
UWB無線センサーネットワークの 周波数共用条件に関する調査検討

報告書

平成22年3月

UWB無線センサーネットワークの
周波数共用条件に関する調査検討会

はじめに

UWB無線システムは、極めて広い周波数帯域を利用する特質を生かし、近距離での高速なデータ伝送ツールとして既に利用されている。また、超広帯域性を利用したインパルス送信による高精度な測距・測位の可能性を有しており、物流を始めとする様々な分野で、人・物の管理が可能なセンサーシステムとしての利用が注目されている。

UWB無線を通信用途と併せてセンサー用途に適用することは、周波数の有効利用の観点からも期待されるところであるが、センサー用途の実用化には、他の無線システムとの干渉検討に必要な事項について検討が必要とされている。

このような背景から、本調査検討では、実働する倉庫環境における技術試験を通し、ハイバンド(7.25GHz～10.25GHz)UWBによる測距、測位の実現可能性、有効性を確認した。また、実際の倉庫でUWB無線を利用した場合を想定し、壁等の境界領域における透過減衰量や、荷の搬出入口である開口部からの電波伝搬特性を明らかにし、周波数を共用する他の無線システムとの周波数共用条件等へ反映するためのデータを取得すると共に、具体的なシステムを例とし干渉検討を行った。

本調査検討会における多くの議論と技術試験の結果が、今後、センサー用途の実現に向けて、関連する各種検討の一助になれば幸いである。

最後に、本調査検討会の各技術試験を実施するにあたり、技術試験環境をご提供いただいたパナソニックロジスティクス株式会社様に、この場を借りて深謝したい。また、調査検討及び技術試験などの関連活動に多大なご協力をいただいた調査検討会構成員及び作業部会構成員各位、関係者各位に深く御礼を申し上げます。

平成 22 年 3 月

UWB無線センサーネットワークの周波数共用条件に関する調査検討会

座長 笹岡 秀一

(同志社大学 理工学部 電子工学科 教授)

第1章 調査検討概要	1
1.1 調査検討の背景.....	1
1.2 調査検討の目的.....	1
1.3 UWB無線システムの分類と検討対象.....	1
1.4 UWB無線センサーネットワークの具体的利用イメージ.....	2
1.5 調査検討における技術試験項目.....	3
1.5.1 ハイバンドUWBの測距及び測位に係る技術試験.....	3
1.5.2 ハイバンドUWBの周波数共用条件に係る技術試験.....	3
1.5.3 UWB無線センサーネットワークに係る技術試験.....	4
1.6 技術試験環境.....	4
1.6.1 技術試験環境の選定条件.....	4
1.6.2 選定した技術試験環境.....	4
第2章 ハイバンドUWBの測距及び測位に係る技術試験	6
2.1 技術試験概要.....	6
2.2 ハイバンドUWB装置.....	6
2.2.1 ハイバンドUWB装置概要.....	6
2.2.2 ハイバンドUWB信号.....	7
2.3 測距精度の試験.....	9
2.3.1 目的.....	9
2.3.2 測距方法.....	9
2.3.3 測距精度.....	10
2.3.4 試験構成及び試験方法.....	11
2.3.5 試験結果.....	12
2.3.6 考察.....	14
2.4 測位精度の試験.....	15
2.4.1 目的.....	15
2.4.2 測位方法.....	15
2.4.3 測位精度.....	16
2.4.4 試験構成及び試験方法.....	16
2.4.5 試験結果.....	17
2.4.6 考察.....	19
2.5 電波伝搬環境の変化の測距・測位に対する影響.....	21
2.5.1 目的.....	21
2.5.2 試験構成及び試験方法.....	21
2.5.3 試験結果.....	23
2.5.4 考察.....	24
2.6 まとめ.....	25
第3章 ハイバンドUWBの周波数共用条件に係る技術試験	26
3.1 技術試験概要.....	26
3.2 ハイバンドUWB装置.....	26

3.2.1	ハイバンドUWB装置構成.....	26
3.2.2	ハイバンドUWB信号出力.....	26
3.2.3	ハイバンドUWB信号スペクトラム.....	27
3.3	比較用としてのローバンドUWB装置.....	27
3.3.1	ローバンドUWB装置構成.....	27
3.3.2	ローバンドUWB信号出力.....	28
3.3.3	ローバンドUWB信号スペクトラム.....	28
3.4	スペクトラムアナライザによる電力測定方法.....	29
3.4.1	測定系.....	29
3.4.1.1	ハイバンドUWBの測定系.....	29
3.4.1.2	ローバンドUWBの測定系.....	31
3.4.2	測定パラメータ値の比較.....	32
3.5	屋内(倉庫内)伝搬特性の測定.....	33
3.5.1	目的.....	33
3.5.2	試験構成及び試験方法.....	33
3.5.3	試験結果.....	34
3.5.4	考察.....	35
3.6	透過減衰量の測定.....	36
3.6.1	目的.....	36
3.6.2	透過物概要.....	36
3.6.3	試験構成及び試験方法.....	39
3.6.4	試験結果.....	40
3.6.5	考察.....	40
3.7	開口部から屋外への電波伝搬特性測定.....	42
3.7.1	目的.....	42
3.7.2	試験構成および試験方法.....	42
3.7.2.1	固定機からの電波伝搬.....	42
3.7.2.2	移動機からの電波伝搬.....	43
3.7.3	試験結果.....	44
3.7.3.1	固定機からの電波伝搬の試験結果.....	44
3.7.3.2	移動機からの電波伝搬の試験結果.....	45
3.7.4	考察.....	46
3.7.4.1	固定機からの電波伝搬.....	46
3.7.4.2	移動機からの電波伝搬.....	46
3.8	まとめ.....	46
第4章	UWB無線センサーネットワークに係る技術試験.....	47
4.1	目的.....	47
4.2	試験構成及び試験方法.....	47
4.3	試験結果.....	49
4.4	まとめ.....	50

第5章 ハイバンドUWBの既存無線システムへの干渉検討	51
5.1 干渉検討概要	51
5.2 ハイバンドUWBの屋外への伝搬	51
5.2.1 検討手順	51
5.2.2 検討結果	52
5.3 倉庫で使用されるハイバンドUWBの固定マイクロへの干渉検討	53
5.3.1 前提条件	53
5.3.2 被干渉となる固定マイクロの位置	53
5.3.3 被干渉固定マイクロの諸元と干渉計算	54
5.3.4 検討結果	55
5.3.5 考察	56
5.4 UWB無線センサーの既存固定マイクロへの干渉検討	57
5.4.1 背景	57
5.4.2 干渉モデルの考え方	57
5.4.3 UWB無線センサーの分布	58
5.4.4 検討結果	59
5.5 今後の検討課題	61
参考1 使用機器および特性等	63
参考2 調査検討会開催趣旨	65
参考3 調査検討会開催要綱	66
参考4 調査検討の開催状況	67
参考5 調査検討会構成員名簿	68
参考6 作業部会構成員名簿	69

第1章 調査検討概要

1.1 調査検討の背景

近年、倉庫、工場などにおいて、作業者の安全管理や物品管理の効率化、高度化が求められており、人や物の状態や位置を正確に測定できるセンサーネットワークの実現が期待されている。

UWB無線システムは、極めて広い周波数帯域にわたって電力を拡散させる無線システムであり、大容量データを高速伝送する通信用途のほか、数十センチオーダの高精度な測位技術として注目されている。

通信用途については既に関係法令が整備され実用化されているが、センサー用途については、他の無線システムとの干渉検討に必要な事項について引き続き検討が必要とされているところである。(情報通信審議会情報通信技術分科会UWB無線システム委員会報告書(2006.3.27))

このような背景から、ハイバンド(7.25GHz～10.25GHz)のUWB無線システムを活用したセンサーネットワークの実現に向けて、倉庫、工場等の実環境において技術試験を実施し、測位等の精度や他の無線システムとの周波数共用条件等について調査検討を行うこととしたものである。

1.2 調査検討の目的

ハイバンド(7.25GHz～10.25GHz)のUWB無線システムを活用したセンサーネットワークについて、倉庫等の実環境におけるセンサーネットワークとしての機能の有効性の把握を行う。

また、建物構造による電波の遮蔽効果等を調査検討し、他の無線システムとの周波数共用条件に反映することを目的とする。

1.3 UWB無線システムの分類と検討対象

UWB無線システムの分類と本調査検討における検討対象を図 1.3.1 に示す。

対象とするUWBは、今後の利用として期待されている、送信速度がローレート(50Mbps未満)のセンサー用途であり、かつ周波数帯がハイバンド(7.25GHz～10.25GHz)のUWB無線システムとしている。

なお、ハイバンドUWBとの電波伝搬上の比較、及びUWB無線センサーネットワークに係る技術試験ではローバンドUWBを用いた。

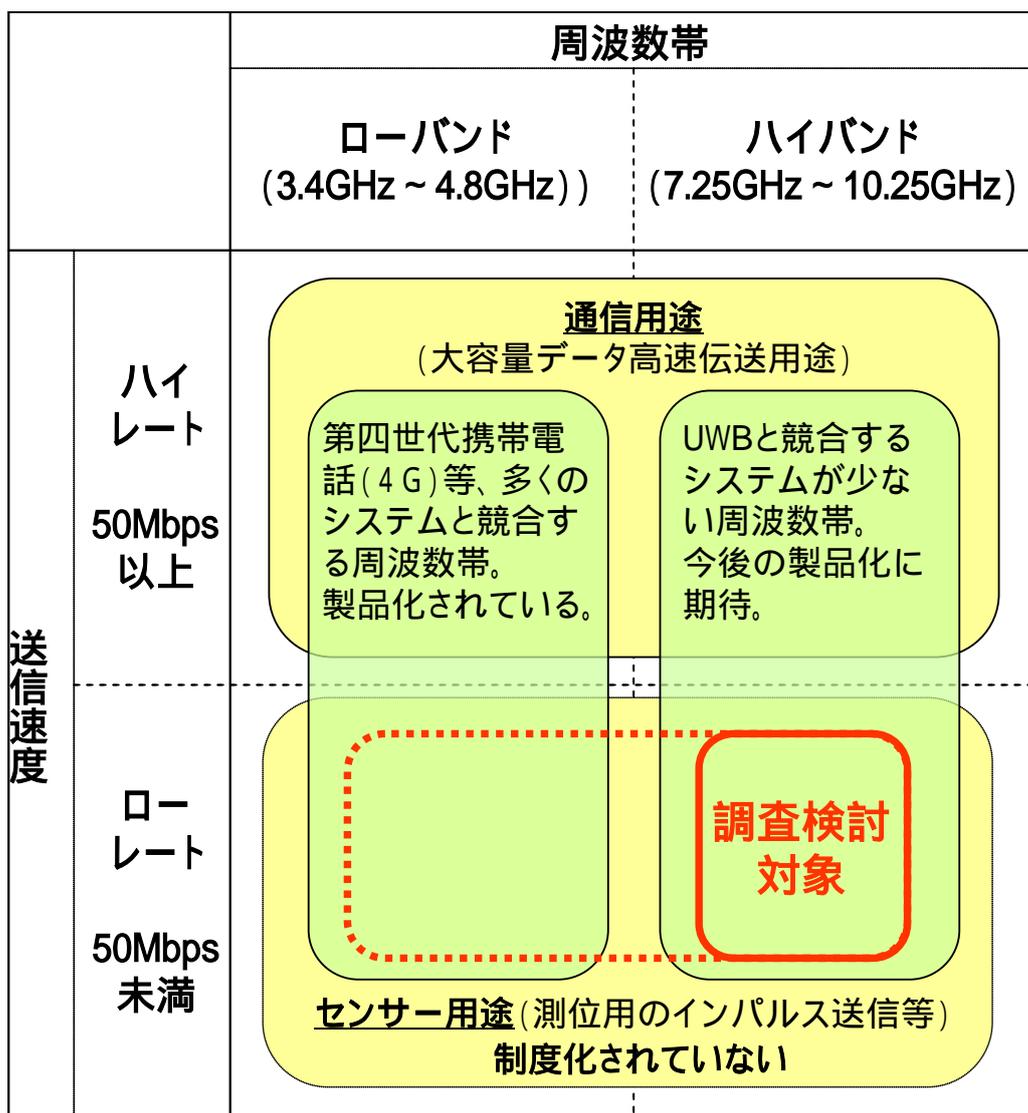


図 1.3.1 UWB無線システムの分類と本調査検討における検討対象

1.4 UWB無線センサーネットワークの具体的利用イメージ

本調査検討で扱うUWB無線センサーネットワークの具体的利用イメージを図 1.4.1に示す。

例えば、倉庫等において、UWB装置とセンサーから構成されるUWB無線センサーにより、物品の位置、状態(温度、振動等)等の情報をUWBを介して収集し、センサーネットワークプラットフォームにより加工して、目的にあった情報を取得することができる。

また、UWBを通して遠隔制御も可能である。

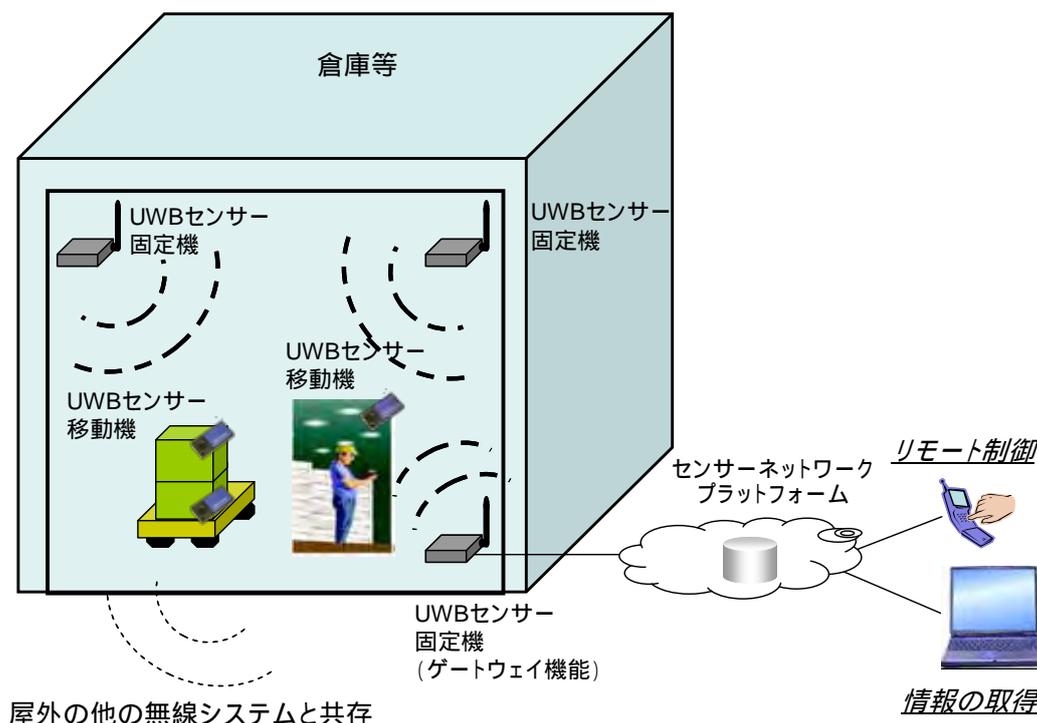


図 1.4.1 UWB無線センサーネットワークの利用イメージ

1.5 調査検討における技術試験項目

1.5.1 ハイバンドUWBの測距及び測位に係る技術試験

実際の倉庫にハイバンドUWB装置を設置し、インパルス送信で動作させ、対象物までの距離、及び対象物の位置を測定し、その誤差を分析し、ハイバンドUWBのセンサー用途としての有効性を調査検討した。

また、電波伝搬上の環境変化(UWB装置の付近の鉄扉の有無)が測距、測位結果にどのような影響を及ぼすかについても調査した。

技術試験結果を通し、ハイバンドUWBによる倉庫における物品の位置、状態管理、及び人の動線管理への適用性について検討した。

1.5.2 ハイバンドUWBの周波数共用条件に係る技術試験

ハイバンドUWBから送出される電波について、倉庫内の電波の伝搬状況や、倉庫の壁や扉等による透過減衰量を定量的に把握した。

屋内に設置されたハイバンドUWBから屋外へ漏洩する電波伝搬状況について、屋外への電波漏洩量が大きくなる倉庫の開口部(荷の搬出入口)付近にUWBが設置された場合を含め、技術試験で得た結果をもとに、シミュレーションを行った。

さらに、倉庫でハイバンドUWBを使用した場合の、周波数を共用する他の無線システム(固定マイクロ無線システム)への与干渉を推定した。

1.5.3 UWB無線センサーネットワークに係る技術試験

UWB無線センサーネットワークを活用した物品管理アプリケーションを倉庫内にデモ環境を構築して実施し、実環境でのUWB無線センサーネットワークの有効性を確認した。物品の管理項目は、物品の位置、状態(温度、振動)の把握、及び物品への制御(LED表示、ブザー鳴動)とした。併せてデモにおいては、既存用途であるブロードバンドデータ伝送による映像での物品管理も行い、UWBの幅広い有用性を確認した。

