整課

〒060-8795

札幌市北区北8条西2丁目1-1 札幌第1合同庁舎

電話 011-709-2311（内線4622）

FAX 011-700-5463

HP <http://www.soumu.go.jp/soutsu/hokkaido/>