1.6 技術試験環境

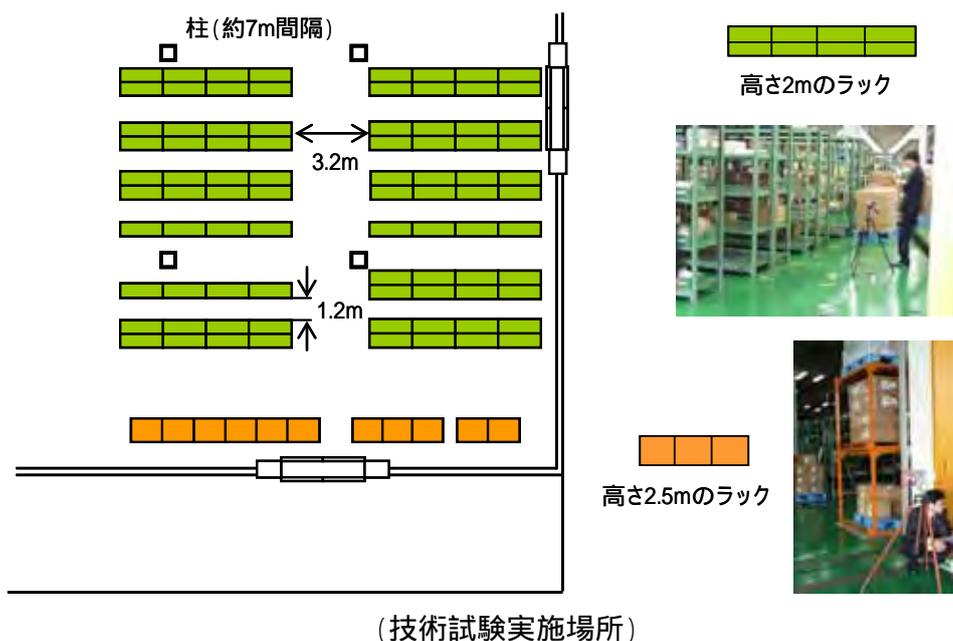
1.6.1 技術試験環境の選定条件

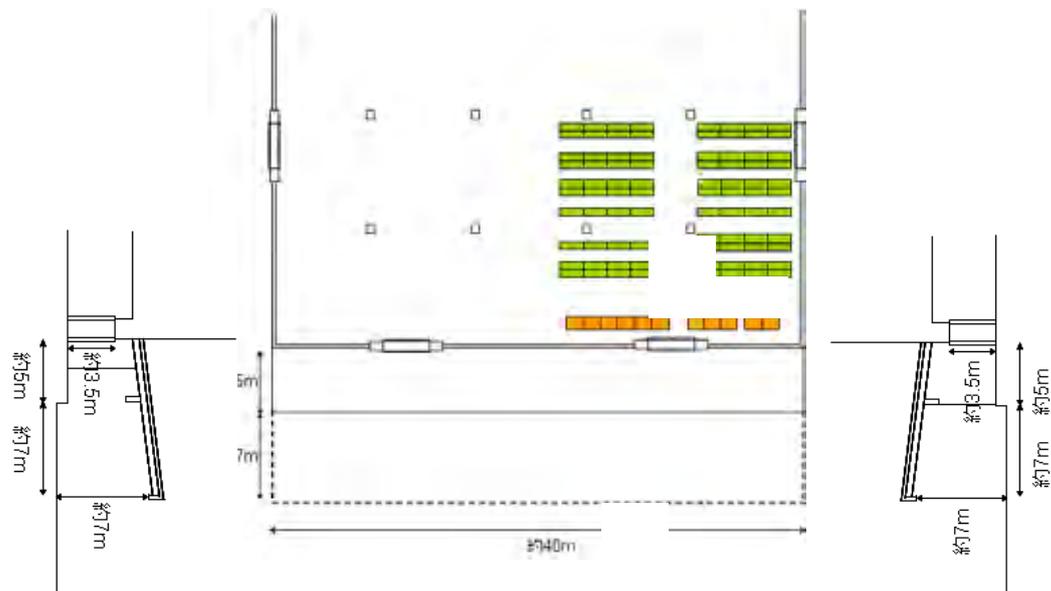
技術試験環境の選定にあたっては、以下の条件を満たす場所を選定した。

- (1) 実際に稼働している倉庫で、荷棚、荷物が存在していること。ただし、測定時には作業員、リフト等の動きがない状態を作れること。
- (2) UWB装置等が適切な位置に設置可能であり、荷の位置や状態の管理が、センサーネットワークで実現可能な倉庫であること。
- (3) 開口面(荷の搬出入口)が存在し、倉庫内のUWB装置から屋外への電波送出が十分見られる場所であり、屋外の被干渉システムに対して厳しい干渉状況を作り出せること。
- (4) 様々なケースでの透過損のデータを取得するため、屋外・屋内の境界面の種類が複数存在すること。

1.6.2 選定した技術試験環境

技術試験で利用した環境を図 1.6.1、写真 1.1にそれぞれ示す。





(技術試験実施場所を含む倉庫全体)

図 1.6.1 技術試験環境



写真 1.1 技術試験環境

第2章 ハイバンドUWBの測距及び測位に係る技術試験

2.1 技術試験概要

ハイバンドUWBの測距及び測位に係る技術試験は、以下の項目について実施した。

(1) 測距精度の試験

実際に荷の測位を行うことを想定し、移動機の測位を行える位置に固定機2台を設置し、固定機、移動機間距離の測定結果と実際の距離とを比較してその差を分析した。

(2) 測位精度の試験

上記、測距試験結果から、測位結果を算出し、実際の位置と比較し、その差を分析した。

(3) 周囲環境の測距・測位精度への影響

測距・測位のための電波伝搬路近傍に電波反射体(鉄扉)がある場合とない場合を周囲環境の変化ととらえ、環境の変化による測定値の変化の有無を調査し、その結果を分析した。

2.2 ハイバンドUWB装置

2.2.1 ハイバンドUWB装置概要

本調査検討では、GIT社製UWB Product Development Kit をシールドボックス(140W x 90D x 45H (mm)) に実装した装置を用いた。固定機2台と移動機1台の計3台で技術試験を実施した。ハードウェアとしては3台とも同一であり、アンテナはヘリカルアンテナとバイコニカルアンテナ(オムニアンテナ)の2種類を準備した。

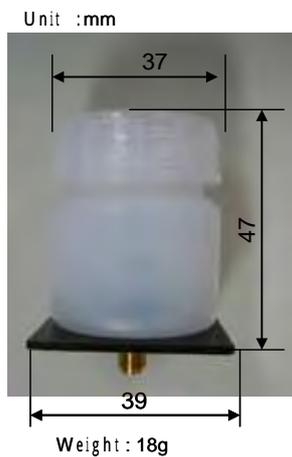
ハイバンドUWB装置の諸元を表 2.2.1に、外観を写真 2.1に、使用したアンテナを写真 2.2にそれぞれ示す。

表 2.2.1 ハイバンドUWB装置諸元

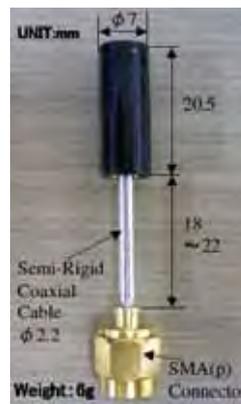
項目	諸元
空中線電力	尖頭値電力 : - 30.3dBm/5MHz (= - 10.3dBm/50MHz)
空中線利得	7dBi (ヘリカルアンテナ) 2dBi (バイコニカルアンテナ)



写真 2.1 ハイバンドUWB装置(左:移動機、右:固定機(2台))



ヘリカルアンテナ
利得: 7dBi



バイコニカルアンテナ
利得: 2dBi

写真 2.2 ハイバンドUWB装置に用いたアンテナ

2.2.2.2 ハイバンドUWB信号

測距・測位に係る技術試験に用いたハイバンドUWB信号を図 2.2.1に示す。

インパルスは、最短間隔約 20ns(約 48MHz)で送出され、プリアンブル区間、及びデータ区間から構成される。1回のインパルス群の長さは約 18 μ sである。

またインパルス幅は、約 1nsである。

プリアンブル区間のインパルスのうち、最後のインパルスは測距用インパルスとして利用し、データ区間では、測距・測位に必要とする固定機、移動機の情報等が伝送される。

1回の測距・測位測定(1度の測定操作)で、1回の測定(1波のインパルスによる測距・測位)が実施される。

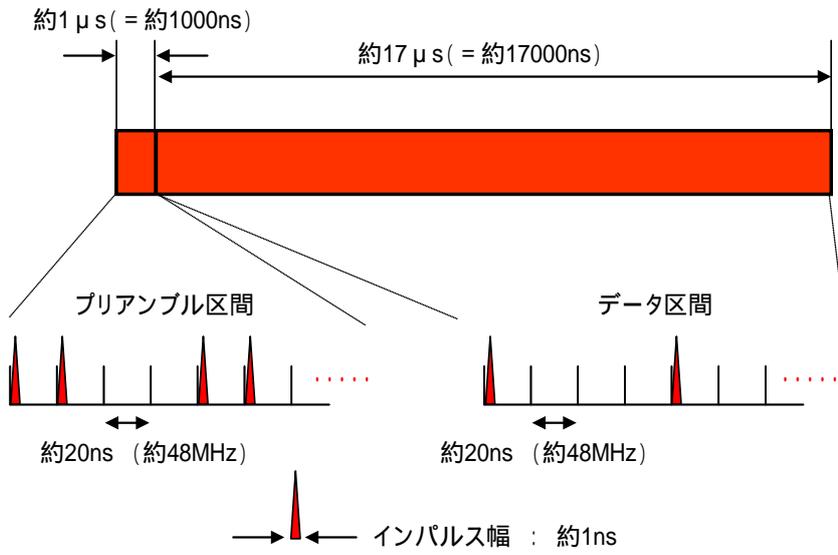


図 2.2.1 ハイバンドUWB信号

技術試験に用いたハイバンドUWBのインパルス波形(時間-電圧)、及びスペクトラム波形を写真 2.3、写真 2.4にそれぞれ示す。



写真 2.3 ハイバンドUWBのインパルス波形(時間-電圧)

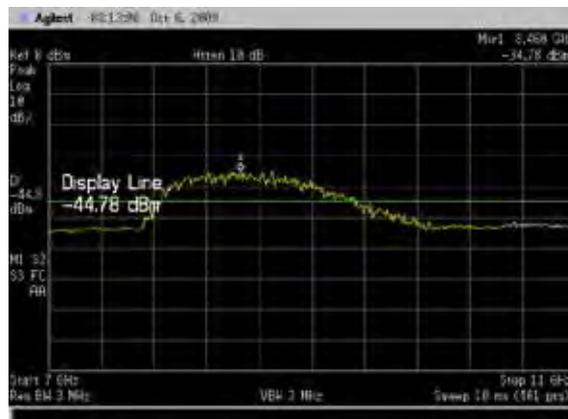


写真 2.4 ハイバンドUWBのスペクトラム波形

2.3 測距精度の試験

2.3.1 目的

ハイバンドUWBを用いて倉庫内の荷の位置を測位するケースを想定し、測位に先立ち測位算定ための基本データとなる測距値を求め、その精度を明らかにする。

2.3.2 測距方法

固定機は、移動機に対してトリガーとなる測距パルスを送出し、これを受けた移動機が測距応答パルスを固定機に返し、要した時間から固定機・移動機間の距離を求める。

ただし、固定機が測距パルスを送信してから、移動機より返ってくる測距応答パルスを受信するまでの時間には、測距にとって不要な時間が含まれており、これを除く必要がある。

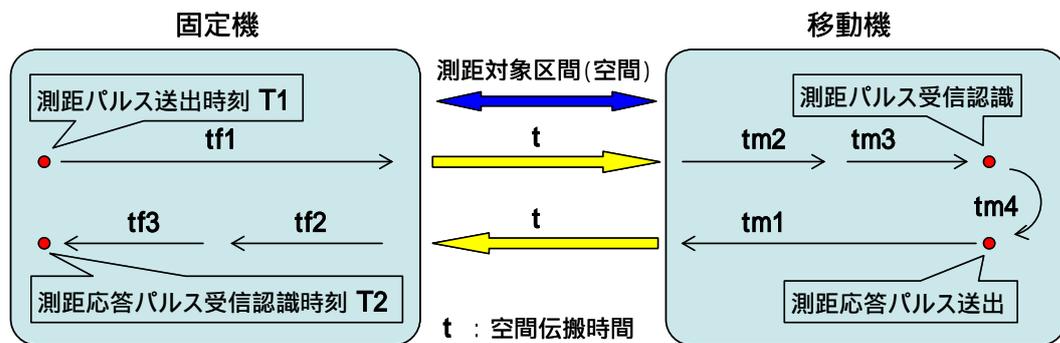
測距にとって不要な時間は図 2.3.1 に示すものがあり、装置内部の回路、配線、空中線、空中線との接続ケーブル等、空間伝送以外の伝送時間や処理時間があげられ、これは装置構成毎に異なる。図中の tf_1 , tf_2 , tm_1 , tm_2 , tm_4 がこれに相当する。

固定機や移動機の受信部は、到達したインパルスはある間隔のタイミングで認識しているため、インパルスが実際に到達してから、その到達を固定機や移動機が認識するまでの時間(次の受信タイミングまでの待ち時間)も測距にとって不要な時間となる。これが受信タイミング周期に依存する時間であり、図中の tf_3 , tm_3 が相当する。

以上より、測距に必要な時間 t は

$$t = ((T_2 - T_1) - (tf_1 + tf_2) - (tm_1 + tm_2 + tm_4) - (tf_3 + tm_3)) / 2 \quad \dots (a)$$

で表され、測距対象区間距離は、〔光速〕 / t により得られる。



tf_1 , tf_2 : 固定機内伝送時間

tf_3 : 固定機の受信タイミングまでの待ち時間

tm_1 , tm_2 , tm_4 : 移動機内伝送時間

tm_3 : 移動機の受信タイミングまでの待ち時間

図 2.3.1 測距方法

受信タイミングまでの待ち時間 tf_3 (固定機)、 tm_3 (移動機) は、インパルスの到達時刻とその到達を認識する受信タイミング時刻との差により測定毎に変動する値であるが、本測距システムでは以下の考え方で値を決めた。図 2.3.2 を例にして示す。

インパルスの到達時刻と受信タイミング時刻との時間差には様々な状態があり、測距にとって不要な時間がほぼ0になる場合や、受信タイミング周期(tfs (固定機)、 tms (移動機))

に近い値となる場合など、固定機では $0 \sim tfs$ 、移動機では $0 \sim tms$ の範囲のいずれかの値をとるが、本測距システムではその平均値をとり、式(a)において、 $tf3 = tfs/2$ 、 $tm3 = tms/2$ とした。

したがって式(a)は、

$$t = ((T2-T1) - (tf1+tf2) - (tm1+tm2+tm4) - (tfs/2+tms/2)) / 2 \cdots (b)$$

となり、これより測距に必要な時間 t 求めることとした。

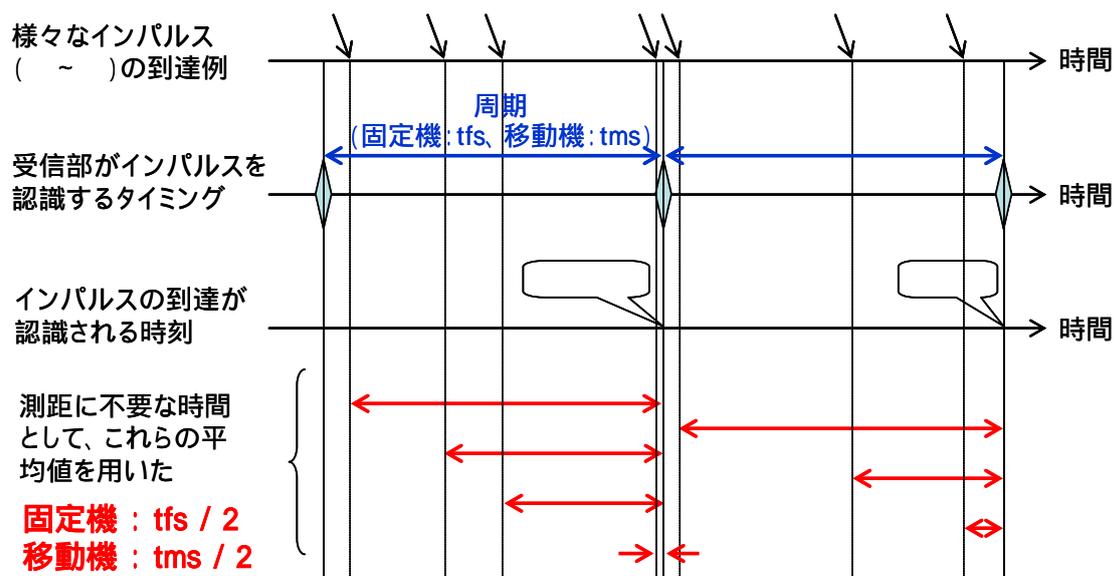


図 2.3.2 インパルスの受信タイミング間隔に関する「測距に不要な時間」

$0 \sim tfs$ の範囲をとる $tf3$ と、 $0 \sim tms$ の範囲をとる $tm3$ を式(b)でそれぞれ固定値である $tfs/2$ 、 $tms/2$ としたため、 $tfs/2$ 、 $tms/2$ の部分には、それぞれ、 $\pm tfs/2$ 、 $\pm tms/2$ の誤差範囲を含むことになる。

今回のシステムではソフトウェア上、 $tfs = tms = 3ns$ としており、 $\pm tfs/2 = \pm 1.5ns$ 、 $\pm tms/2 = \pm 1.5ns$ となることから、式(b)の t の誤差範囲は $\pm 1.5ns$ となる。これは距離換算で $\pm 45cm$ である。

なお、タイミングをとるクロックは高精度の水晶オシレータを使用しており、その精度は $2.5ns$ の時間に対して $\pm 100ppm$ 、すなわち $\pm 2.5ns \times 10^{-4} (= \pm 0.25ps)$ となっており、距離換算では $\pm 0.075mm$ 相当分であることから、タイミングをとるクロック自体の変動誤差は無視できる。

2.3.3 測距精度

実際の距離と測距結果の差 (測距結果 - 実際の距離) の分布を求め、分布の幅が狭いほど精度が高く、広いほど精度が低い、という精度の解釈とした。

2.3.4 試験構成及び試験方法

倉庫内で荷の位置を測位する状況を想定し、固定機は現実的な位置に設置し、移動機を測位対象エリア内の各地点に移動させた構成とした。

図 2.3.3、図 2.3.4 に示すように、幅約 3m、奥行き約 15m の通路を測位対象エリアに定め、2 か所に設置した固定機からの距離 (固定機 WU001・移動機間距離、及び固定機 WU002・移動機間距離) を測定した。移動機の設置場所は 21 か所設定した。

固定機 2 台は、エリアを見渡せるラックの端に設置した。移動機の高さは、荷物の移動時の平均的な高さとして、1m とし、固定機も同じ高さとした。

固定機 WU001 と WU002 から移動機の設置場所 1 か所につき 5 回ずつ測定した。

固定機には測距用ソフトウェアを含む制御用の PC を接続し、固定機及び移動機共にアンテナは、ヘリカルアンテナを使用し、互いに正対させた状態で測定した。

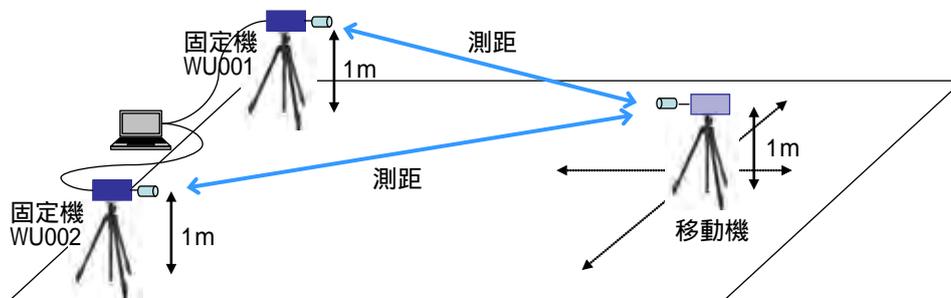


図 2.3.3 測距試験構成

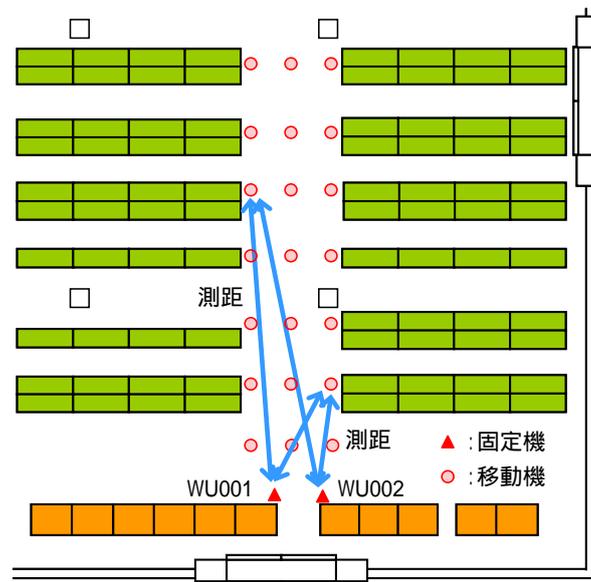


図 2.3.4 測距試験場所

2.3.5 試験結果

固定機・移動機間の実際の距離と測距で得られた測定値との差(誤差)の関係を図 2.3.5に、誤差の度数分布を図 2.3.6に、累積確率分布を図 2.3.7にそれぞれ示す。

誤差は、

$$(\text{誤差}) = (\text{測距値}) - (\text{実際の距離})$$

により算出した。

固定機 WU001・移動機間、及び固定機 WU002・移動機間の測定結果すべてを表示しており、各測定地点ではそれぞれ5回ずつ測定し、5つの測定値から得た平均値と、その測定地点で得られた測定値の範囲を併せて図中に示す。なお、測定できない位置が存在し、これについての考察は後述する。

測距についての技術試験では、以下の結果が得られた。

- ・誤差が ± 約 50cm の範囲に測定数の約 97% が収まる。
- ・誤差が ± 約 30cm の範囲に測定数の約 78% が収まる。
- ・誤差の範囲は、- 58cm ~ + 67cm
- ・標準偏差は、約 23cm

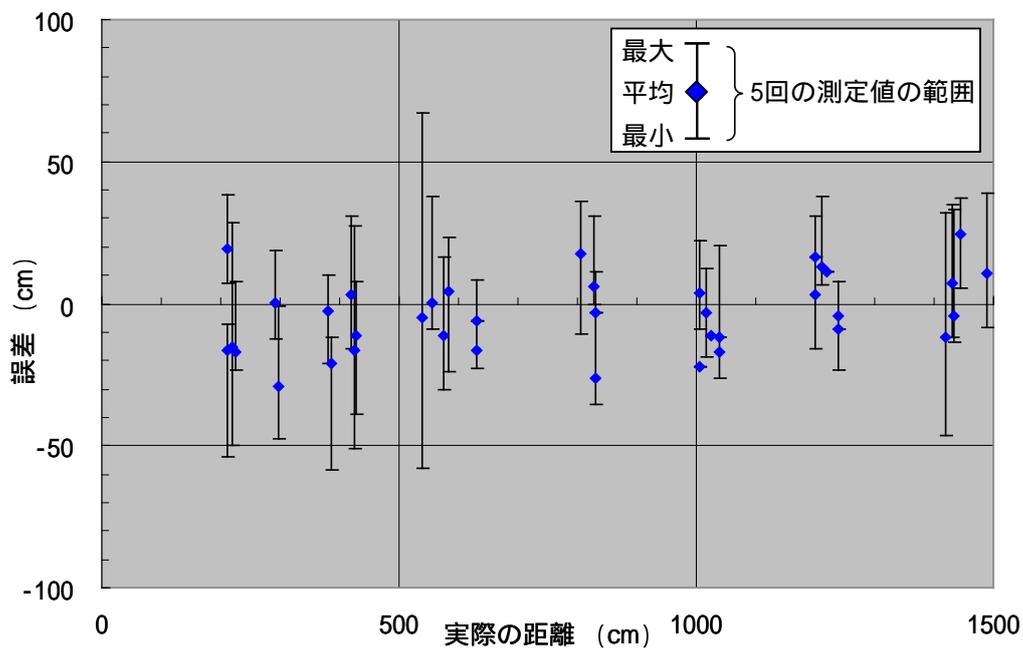


図 2.3.5 実際の距離と測距測定値との差(誤差)の関係

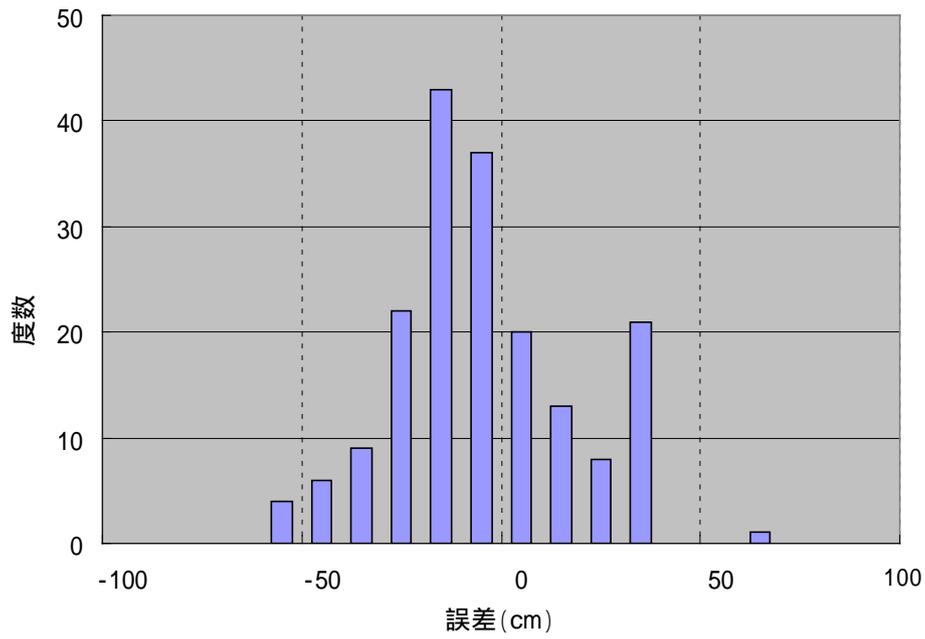


図 2.3.6 誤差の度数分布

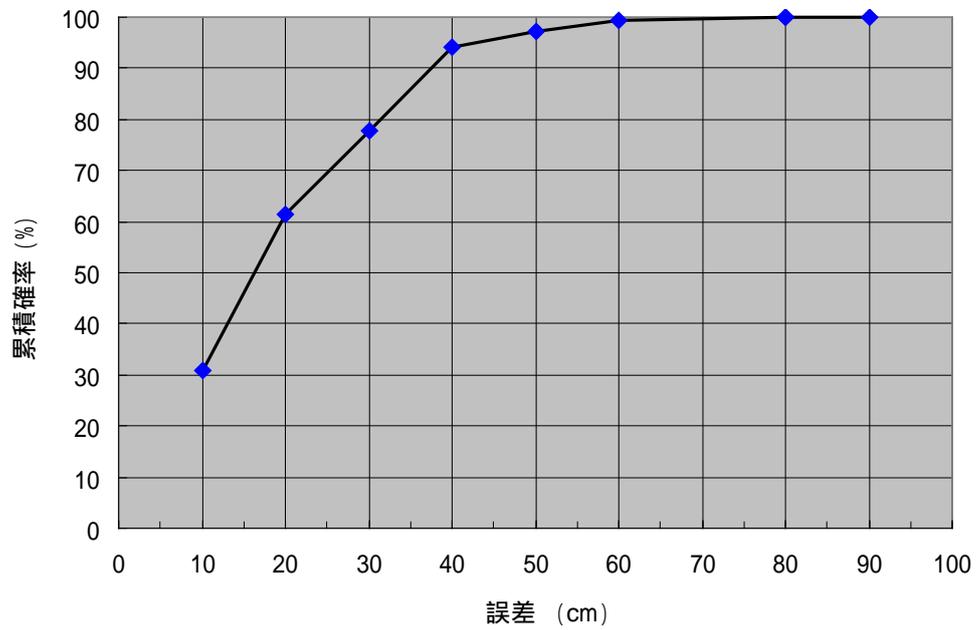


図 2.3.7 誤差の累積確率分布

2.3.6 考察

測距についての技術試験では、以下の結果が得られている。

- ・誤差が±約 50cm の範囲に測定数の約 97%が収まる。
- ・標準偏差は、約 23cm

今回用いた測距・測位システムで想定される誤差要素はインパルスの受信タイミング周期によるもので、その範囲は先に述べたように±45cm であり、ほぼこれに準じた結果が得られたが、特記する結果に対する考察を以下に示す。

(1) 測定できない状況(システムで測距値が表示されない状況)

測距システムのソフトウェア上、測距パルス後に続くデータ部分が読み取れない場合に測距値が表示されなくなる。この原因として、周囲の鉄製の棚などの影響等で電波のマルチパスが生じ、その結果データ列を読み取れなかったことが考えられる。

UWBのようなインパルスを用いる広帯域信号も狭帯域信号と同様、マルチパスの影響でヌル点が生じることが報告されており^[1]、本技術試験でも、こうした環境が現れる可能性はある。

データ部分の確実な読み取りにあたっては、データの再送や誤り訂正等、通信制御方式の変更を施すことにより、改善が期待できる。

(2) 誤差が大きくなる状況

誤差が+67cmとなる場合があった。本技術試験は、見通し内通信としており、距離算定のためのインパルスは原則直接波となるが、これが先に述べたマルチパス現象により読み取れず、直接波に追って到達する反射波を次のタイミングで測距してしまうことが考えられる。

ソフトウェアによる測距計測の間隔は 3ns であるため、本来の測距タイミングを逸して次のタイミングで取得したとすると、測距結果はさらに 45cm 加算される。

例えば、直接波の取得で仮に+25cm の誤差で計算されるはずであったものが、直接波を取得できず、次のタイミングで反射を取得したとすると、式(b)においてT2 が 3ns 分増加することになり、その結果 t が 1.5ns 分増加、すなわち距離換算で 45cm 加算され、誤差は+70cm となる。

^[1] 佐藤隼介、小林岳彦 “UWB信号の見通し内伝搬損失距離特性” 第 480 回電波研連 F 分科会 2003 年 12 月 12 日

2.4 測位精度の試験

倉庫各所に設置された移動機に対し、測距を行った2台の固定機からの測距結果を用いて、測位結果を算出し、実際の位置との差を求め、測位精度の試験を実施した。

2.4.1 目的

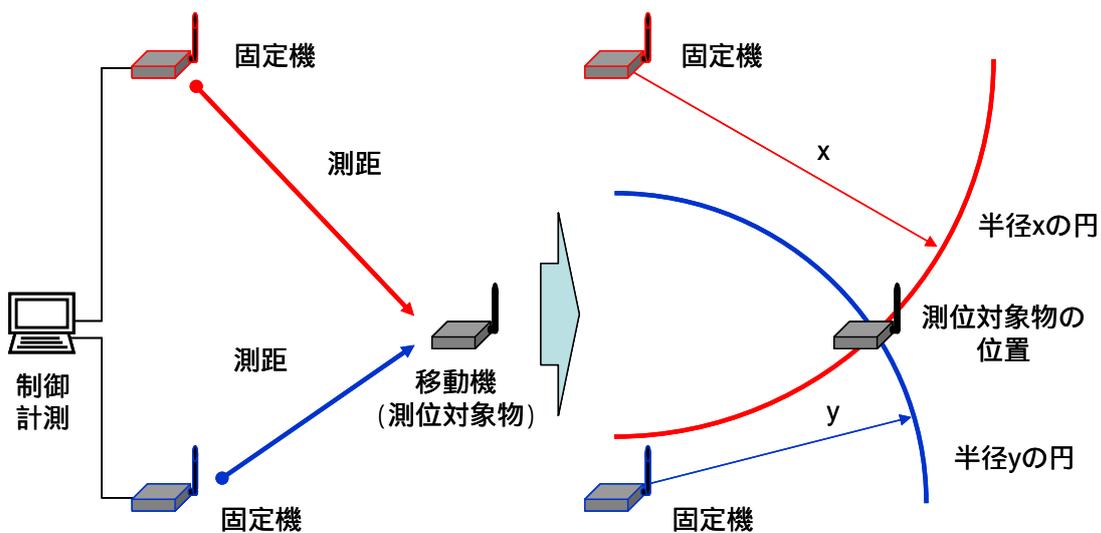
実際の倉庫内で荷が移動するケースを想定し、ハイバンドUWBを用いた測位システムで特定される位置の精度を明らかにする。

2.4.2 測位方法

測位は、2台の固定機を用いて、固定機、移動機間の距離を測定し、得られた距離の交点を移動機の場所とした。したがって、測位は測距を前提とした測定となる。

2か所からの距離測定により測位対象物の位置を特定させるため、本技術試験では、二次元的な位置関係を前提とし、かつ固定機から見た測位対象物のおおよその方向は既知であるとした。

測位方法を図 2.4.1 に示す。



2台の固定機から測位対象物である移動機までの距離をそれぞれ測定する。

固定機・移動機間の測距値(図ではxとy)を半径とする円の交点を測位位置とする。

図 2.4.1 測位方法

2.4.3 測位精度

2 台の固定機と測位対象物(移動機)を含む平面上において、測位対象物の実際の位置と測位で得られた位置との差(誤差)の分布を求め、誤差の分布が狭いほど精度が高く、広いほど精度が低いとした。

2.4.4 試験構成及び試験方法

測位は固定機・移動機間の測距が前提となることから、測距精度の試験で得られた測距結果を用いて算出した。

測位試験構成と測位試験場所について、それぞれ、図 2.4.2、図 2.4.3 に示す。

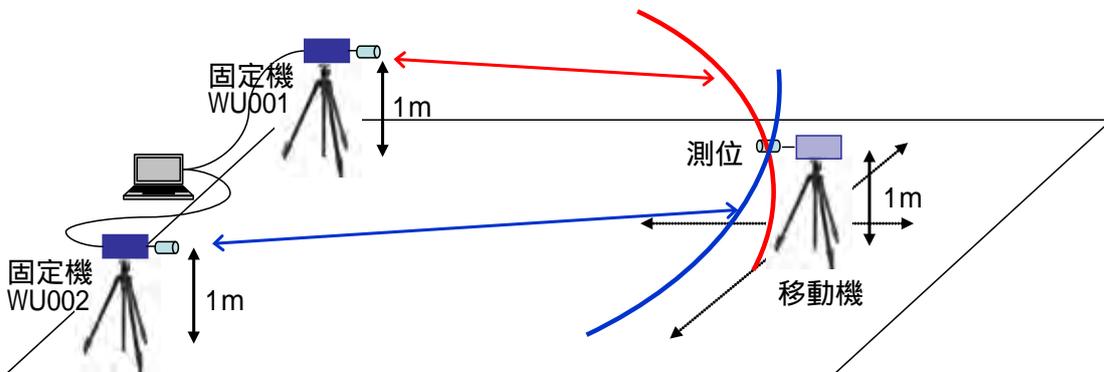


図 2.4.2 測位試験構成

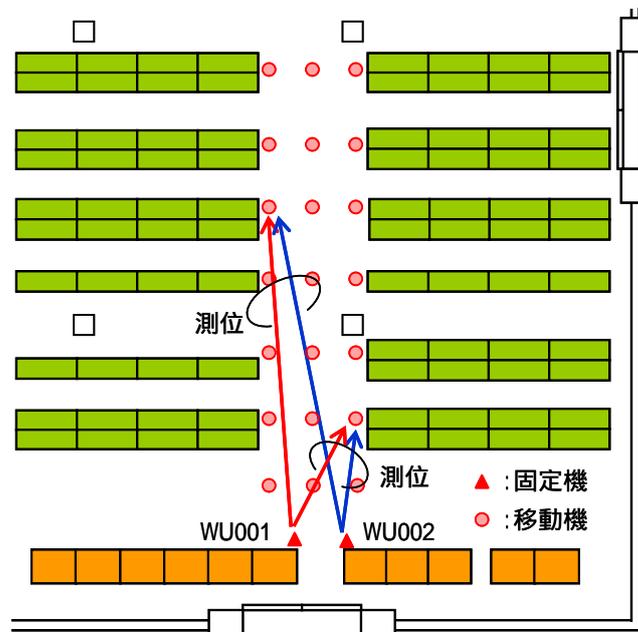


図 2.4.3 測位試験場所

2.4.5 試験結果

移動機の実際の位置と測位で得られた位置との距離差についての度数分布を図 2.4.4 に、累積確率分布を図 2.4.5 にそれぞれ示す。なお、測定は各場所で5回ずつ実施した。

各測定場所と測位された場所との差を図で現したものを図 2.4.6 に示す。

また、各測定値の平均値(実際の位置と測位された位置の差の平均値)を求めた測位誤差を図 2.4.7 に示す。印の位置は実際の位置を示し、測位された位置との差を色別に記載している。

測位については以下の結果が得られた。

- ・平均誤差は約 63cm
- ・測定の約 80%が測位誤差約 1m に収まる
- ・測位誤差は最大で 2.3m(約 15m の距離にある移動機の測位時)
ただし、平均値の最大誤差は約 1.3m
- ・遠距離になるほど測位誤差が大きくなる場合が現れ、その誤差は固定機から見て左右方向に広がる傾向となっている。

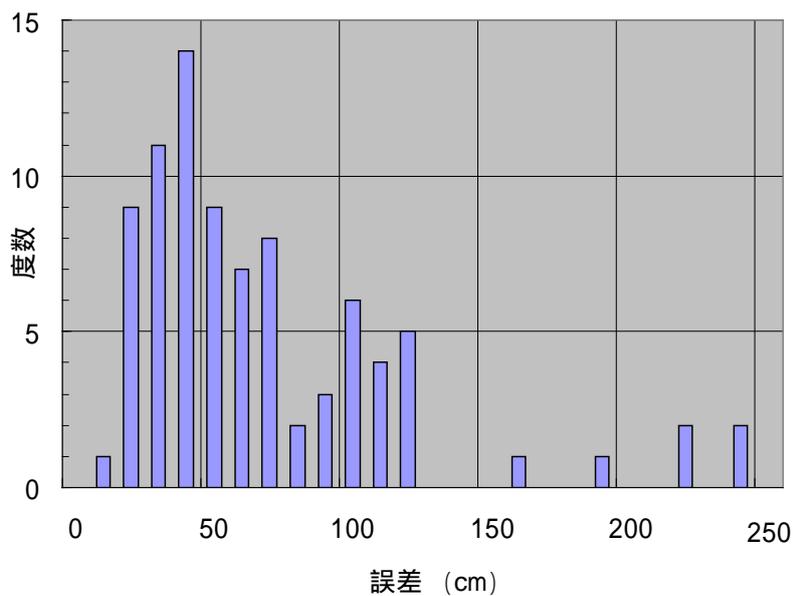


図 2.4.4 測位誤差の度数分布

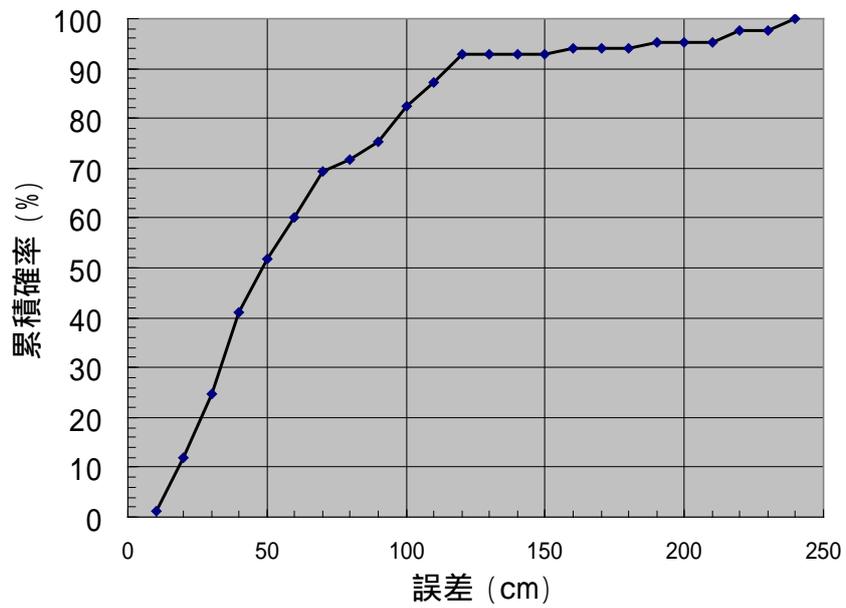


図 2.4.5 測位誤差の累積確率分布

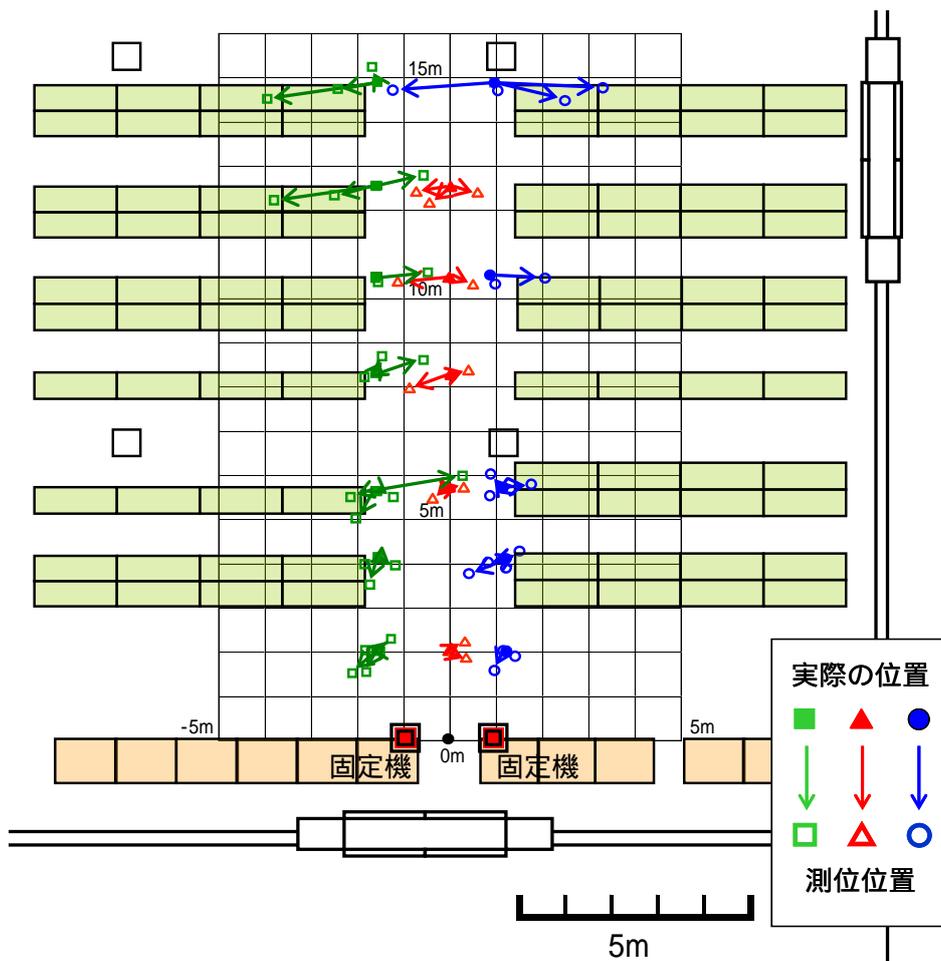


図 2.4.6 各測定場所と測位された場所との差

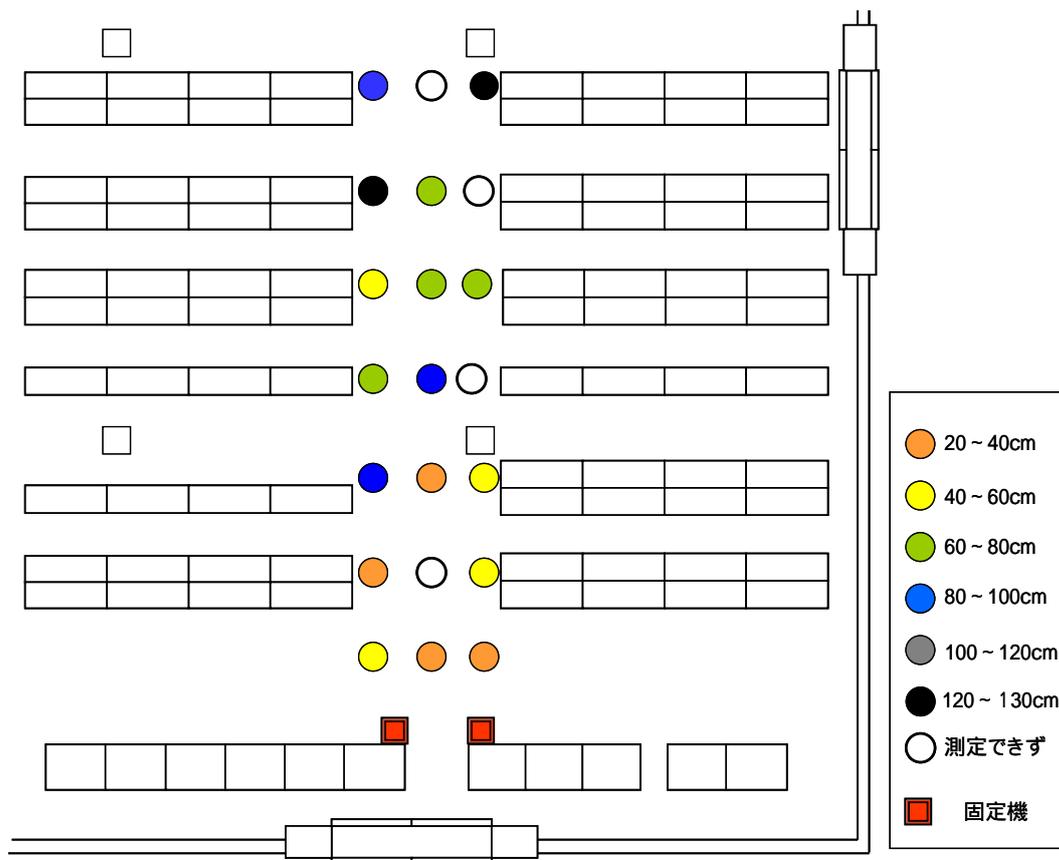


図 2.4.7 各測定場所とその場所における測位誤差(平均値)

2.4.6 考察

測位の平均誤差は約63cm、測定の約80%が誤差約1mに収まり、平均値での最大誤差は約1.3mである。今回のような2点からの距離を基に位置を求める簡易な方法であっても、測定を複数回行って測定値を平均化することで、倉庫内での実用も可能であると考えられる。

遠距離になるほど測位誤差が大きくなる場合があり、その誤差は固定機から見て左右方向に広がる傾向について、2台の固定機と等しい位置にある対象(移動機)を測距する場合を例に示したものが図2.4.8であり、測距の誤差の範囲が距離によらず一定であっても、測位結果のとりうる誤差の範囲は、遠方の対象物を測位するほど大きくなる。(の対象物の測位よりも、の対象物の測位の方が誤差の範囲が広がる。)

固定機・移動機間距離と測位誤差との関係図2.4.9に示す。

図2.4.9には図2.4.8をモデルとして計算した、平均的な測位誤差を示す期待値(確率変数(測位誤差)と確率(測位誤差が生じる確率)との積の総和)も示す。期待値は以下の近似、

- ・固定機間の距離に対して固定機と移動機間の距離が十分大きい
- ・図2.4.8に示す測位誤差のとりうる範囲をひし形に近似
- ・誤差を含む測位位置の分布はこのひし形内で面的に一様に分布する
- ・測位誤差範囲は固定機から見て左右方向に十分大きい

を施し、本試験環境による定数(2 台の固定機間距離 1.4m、測距の誤差範囲 $\pm 0.45\text{m}$)を適用すれば以下の式で近似される。

$$〔測位誤差の期待値〕 = 〔固定局と移動局の距離〕 / 9.3$$

さらに、図 2.4.9 には測位誤差の近似直線も示した。測位誤差の近似直線は最小二乗法(切片を 0)により求め、以下の式で表される。

$$〔測位誤差〕 = 〔固定局と移動局の距離〕 / 13.3$$

測位誤差の近似直線は、測位誤差の期待値を示す直線とほぼ一致しており、遠距離になるほど測位誤差が大きく、その誤差は固定機から見て左右方向に広がる傾向については、ほぼ理論通りの測位結果が得られた。

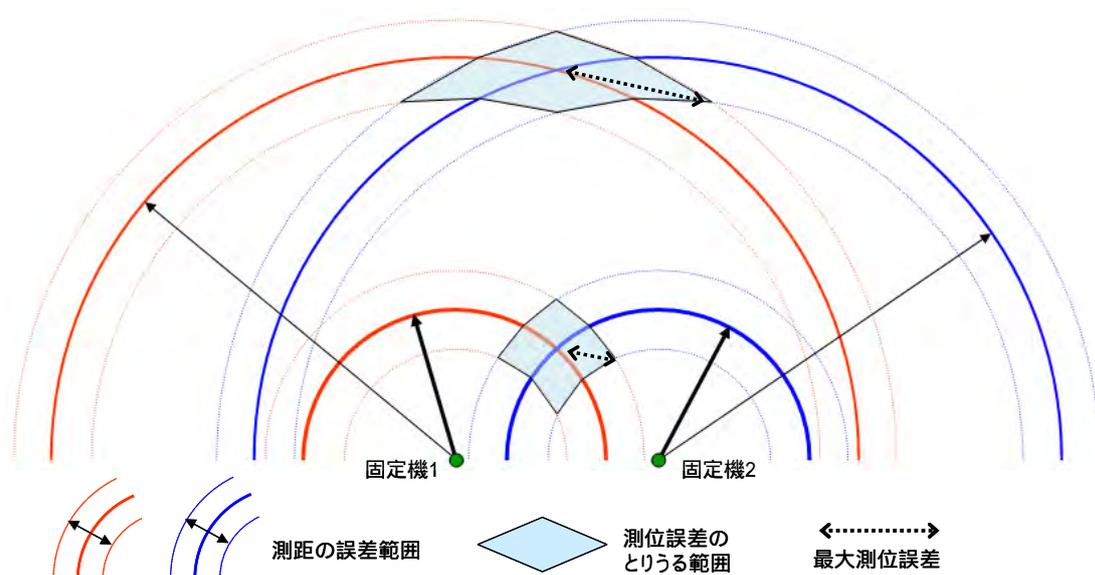


図 2.4.8 測距の誤差範囲と測位の誤差範囲の関係

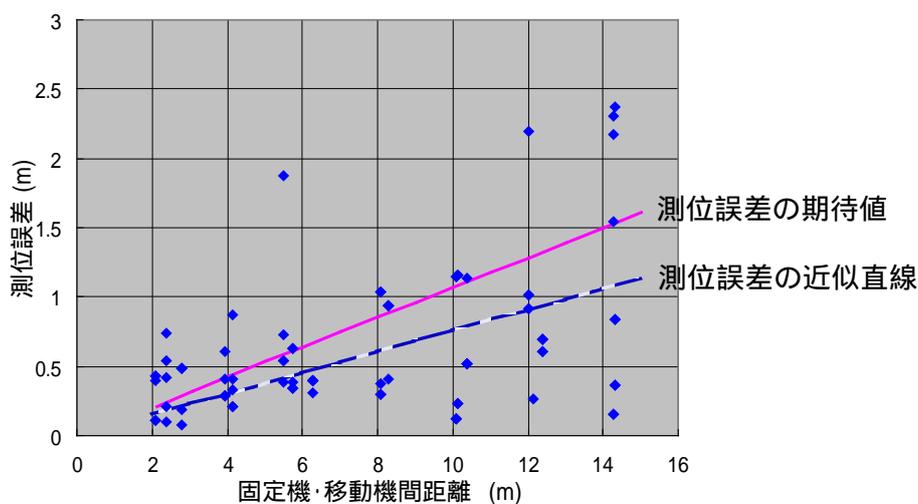


図 2.4.9 固定機・移動機間の距離と測位誤差の関係

2.5 電波伝搬環境の変化の測距・測位に対する影響

2.5.1 目的

鉄扉などにより電波伝搬環境に変化が生じた場合の、測距・測位への影響の有無について調査する。

2.5.2 試験構成及び試験方法

本技術試験では、図 2.5.1、図 2.5.2 に示すように、鉄扉、固定機、移動機の位置関係の違いによる 2 通りの試験構成、

試験構成 A : 鉄扉 - 移動機 - 固定機

試験構成 B : 鉄扉 - 固定機 - 移動機

をとった。

参考までに図には、水平方向の距離を記した。

固定機の場所は、倉庫で実際に荷の測位を行うことを想定し、通路をはさんだ両側のラック上の高さ 2.4m の位置に、固定機の間隔を 3.2m として設置した。

倉庫内の鉄製の扉を開閉させることにより、電波環境の変化を発生させ、それぞれの試験構成で、鉄扉の有り(扉を閉めた状態)、無し(扉を開けた状態)について測定した。また、移動機の場所をそれぞれ 2 か所設定して測定した。

また、測定(測距)は移動機の位置ごとに、おのこの 5 回ずつ実施した。

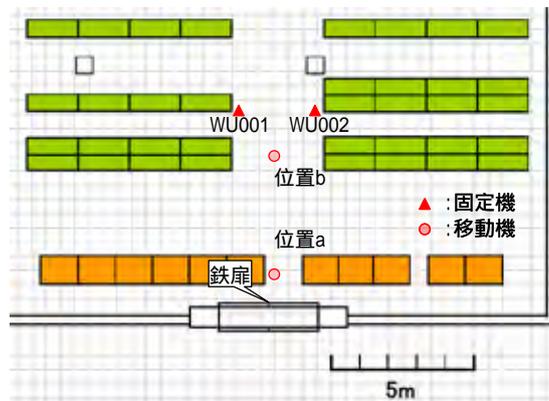
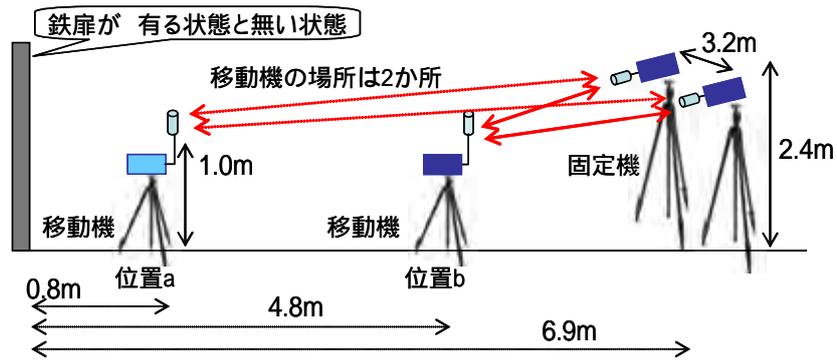


図 2.5.1 試験構成A (移動機が鉄扉付近にある場合)

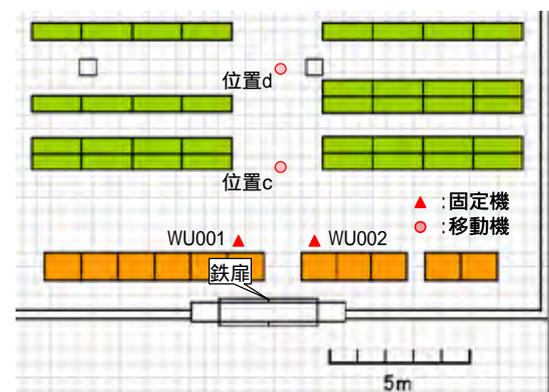
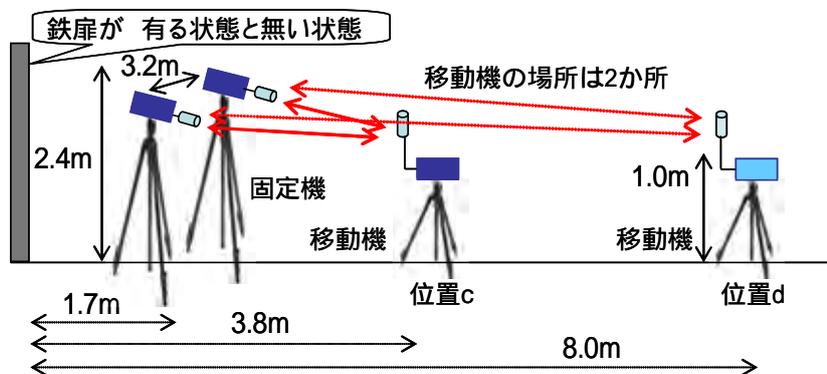


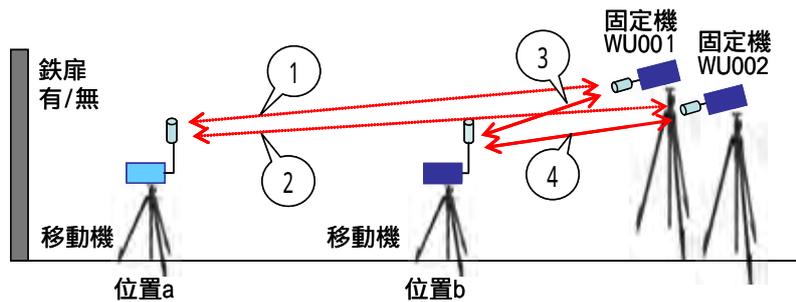
図 2.5.2 試験構成B (固定機が鉄扉付近にある場合)

2.5.3 試験結果

試験構成A、試験構成Bのそれぞれについて、鉄扉がある場合とない場合の測距値、及び測位値の変化を図 2.5.3、図 2.5.4に示す。

測距は、おのこの測定パターン(図の ~ について鉄扉が有る場合と無い場合の計 16 パタン)につき 5 回ずつ実施し、その 5 回の測定値の平均を示す。

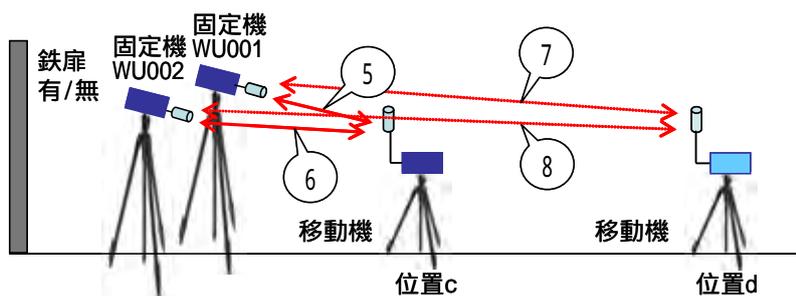
測位については上記で得た測距の平均値を用いて位置 a, b, c, d について、鉄扉が有る場合と無い場合の位置の差を結果として示す。



測距・測位区分	測距		測位	測距		測位
測定対象			位置 a			位置 b
鉄扉有り				270cm	267cm	
鉄扉無し	582cm	604cm		279cm	273cm	
差				- 9cm	- 6cm	13cm

: 2 台の固定機ともに測距値が得られず、その結果測位も算定していない。

図 2.5.3 試験構成 A における鉄扉がある場合とない場合の測距・測位結果の差



測距・測位区分	測距		測位	測距		測位
測定対象			位置 c			位置 d
鉄扉有り	314cm	304cm		685cm	694cm	
鉄扉無し	301cm	304cm		685cm	673cm	
差	+13cm	0cm	15cm	0cm	+21cm	48cm

図 2.5.4 試験構成 B における鉄扉がある場合とない場合の測距・測位結果の差

2.5.4 考察

試験構成Aで、移動機が鉄扉の近傍(位置 a)にある場合、両固定機とも移動機までの測距ができない状況が見られた。

位置 a にある移動機と固定機との間の電波伝搬路についてみると、図 2.5.5 に示すように、直接波の電波伝搬距離と、鉄扉により反射する電波伝搬距離の差が、移動機が位置 b の場合に比べ小さい。また、移動機はオムニアンテナを使用していることから、固定機方向のみならず、鉄扉方向に対しても固定機方向と同等の利得を有し、鉄扉からの反射波を受信する。

したがって、位置 a の移動機と固定機との間の伝搬は、他の位置にある移動機と固定機との間の伝搬に比べ、D/Uが低下しており、これが測定結果に現れた可能性がある。

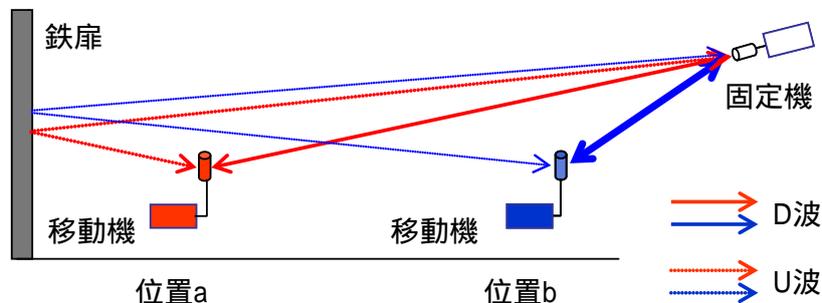


図 2.5.5 移動機の位置による D/U の差

こうした、鉄扉からの反射波の影響、すなわちマルチパスの影響により、測距パルスが続くデータ部分が読み取れなかったことが原因と考えられ、測距精度、測位精度の技術試験で生じた現象と同様のものと言える。

また、同じ試験構成 A で、鉄扉から約 5m 離れた位置 b に移動機があるケースでは、鉄扉の有無による測距の差は数 cm、測位の差は約 10cm となっているが、測距精度、測位精度の技術試験で明らかにした誤差のばらつき範囲内に十分収まっており、鉄扉の有無の影響は支配的でないと考えられる。

一方、固定機側が鉄扉に近い場所に設置された試験構成 B の場合については、固定機のヘリカルアンテナの指向方向からみて、固定機・移動機間の電波伝搬路に鉄扉の反射が影響する要素がない。これが測距・測位結果に現れており、測距値の差の最大約 20cm や測位値の差の最大約 50cm についても、試験構成 A と同様、誤差のばらつき範囲内に十分収まっており、鉄扉の有無の影響は支配的でないと考えられる。

2.6 まとめ

ハイバンドUWBを用いた場合の測距及び測位に係る技術試験により、その精度を明らかにした。併せて、電波伝搬環境の変化による影響の有無も調査した。

測距については、今回のUWB装置に適用したサンプリングレートによる誤差範囲 $\pm 45\text{cm}$ にほぼ収まる結果が得られた。

測位については、約15m先の位置では最大誤差が約2.3mとなる結果を得た。ただし、測定結果の平均値をとると、最大誤差は約1.3mに減少する。倉庫内での荷(パレット)の位置管理を想定すると、パレットの一般的な大きさは、 $116.5\text{cm} \times 116.5\text{cm}$ であることから、技術試験で実用化が期待できる結果が得られた。

技術試験を実施した倉庫を例に、使用されているラックや通路の幅を考慮し、物品(段ボール箱)の識別、人の動線等の管理を想定すると、精度50cm程度が必要と想定されるが、サンプリングレートの高速化や他の測位方式^[2]の適用等により、精度の高度化を実現できる可能性を有している。

また、ハイバンドUWBでは、15m程度までの測距・測位が可能であるとの結果が確認できた。UWBを倉庫で利用する場合、柱への固定設置が考えられるが、倉庫内の柱は約7m間隔であり、柱のスパン毎に固定機を設置することにより、見通しが確保された効率的な配置が可能と考えられる。

技術試験で測定できない(測定値が表示されない)状況があったが、電波の反射等によるマルチパスの影響で測距インパルスに続くデータ部分が読み取れなかったことが原因と考えられる。これに対しては、データの再送や誤り訂正等、通信制御方式の変更を施すことにより、改善が期待される。

ハイバンドUWB付近の鉄扉の有無で電波伝搬環境の変化を生じさせ、測距・測位への影響を調査したが、今回の測距・測位方法では、電波伝搬環境の変化が測距・測位結果に支配的な影響を与える状況は見られなかった。ただし、測距・測位精度を高めていくと、電波伝搬環境の変化が、測距・測位結果に対して影響を与えることも考えられる。

ハイバンドUWBによる測距・測位の実用化にあたっては、利用形態に応じた精度の選択、すなわちサンプリングレートや測距・測位方式の適切な選択が必要である。

^[2] 水垣健一 “UWB-IR 無線方式による屋内位置検知” 電子情報通信学会誌 Vol.92, No.4, 2009

第3章 ハイバンドUWBの周波数共用条件に係る技術試験

3.1 技術試験概要

ハイバンドUWBの周波数共用条件に係る技術試験は、以下の項目について実施した。

(1) 屋内(倉庫内)伝搬特性の測定

倉庫内環境における電波伝搬特性(距離と到達電力の関係)を測定し、その結果を分析した。比較として、ローバンドUWBについても実施した。

(2) 透過減衰量の測定

倉庫における屋内外の境界となる壁等に対するハイバンドUWBの透過減衰量を求め、屋外に対する電波の遮蔽、漏洩状況を定量的に明らかにし、周波数を共用する他のシステムとの共用条件検討に必要な基礎数値をそろえ、その結果を分析した。比較として、ローバンドUWBについても実施した。

(3) 開口部から屋外への電波伝搬特性測定

屋外への電波漏洩状態で条件の厳しい場所として、開口部(荷の搬出入口)を選択し、ここから、屋外にハイバンドUWBの電波が漏れる状況を定量的に明らかにし、周波数を共用する他のシステムとの共用条件検討に必要な基礎数値をそろえ、その結果を分析した。比較として、ローバンドUWBについても実施した。

3.2 ハイバンドUWB装置

3.2.1 ハイバンドUWB装置構成

周波数共用条件で用いたUWB装置は、測距及び測位に係る技術試験で用いた装置を使用した。

ただし、移動機は固定機からの測距パルスに対する応答で電波を送出し、移動機単独では電波を送信することができないため、移動機を用いた技術試験では、移動機の代わりに固定機を用い、空中線を通常移動機が使用するオムニアンテナに変更して使用した。

3.2.2 ハイバンドUWB信号出力

測距・測位の精度に係る技術試験で用いた約 0.018ms 長のインパルス群を用いたが、電力測定を可能にするため、これを 1ms おきに連続送出した状態で測定を実施した。ハイバンドUWBの信号出力を図 3.2.1 に示す。

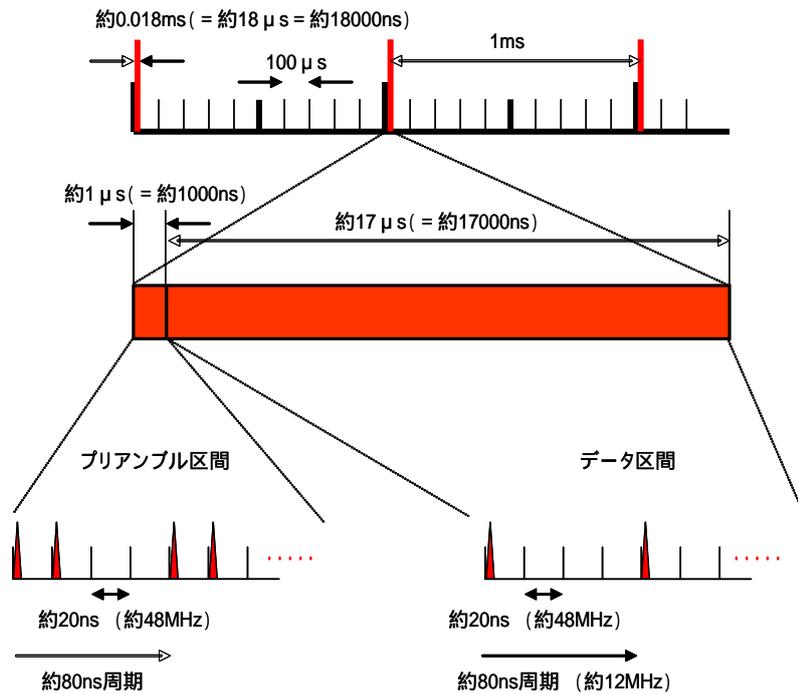


図 3.2.1 ハイバンドUWB信号出力

3.2.3 ハイバンドUWB信号スペクトラム

技術試験に用いたハイバンドUWBの信号スペクトラムは、測距および測位に係る技術試験で用いたものと同じである。

3.3 比較用としてのローバンドUWB装置

3.3.1 ローバンドUWB装置構成

ハイバンドUWBとの比較用としてのローバンドUWB装置は、日立製作所製の「日立 AirSense™ UWBエントリーモデル」を用いた。

ローバンドUWB装置の諸元を表 3.3.1に、外観を写真 3.1にそれぞれ示す。

表 3.3.1 ローバンドUWB装置諸元

項目	諸元
空中線電力	尖頭値電力 : - 23.0dBm/5MHz (= - 3.0dBm/50MHz)
空中線利得	- 0.2dBi (単一型)



写真 3.1 ローバンドUWB装置

3.3.2 ローバンドUWB信号出力

約2ns幅のインパルスを約31nsおきに連続送出した状態で測定を実施した。ローバンドUWBの信号出力を図 3.3.1に示す。

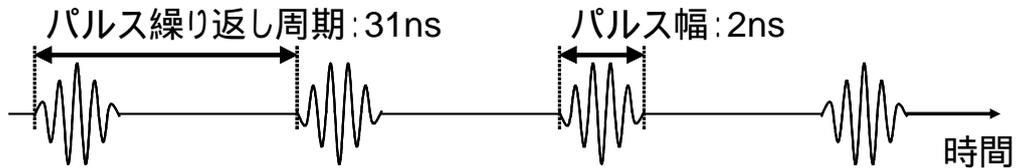


図 3.3.1 ローバンドUWB信号出力

3.3.3 ローバンドUWB信号スペクトラム

技術試験に用いたローバンドUWBのインパルス時間波形(時間 - 電圧)を図 3.3.2に、スペクトラム波形を図 3.3.3にそれぞれ示す。

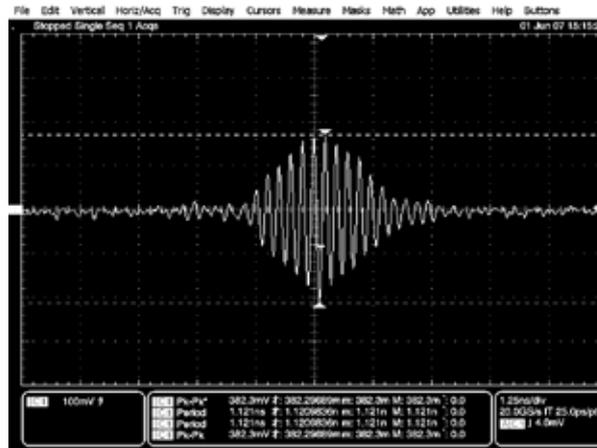


図 3.3.2 ローバンドUWBのインパルス時間波形 ($V_{op}=191mV$)

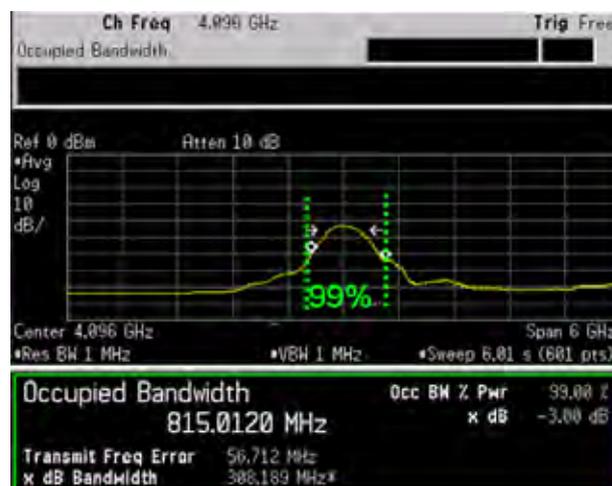


図 3.3.3 ローバンドUWBのスペクトラム波形

3.4 スペクトラムアナライザによる電力測定方法

3.4.1 測定系

3.4.1.1 ハイバンドUWBの測定系

(1) 送信側の構成

固定機として送信する場合は、ヘリカルアンテナを装着したハイバンドUWB装置を用い、受信側方向にアンテナを向けて測定した。また、移動機として送信する場合は、オムニアンテナを装着したハイバンドUWB装置を用いた。ただし、移動機は固定機からの測距パルスに対する応答で電波を送出し、移動機単独では電波を送信することができないため、移動機を用いた技術試験では、移動機の代わりに固定機を用い、空中線を通常移動機が使用するオムニアンテナに変更して使用した。

(2) 受信側の構成

受信系にはダブルリッジのホーンアンテナを用いた。測定電力が低レベルのため、スペクトラムアナライザ前段にプリアンプ(LNA)を用いた。構成と構成品の諸元を図 3.4.1に示す。

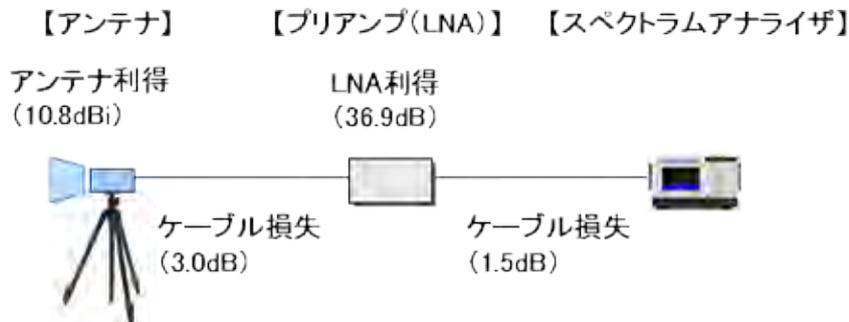


図 3.4.1 ハイバンドUWB受信側の構成と構成品の諸元

(3) 測定方法

UWBの送信電力は非常に微弱であるため、分解能帯域幅を狭め、できるだけノイズレベルを下げて測定することが望ましい。ただし、UWBのような広帯域を狭い分解能帯域幅で測定すると、測定時間が著しく増大する。

技術試験で用いたハイバンドUWB装置は、図 3.2.1のとおり $18\mu\text{s}$ の時間幅のインパルス群を 1ms おきに送信し、この $18\mu\text{s}$ の中で 20ns もしくは 80ns 間隔でインパルスが送出されている。このためスペクトラムアナライザがインパルス測定できるタイミングは非常に限られている。このように、UWB装置が送信する電力を広帯域にわたり測定するには時間を要することから、本技術試験では、効率よく確実にピークパワーを測定するために、1回の測定が約10分で完了することを目安に表 3.4.1に示すパラメータとした。

表 3.4.1 ハイバンドUWB測定におけるパラメータ

パラメータ	値	パラメータ値選定理由等
中心周波数	8.25GHz	スペクトラム波形からピーク電力が存在する周波数を採択した。
掃引周波数幅	200MHz	スペクトラム波形から、中心周波数付近に存在するピーク値部分を十分包含する範囲とし $\pm 100\text{MHz}$ とした。
分解能帯域幅	5MHz	測距・測位が可能な距離内で、UWBの送出電波がノイズに埋もれずにピーク電力が検出できる値を設定した。
ビデオ帯域幅	3MHz	分解能帯域幅の設定により自動的に設定された値。

中心周波数と掃引周波数幅のパラメータ値の選定理由とした技術試験場所における測定波形を図 3.4.2 に示す。(波形図左方向の尖頭波形は、他の無線システムによるもの)

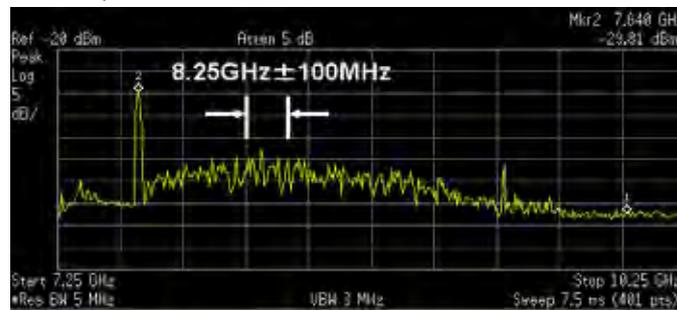


図 3.4.2 ハイバンドUWB全体のスペクトラム波形と測定部分

ピークホールドを行い測定すると、測定できた帯域から徐々に波形が表示され、約 10 分後には、測定帯域幅内の波形全体を表示し尽くした状態となり、その時点でピーク値を最大から5つ記録した。

UWB以外の電波をUWB装置からの電波と誤読しないよう、UWB装置の電源を切った状態で測定を行い、予めノイズレベルやUWB装置以外の無線システムからの電波を確認しておき、UWB測定結果の記録時にはこれを除外した。

この状態での測定値約 -54.6 (dBm/5MHz) (分解能帯域幅 5MHz 時のピーク値)をノイズレベルと確認し、UWB測定時に、本値を超える値が取得できない場合には、UWB装置からの電波レベルがノイズレベル以下であるとした。

ノイズレベルの決定理由とした波形を図 3.4.3 に示す。

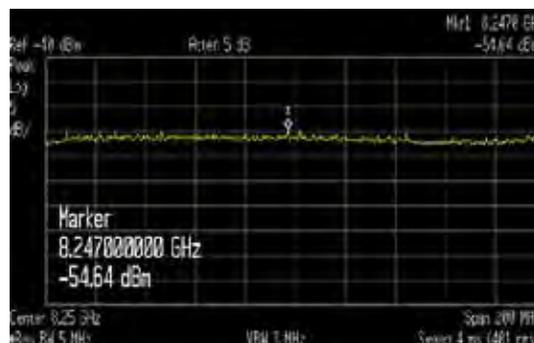


図 3.4.3 ノイズレベルの判定

3.4.1.2 ローバンドUWBの測定系

(1) 送信側の構成

固定機と移動機に共用可能で、アンテナを内蔵して一の筐体となった製品のローバンドUWB装置を用いた。

(2) 受信側の構成

受信側の構成は、ハイバンドUWBにおける受信側構成と同一の構成をとった。構成と各構成品の諸元を図 3.4.4に示す。

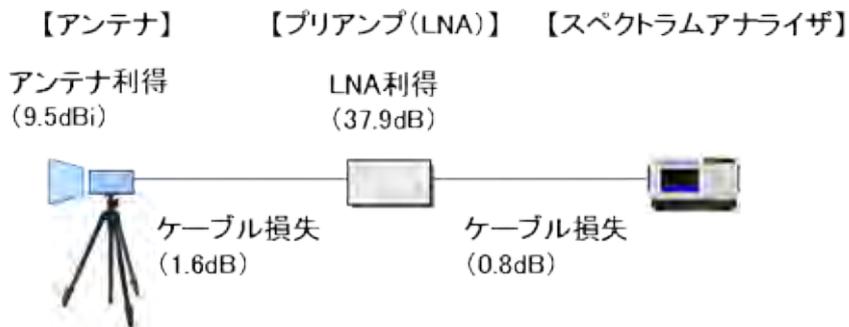


図 3.4.4 ローバンドUWB受信側の構成と構成品の諸元

(3) 測定方法

ローバンドUWBもハイバンドUWBと同様、送信電力が微弱であり、かつ、スペクトラムアナライザがインパルスを測定できるタイミングは非常に限られ、UWB装置が送信する電力を広帯域にわたり測定には時間を要することから、効率よく確実にピークパワーを測定するため、1回の測定が約10分で完了することを目安に表 3.4.2に示すパラメータとした。

表 3.4.2 ローバンドUWB測定におけるパラメータ

パラメータ	パラメータ値	パラメータ値選定理由等
中心周波数	4.096GHz	実験試験局免許申請上の中心周波数とした。
掃引周波数幅	800MHz	1回の測定時間は10分を目安に、±400MHzとした。
分解能帯域幅	5MHz	ハイバンドUWBと同等の5MHzとした。
ビデオ帯域幅	3MHz	分解能帯域幅の設定により自動的に設定された値。

技術試験場所における測定波形を図 3.4.5に示す。

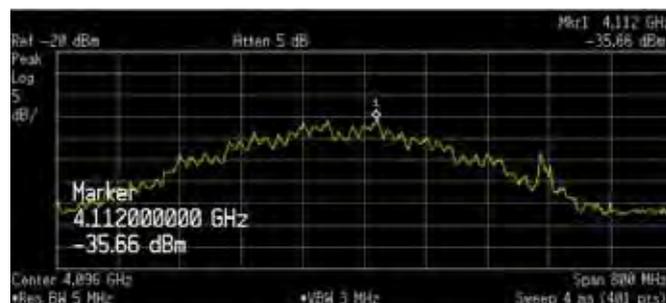


図 3.4.5 ローバンドUWB全体のスペクトラム波形

ハイバンドUWBの測定と同様、ピークホールドを行い測定し、測定帯域幅内の波形全体を表示し尽くした状態となった時点でピーク値を最大から5つ記録した。

ノイズレベルも分解能帯域幅 5MHz 時のピーク値について、ハイバンドUWB測定時と同等の値約-55(dBm/5MHz)を確認し、UWB測定時に、本値を超える値が取得できない場合は、UWB装置からの電波レベルがノイズレベル以下であるとした。

ノイズレベルの決定理由とした波形を図 3.4.6 に示す。(波形の中の尖頭波形は、他の無線システムによるもの)

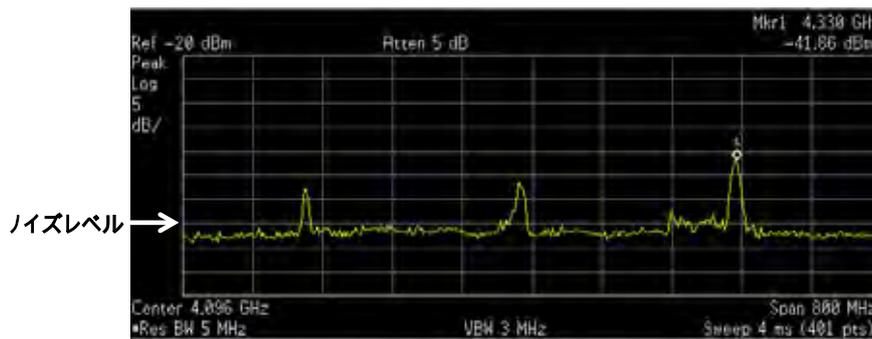


図 3.4.6 ノイズレベルの判定

3.4.2 測定パラメータ値の比較

参考として、「特定無線設備の技術基準適合証明等に関する規則第2条第1項第47号に掲げる無線設備の試験方法」^[3]と、今回の技術試験で用いたパラメータの比較を表 3.4.3 に示す。

表 3.4.3 測定パラメータ値の比較

パラメータ項目	特定無線設備の技術基準適合証明等に関する規則第2条第1項第47号に掲げる無線設備の試験方法 ^[3]	本技術試験	
		ハイバンド	ローバンド
中心周波数	探索された周波数	8.25 GHz	4.096 GHz
掃引周波数幅	100MHz 程度	200MHz	800MHz
分解能帯域幅	3MHz	5MHz	5MHz
ビデオ帯域幅	分解能帯域幅の3倍程度	3MHz	3MHz
Y軸スケール	10dB / Div	5dB / Div	5dB / Div
掃引時間	測定精度が保証される最小時間	4ms	4ms
データ点数	400 点以上(例 1001 点)	401	401
掃引モード	連続(波形の変動がなくなるまで(例:20 回程度))	連続	連続
検波モード	ポジティブピーク	ポジティブピーク	ポジティブピーク
表示モード	マックスホールド	マックスホールド	マックスホールド

^[3] <http://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/equ/tech/betu/70.pdf>

3.5 屋内(倉庫内)伝搬特性の測定

3.5.1 目的

倉庫内環境においてUWBセンサーネットワークを利用するにあたり、今後必要となる電波伝搬特性を明らかにする。

3.5.2 試験構成及び試験方法

UWB装置から送出される電波が倉庫の通路上の各場所に到達するレベルを測定した。送信側のUWB装置を荷に装着された移動機とみなし、受信系を移動させ、倉庫内の複数の場所に到達する電力を測定した。

測定系の受信空中線高は、倉庫内通路および棚の横に置かれた荷を想定し、1mとし、ハイバンドUWBの空中線は移動機で用いられるオムニアンテナとした。

測定系を図 3.5.1に、測定場所を図 3.5.2にそれぞれ示す。

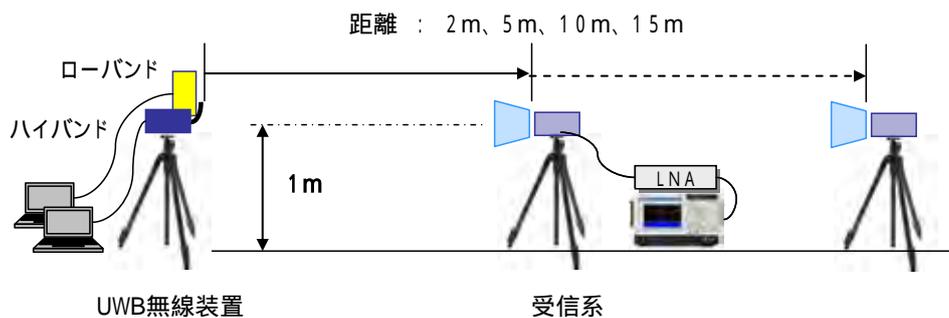


図 3.5.1 屋内伝搬特性試験方法

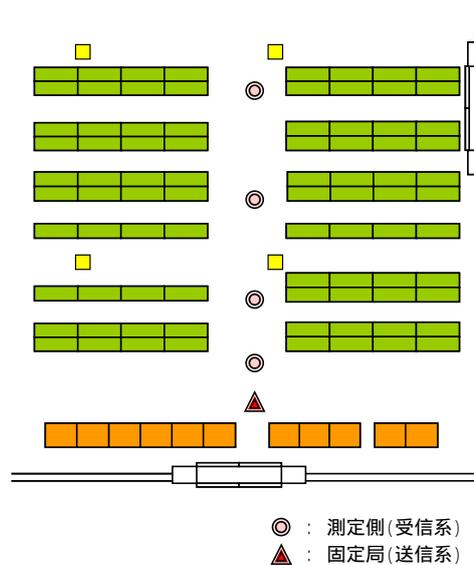


図 3.5.2 屋内伝搬特性試験場所

3.5.3 試験結果

屋内伝搬距離特性の試験結果については、ハイバンドUWBを図 3.5.3 3.5.3に、ローバンドUWBを図 3.5.4 3.5.4にそれぞれ示す。

図中の直線は、ハイバンドUWBについては表 2.2.1、図 3.4.1に示す諸元を、ローバンドUWBについては表 3.3.1、図 3.4.4に示す諸元を用い、それぞれの周波数帯における自由空間伝搬損失を適用した計算値である。

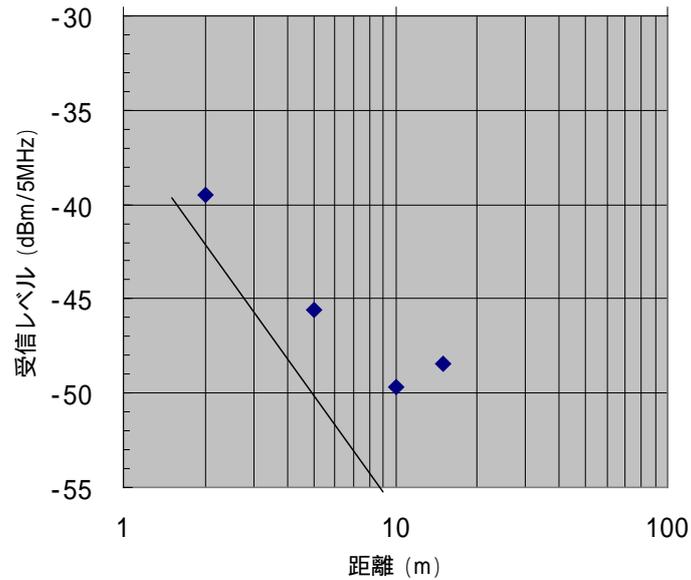


図 3.5.3 屋内伝搬距離特性(ハイバンド)

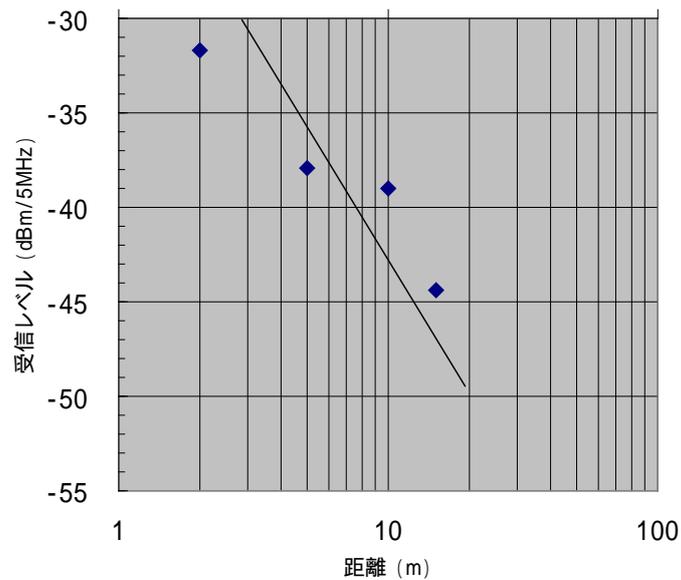


図 3.5.4 屋内伝搬距離特性(ローバンド)

3.5.4 考察

ハイバンド、ローバンド共に、距離 10mを超えると、計算値に比べ受信レベルが上昇し、ハイバンドにおいては、距離 15m では距離 10mにおける受信レベルより上昇する結果となった。

ハイバンドについては、全体的に計算値よりも測定における受信電力が大きくなる結果が得られた。

技術試験を実施した空間は、特に側面を金属(鉄製)のラックで囲まれた状態となっており、マルチパス伝搬環境が構成され、本来、周囲に散っていく電波が床面やラックに反射し、受信系に到達したことが考えられる。測定系の受信空中線にホーンアンテナを使用したため、距離が近いと、周囲から到来する反射波は受信側空中線の指向方向から外れ、受信側は拾いにくい状況であるが、遠方では反射波の到来方向が直接波の到来方向に近づき、直接波等と合成された状況が想定できる。特にハイバンドUWBについてはオムニアンテナを使用しており、水平方向に指向性を持つローバンドUWB(参考資料参照)よりも周囲に反射する電波を作り易く、それらが反射を経て受信部に到達し、測定における受信電力が計算値よりも大きくなる傾向が強くなったと考えられる。

3.6 透過減衰量の測定

倉庫の屋内外の境界となる壁などに対するUWBの透過減衰量を求めた。

3.6.1 目的

ハイバンドおよびローバンドUWBの送信電波に対する倉庫の屋内と屋外の境界物(壁、扉等)の透過減衰量を明らかにし、UWBの屋外への電波漏洩状況を把握する。

3.6.2 透過物概要

倉庫が屋内外の境界としている通気窓、ブロック壁、金網扉、鉄扉の4種類を対象に透過減衰量を測定した。

各透過物の位置と写真を図 3.6.1に示す。

また、各透過物個々の詳細について以降に述べる。

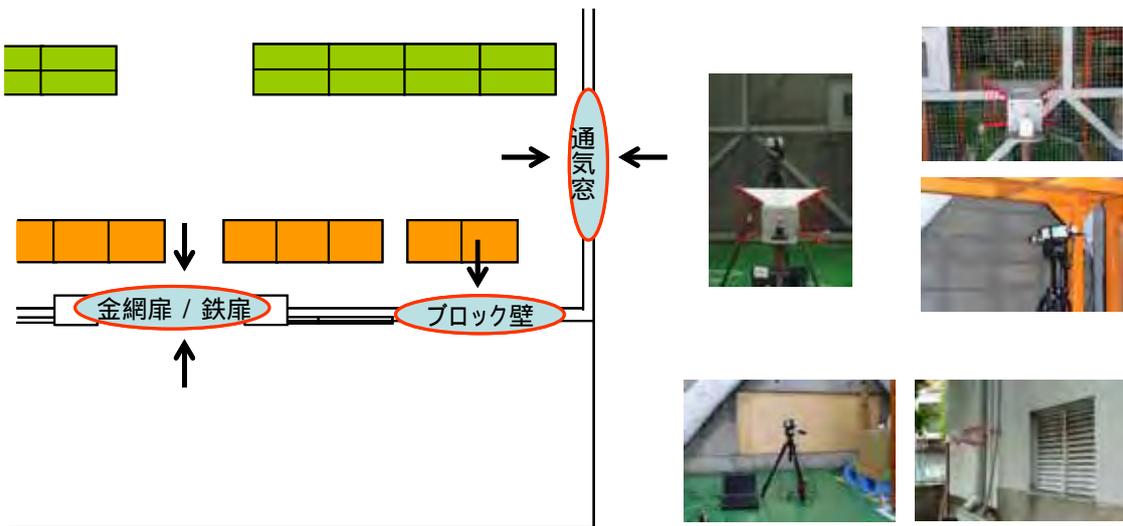


図 3.6.1 試験対象とした透過物の位置

(1) 通気窓

倉庫における窓に相当する境界である。

屋外側は鉄製の羽根でブラインド状になっており、屋内側は約1cmのベニア板で構成されている。

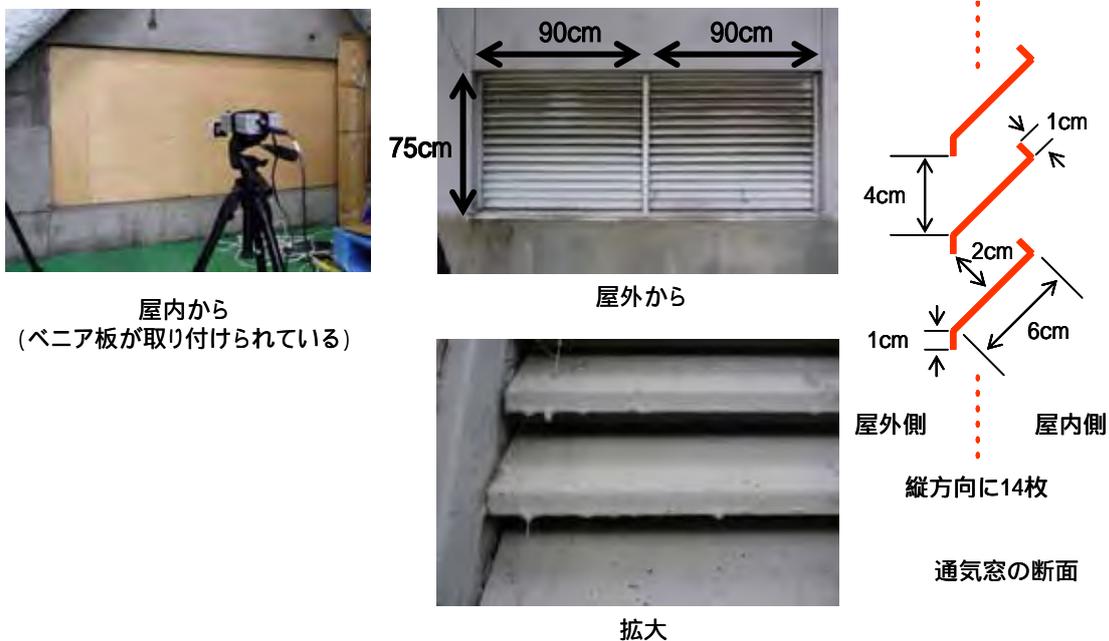


図 3.6.2 通気窓の状態

(2) ブロック壁

いわゆる倉庫の壁に相当する境界であり、1個あたり縦 20cm、横 40cm のブロックから構成されている。壁の厚さは 20cm。



図 3.6.3 ブロック壁の状態

(3) 鉄扉

幅 3.5m、高さ 3.5m の鉄板からなる開き扉となっている。



屋外から見た鉄扉

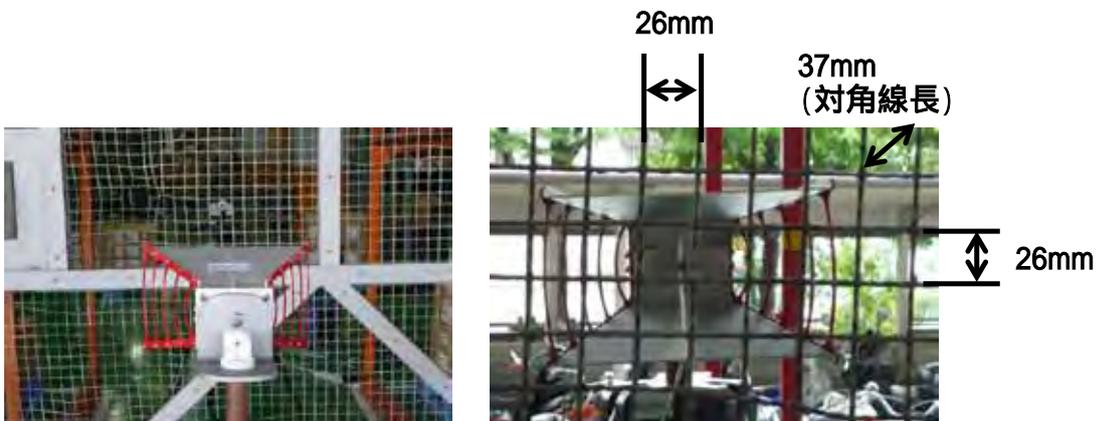


屋内から見た鉄扉

図 3.6.4 鉄扉の状態

(4) 金網扉

鉄扉と同じ開口部に対する扉で、幅 3.5m、高さ 3.5m、の1枚戸となっている。格子間隔は、26mm である。



屋外から見た金網扉

屋内から見た金網扉

図 3.6.5 金網扉の状態

3.6.3 試験構成及び試験方法

図 3.6.6 に示すように、倉庫内に設置した送信系と屋外に設置した測定系が測定対象物をはさむように対向させて測定した。

送信系は倉庫内の荷が実際に存在しうる場所(ラック近辺の高さ1mの位置)で測定系との間には境界部以外の障害物がない場所に設置した。

倉庫外の測定系は高さ1mとし、送信系、受信系間の距離を2mとした。

入射角度が大きくなると透過減衰量が大きくなる傾向がある^[4]ため、最小となる透過減衰量を取得するために入射角0°で測定した。このように、送信系と受信系を対向させて設置することにより、送信系(UWB固定機)方向以外から到来する他の電波の影響を極力無視できる構成とした。

測定系の構成およびスペクトラムアナライザの設定パラメータ値等は、屋内伝搬特性の測定の場合に等しくした。

送信系UWB装置については、ハイバンドUWBは指向性のあるヘリカルアンテナを装着した固定機を使用し、ローバンドUWBは一の筐体となった装置(アンテナ内蔵で、固定機、移動機兼用)を使用した。

測定対象物がある場合とない場合の測定系が受信したレベルの差から、透過減衰量を算定した。

測定対象物がない場合の測定については、鉄扉、金網扉では、送信系、測定系を動かさず、測定対象物を動かして(扉を開閉して)測定した。その他の測定対象物の場合は、送信系、測定系の位置関係を保ち相互が見通せる場所で測定した。

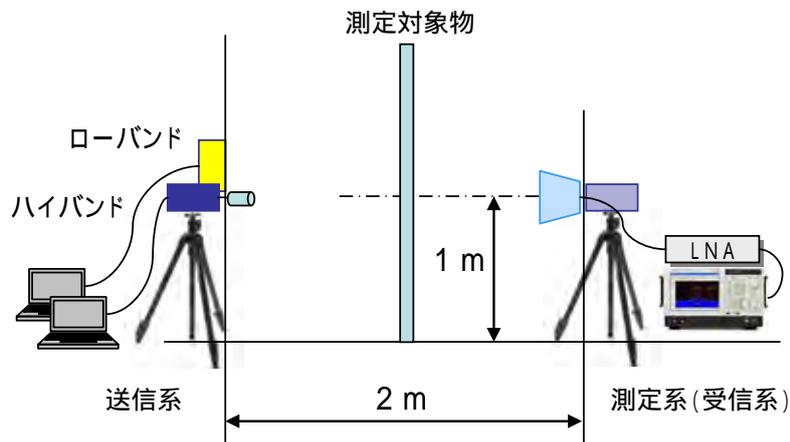


図 3.6.6 透過減衰量測定系の構成

^[4] 電波伝搬ハンドブック REALIZE INC.

3.6.4 試験結果

透過減衰量の測定結果を表 3.6.1 に示す。

表 3.6.1 透過減衰量の技術試験結果

	通気窓	ブロック壁	鉄扉	金網扉
ハイバンド	11.2dB	8.4dB		2.2dB
ローバンド	5.4dB	9.4dB		4.2dB

： 透過減衰量が大きく電波の透過が確認できなかった

3.6.5 考察

UWB の干渉モデルで使用されている壁の減衰量は、1つの建物の室内からの平均建物遮蔽損失と同等の値として 12dBとされており^[5]、金網扉の結果の 2.2dBを除けば、ブロック壁 8.4dB、通気窓 11.2dBは、平均値としている 12dBの想定範囲内である。

コンクリートの透過減衰量として、10GHzで 9.0dB、6GHzで 8.0dBとの報告^[6]があり、本技術試験で得られたブロック壁の結果は、ほぼこれに一致している。

金網扉は鉄扉と同様、開口部の扉として利用されていることから、開口部から屋外に漏洩する電波の検討の際に付加する損失分として扱える。例えば、開口部の透過損失は 0dBであるが、金網扉で閉められている場合には損失が 2.2dB、そして鉄扉で閉められている場合には無限大(透過せず、完全に遮蔽される)の損失が付加できる。

一般に、周波数が高くなるほど、物体に対する透過減衰量は大きくなる傾向があり、通気窓についてはその傾向が見られたが、ブロック壁と金網扉については、ローバンドの方が透過減衰量が大きくなる結果が得られた。これは、ブロック壁や金網扉が電波にとって十分な遮蔽物として働かないことが原因と考えられる。

ローバンドの方がハイバンドよりも明らかに透過損が大きい結果が得られた金網扉について、波長と金網扉の格子の大きさ(金網扉を構成する金属部分の最大間隔)の関係を表に示す。

表 3.5.2 波長と金網扉の窓の大きさの関係

	波長		金属の最大間隔	測定周波数
ハイバンド	36mm	<	37mm	8.25GHz
ローバンド	73mm	>		4.096GHz

金網扉を構成する金属部分の最大間隔は 37mm であり、波長がこれよりも小さいハイバンドにとっては、金網が電波の障害物として十分に認識されない。一方、ローバンドにとっては、金属部分の最大間隔が波長よりも小さく、障害物として認識される形となる。こうしたことから、金網扉に対する透過減衰量は、ローバンドの方が大きくなる結果となったことが考えら

^[5] 電気通信技術審議会答申(諮問第 99 号「5GHz 帯の周波数を利用する広帯域移動アクセスシステムの技術的条件(H11.9.27))

^[6] 信学技報 EMCJ78-38(1978-11)

れる。

ブロック壁など、内部に使用されている鉄筋等の構造により、若干ではあるが、金網扉と同様な理由により、透過減衰量がローバンドの方がハイバンドよりも大きくなる結果が得られたと考えられる。

本技術試験結果は、境界面に対して垂直な角度の電波伝搬(入射角 0°)の場合であり、実際の利用形態では、UWB から被干渉システムへ向かう電波伝搬路と壁等が垂直になる場合は確率的に非常に低い。また、斜めに入射する場合、ブロック壁ではブロック内部を通過する区間の増加や、倉庫内の棚による遮蔽が影響し、実効上の透過減衰量はより大きくなると考えられる。

従って、本技術試験で得られた結果は、考慮しうる最小の減衰量、すなわち、UWB が他システムに最大の干渉を与える状態を示すものと言える。

3.7 開口部から屋外への電波伝搬特性測定

3.7.1 目的

UWBと屋外にある他システムとの周波数共用条件を検討するにあたり、倉庫内で運用されるUWBの電波が屋外に最も強く漏洩する場所である倉庫の開口部(荷の搬出入口)に着目し、屋外への電波伝搬特性を明らかにする。

3.7.2 試験構成および試験方法

倉庫内の荷を測位、センシングするために設置された固定機から送出される電波の伝搬特性と、荷に装着された移動機から送出される電波の伝搬特性について試験を実施した。ハイバンドUWBの試験に並行し、比較のため、ローバンドUWBについても試験した。

3.7.2.1 固定機からの電波伝搬

図 3.7.1に示すように、倉庫内部の荷を測位することを想定した位置にハイバンドUWBの固定機を設置して測定した。比較のため、ローバンドについても、ハイバンドと同じ位置に固定機を設置し、同様の測定を行った。設置場所は以下の条件を満たす場所とした。

(1) 屋外に最も強く電波が伝搬していく場所

開口部付近が測位対象エリアとなるような位置で、電波の送出方向が屋外方向となる位置に固定機を設置した。ヘリカルアンテナが装着されたハイバンドUWB無線装置については、その指向性を開口部付近へ向け、ローバンドUWBについても測位エリアが開口部付近になる向きに設置した。

(2) 固定機の設置が現実的な場所

固定機の設置に適する場所は、ラックの上、天井付近の梁、もしくは柱の部分である。本技術試験では、上記条件(1)を踏まえたラックの上(高さ2.4m)とした。

受信電力測定場所は、開口部付近のトラックによる荷の搬出入が行われる場所とし、当該場所で1m間隔の格子を設定し、格子点の中からいくつかポイントを選択して測定した。

測定器側の構成は、屋内伝搬特性、透過減衰量の構成に等しくし、床から高さ1mの位置で測定した。測定器側の空中線は、固定機が見通せる場合は固定機方向へ、見通し外の場合は、反射波等の存在も考慮し、電波が最も強く到来する方向へ向けて測定した。

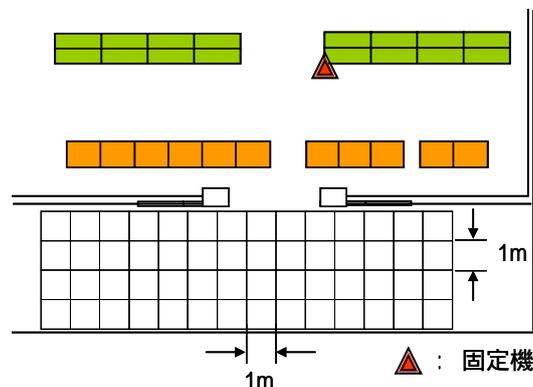


図 3.7.1 固定機の設置位置と測定エリア

3.7.2.2 移動機からの電波伝搬

図 3.7.2に示すように、倉庫内部の荷が扱われる位置にUWBを設置した。

ただし、ハイバンドUWB装置は連続送信可能な固定機で代用し、ヘリカルアンテナをオムニアンテナに変更して測定した。オムニアンテナを使用するハイバンドUWBの移動機は、ヘリカルアンテナを使用する固定機に比べ、空中線利得の差分(5dB)だけ送信出力が大きくなることから、これを考慮し、スペクトラムアナライザの読み値に 5dB を加えたものを測定値とした。

比較のため、同じ場所にローバンドUWBの移動機を設置し、ハイバンドと同様の測定を行った。

具体的な設置場所は以下の条件を満たす場所とした。

(1) 屋外に最も強く電波が伝搬していく場所

屋内(倉庫内)のうち、最も屋外に近い開口部付近とした。

屋外では移動機は固定機からの応答ができないため、図に示す位置を移動機が電波を送出しうる最も屋外に近い位置とみなした。

(2) 移動機の位置が現実的な場所

荷が存在する場所は、倉庫の棚か通路であるが、本技術試験では、上記の条件(1)を考慮し、通路に設置し、高さは荷が平均的に存在しうる1mとした。

ハイバンドUWBのオムニアンテナは立てて設置し、ローバンドUWBについては、一の筐体の装置を用い、屋外方向に電波が強く放射する向きに設置した。

到達電力を測定するエリアの選択方法は、固定機の場合と同様とし、測定機側の構成は、屋内伝搬特性、透過減衰量の構成に等しくした。

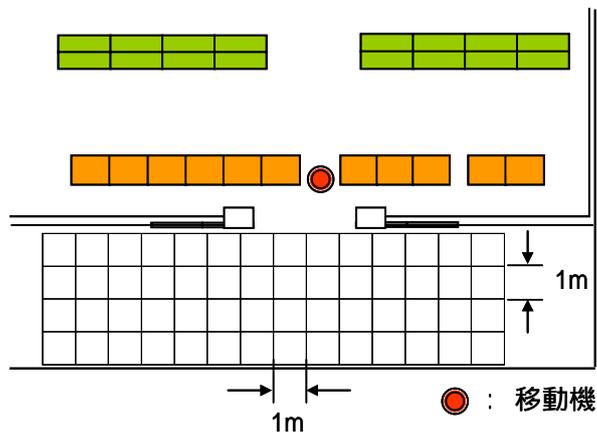


図 3.7.2 移動機の設置位置と測定エリア

3.7.3 試験結果

3.7.3.1 固定機からの電波伝搬の試験結果

ハイバンドUWB及びローバンドUWBの固定機の測定結果を図 3.7.3、図 3.7.4にそれぞれ示す。

表示電力値は、プリアンプ利得やアンテナ利得等を含むスペクトラムアナライザに示された5MHz帯域幅のピーク値である。

図中の直線は、見通し内伝搬エリアと、荷などによる見通し外伝搬エリアの境界線を示す。矢印はラック及び荷により想定される反射波の経路を示す。

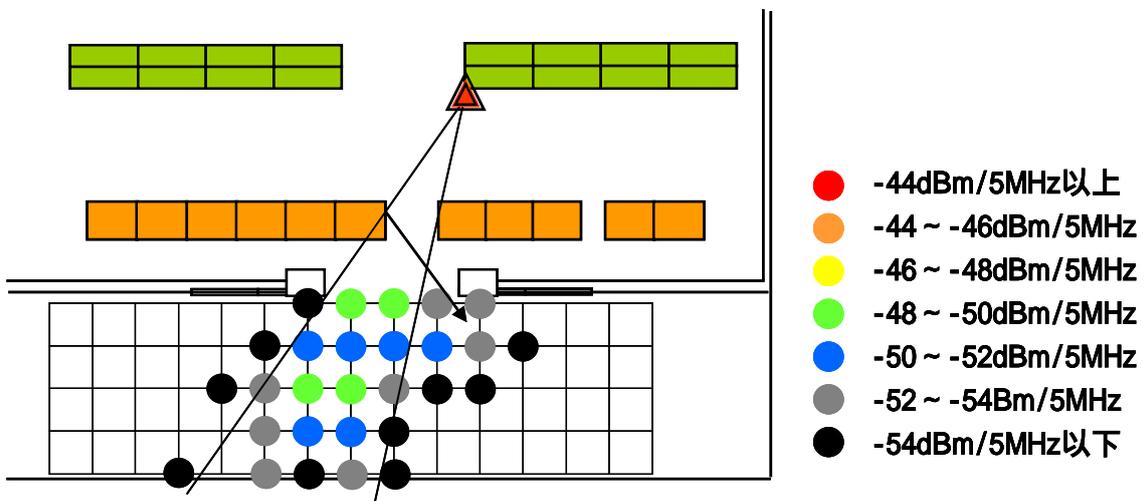


図 3.7.3 ハイバンド固定機の試験結果

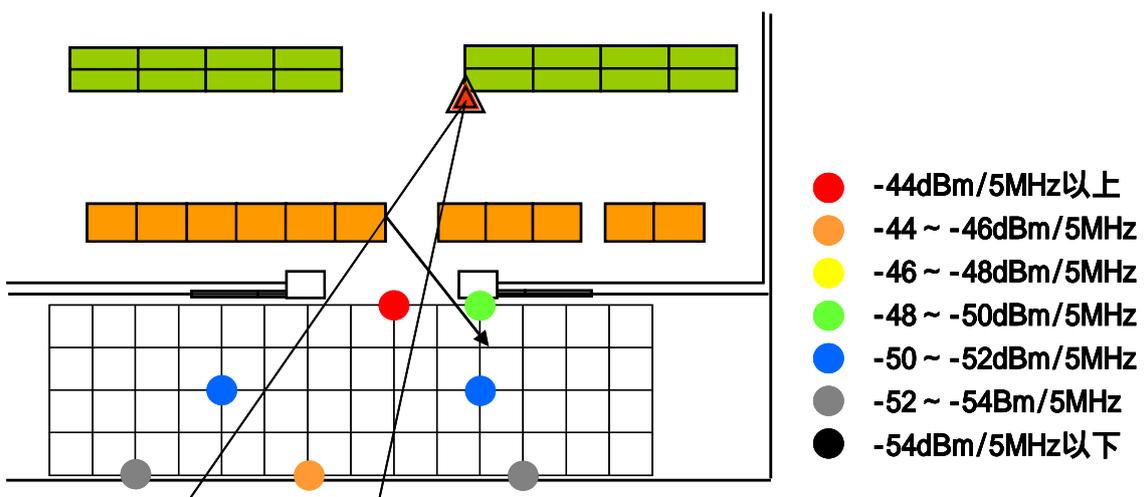


図 3.7.4 ローバンド固定機の試験結果

3.7.3.2 移動機からの電波伝搬の試験結果

ハイバンドUWB及びローバンドUWBの移動機の測定結果を図 3.7.5、図 3.7.6にそれぞれ示す。

表示電力値は、プリアンプ利得やアンテナ利得等を含むスペクトラムアナライザに示された5MHz帯域幅のピーク値である。

図中の直線は、見通し内伝搬エリアと、荷などによる見通し外伝搬エリアの境界線を示す。

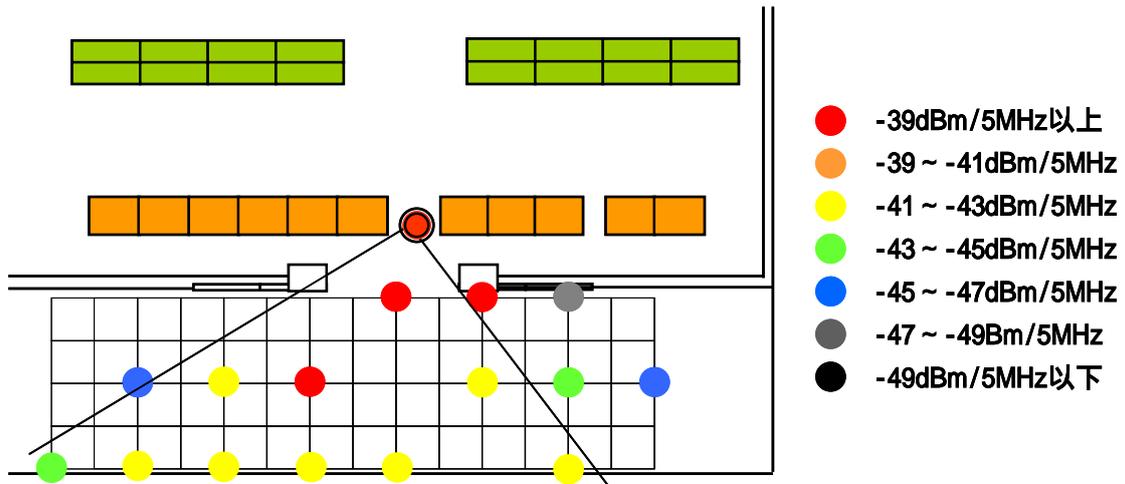


図 3.7.5 ハイバンド移動機の試験結果

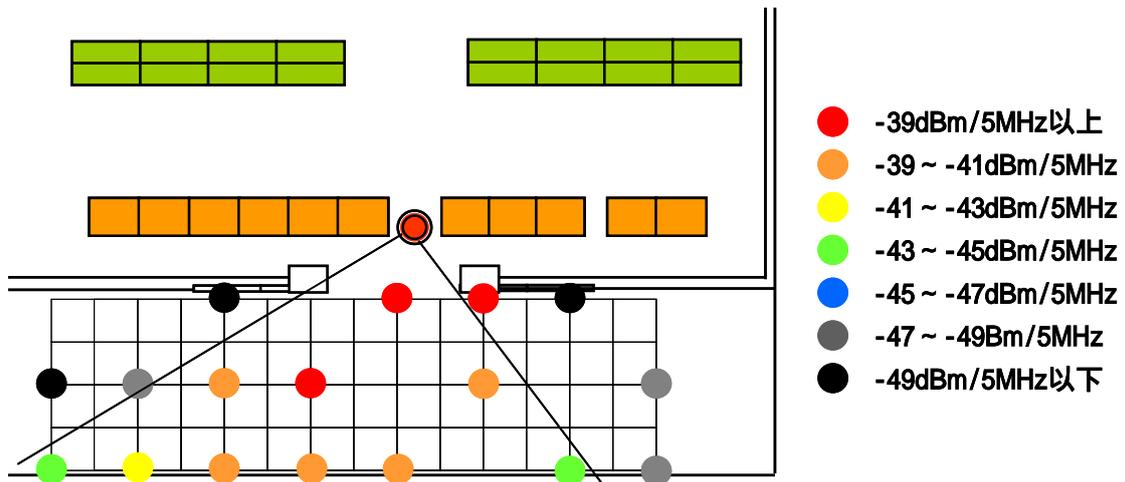


図 3.7.6 ローバンド移動機の試験結果

3.7.4 考察

3.7.4.1 固定機からの電波伝搬

倉庫外(荷物の積み下ろし場)の見通し内環境では、距離に依存した減衰傾向が見られた。

見通し外伝搬になると急激に減衰し、ハイバンドでは、電波の回折による伝搬はほとんど見られなかった。ローバンドでは回折の様な見通し外伝搬が見られた。

ハイバンド、ローバンド共に、荷(内部は電子機器)による反射と思われる波も確認し、このポイントでは、見通し外伝搬が確認された。(開口面付近の右方向部分)

本技術試験を実施した倉庫では、固定機の位置と開口部の位置の関係から、見通し内伝搬が可能な範囲は、固定機から屋外方向を見て角度約 30° の範囲であった。

3.7.4.2 移動機からの電波伝搬

電波伝搬の傾向は、固定機の場合と同様、距離に依存した減衰傾向が見られた。ただし、移動機の位置は固定機に比べ、屋外に近い位置(屋内・屋外の境界部)にあるため、同じ測定場所であっても、移動機からの電波は強い傾向であることが確認できた。

本技術試験を実施した倉庫では、移動機の位置と開口部の位置の関係から、見通し内伝搬が可能な範囲は、移動機から屋外方向を見て角度約 90° の範囲であった。

3.8 まとめ

倉庫内で使用されるハイバンドUWB装置から送出される電波の屋内伝搬特性、屋外への漏洩伝搬特性について、ローバンドUWB装置と比較をしつつ、定量的に把握し、屋外の他の無線システムとの周波数共用検討のための基礎データを得た。

倉庫にある屋内と屋外の境界部(壁等)のUWB無線の透過伝搬損も明らかにし、平均12dBと報告されている値に対して、想定範囲内の結果を得た。

第4章 UWB無線センサーネットワークに係る技術試験

4.1 目的

ハイバンドUWBの技術試験を実施した倉庫にUWB無線センサーネットワークシステムを構築し、倉庫における物品管理の実用性を確認する。

4.2 試験構成及び試験方法

倉庫にある荷の位置、センサーデータ(温度および振動の有無)の取得、及び荷の映像を取得するためのシステムを構築した。

UWB無線センサーネットワークの技術試験系を図 4.2.1に示す。

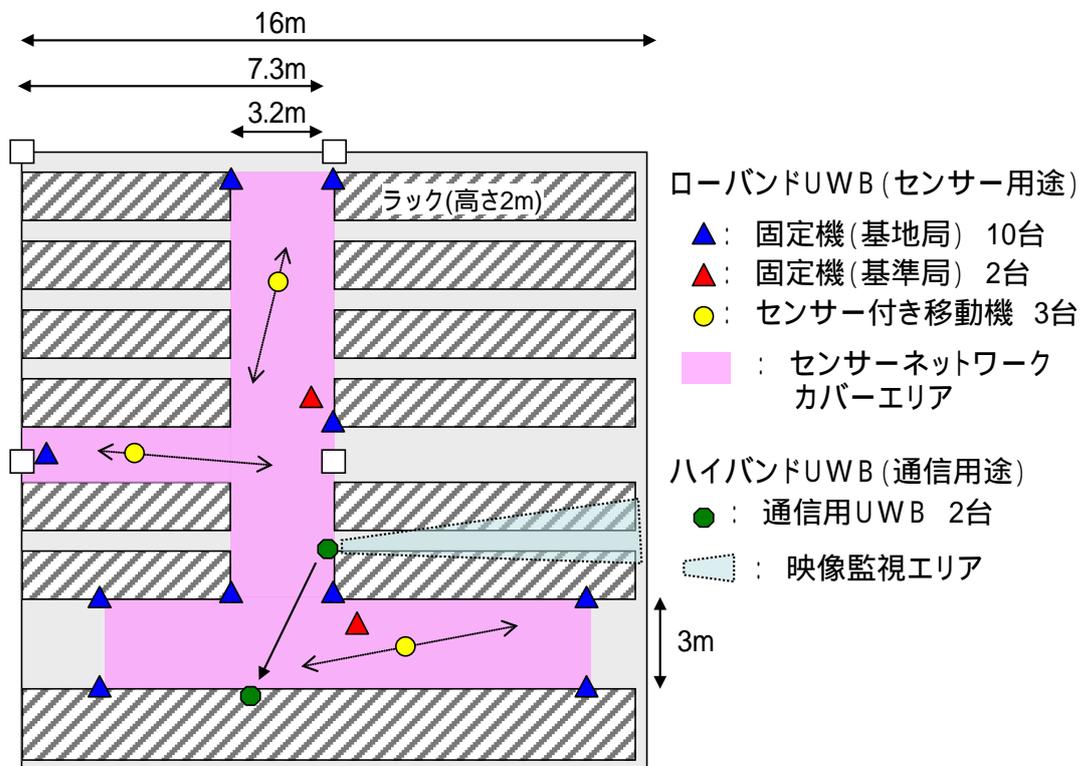


図 4.2.1 UWB無線センサーネットワークの技術試験系

測位とセンサー機能については、以下の条件を満たすUWB装置が必要であるため、既に製品化されているローバンドUWB装置で実施した。

- ・センサーとUWB無線部が結合された端末であること
- ・実際の使用状況を踏まえ、複数の荷、すなわち複数の端末を同時に管理する状況が設定できること
- ・カバーエリアを見通せる複数か所に固定機を設置する必要があること

ハイバンドUWBの測距・測位に係る技術試験においては、測位方式として、複数の固定機と移動機との間のインパルスの往復時間から位置を推定する TOA (Time of Arrival) 方式を用いたが、ローバンドUWBを使用するUWB無線センサーネットワークに係る技術試

験においては、移動機が送信したインパルスを複数の固定機(基地局)で受信し、それぞれの固定機(基地局)間での信号の受信時刻の差を測定することで位置を推定する TDOA (Time Difference of Arrival)方式を用いた。TDOA 方式では、固定機(基地局)間の受信時刻差を検出するため、固定機(基地局)同士を時間同期させる必要があり、そのための固定機(基準局)も準備した。

本技術試験では、固定機(基地局)10 台、固定機(基準局)2 台、そして、センサー付きの移動機 3 台のローバンドUWB無線装置で構成した。

また、測位エリア外となっている通路の映像監視については、ブロードバンドデータ通信用途(映像伝送用)のハイバンドUWB無線装置 2 台(送信、受信)で構成した。

システムでは以下のサービス機能を構築した。

(1) ローバンドUWB装置で構成

- ・物品の位置の把握(測位)
 - 倉庫図面(制御・閲覧端末)上に、物品(移動機)の場所を表示。
- ・物品の状態の把握(温度、振動の有無)
 - 温度の色による識別表示、および振動のピクトグラムによる識別表示。
- ・物品への制御(LED表示、ブザー鳴動)
 - 制御端末から物品(移動機)に取り付けられたLEDの点灯、ブザー鳴動のオン・オフを制御。

(2) ハイバンドUWB装置で構成

- ・映像による物品、通路の状況把握
 - カメラで取得したVGAの画像をJPEG2000で圧縮。UWBの伝送レート128Mbpsの一部を使用して伝送。

センサーを装着したローバンドUWB端末を写真 4.1に、技術試験におけるサービス機能のイメージを

図 4.2.2にそれぞれ示す。



写真 4.1 センサー(写真上部)を装着したUWB端末

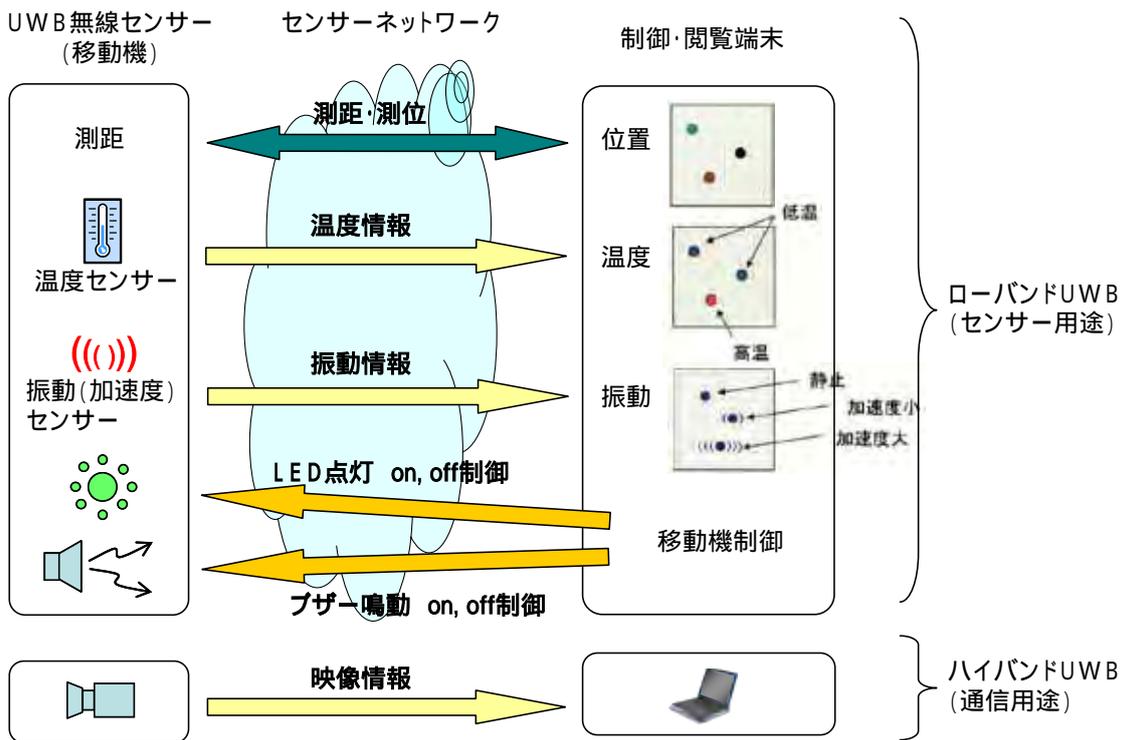


図 4.2.2 技術試験におけるサービス機能

制御・閲覧は倉庫内に設置したネットワークを介してPCにより行った。

搬送される荷に相当するものとして、センサー付きUWB移動機を人が携行し、カバーエリア内を歩行速度で移動したり、静止したりし、実際の状態と、システムが表示する状態との比較や、移動機へのLED点灯、ブザー鳴動制御の可否を確認した。

なお、センサーデータ取得周期は1秒に設定した。

4.3 試験結果

移動機の位置表示、移動機に対する制御は、設定した全エリア内で可能であることを確認した。幅約3m、距離約15mの荷や人の動線の管理が可能であった。

歩行移動時における表示レスポンスは、約10秒であった。レスポンスの時間については、センサーデータ取得のためのポーリング周期を用途に応じた適切な値に設定することが必要である。

同時に運用した通信用途のUWBによる通路内の映像取得も、人の動きに十分追従して確認することができた。

技術試験実施時に表示させた画面の例を図4.3.1に示す。

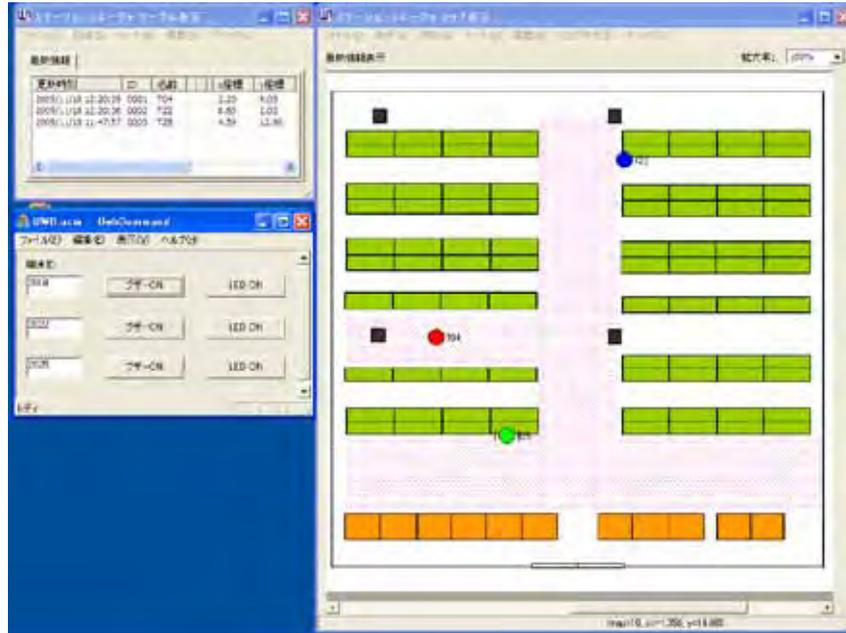


図 4.3.1 技術試験実施時の表示

4.4 まとめ

実際の倉庫の約 16m 四方を対象エリアとして、UWB無線センサーネットワークを構築し、物品の位置管理、状態管理(温度、振動)、及び物品への制御(LED点灯、プザー鳴動)の実現性を確認した。高さ2mのラックの並ぶエリアであったが、見通しのとれる場所へ固定機を設置したことで、荷(物品)が移動する通路全体を対象エリアとすることができた。

本技術試験の構成では固定機と移動機の最大離隔距離は 4~5m であり、ハイバンドUWBの測距及び測位の精度結果を見れば、今回実施したローバンドUWBによる技術試験と同等な位置にハイバンドUWBを設置することで、UWB無線センサーネットワーク実現の可能性が期待できる。

通信用途として用いたハイバンドUWBの伝送レートは 128Mbps としたが、映像伝送で利用した帯域はその約 1/5 であった。したがって能力としては 5 画面の同時伝送が可能であり、アプリケーションの拡張性が期待できる。

センサー機能の移動機 固定機方向の通信に加え、固定機 移動機方向の通信(制御)や、先に述べたブロードバンドデータ伝送機能による映像伝送と併用することで、より効果的なアプリケーションが期待できる。

第5章 ハイバンドUWBの既存無線システムへの干渉検討

5.1 干渉検討概要

今回の技術試験では、ハイバンドUWB無線センサーネットワークの実現可能性の確認と、倉庫で使用した場合におけるハイバンドUWBの電波伝搬特性を明らかにした。

これらの結果を用いて、倉庫で利用されるUWBの送出する電波が屋外に伝搬する様相を明らかにすると共に、UWBと周波数を共用する既存の無線システムへの干渉を定量的に明らかにし分析をした。

5.2 ハイバンドUWBの屋外への伝搬

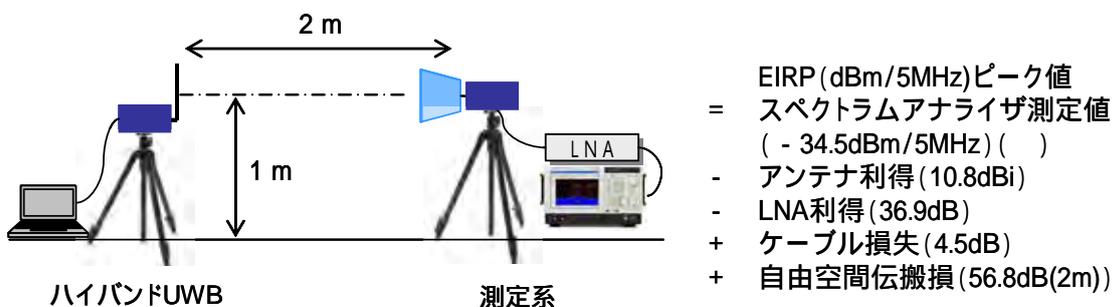
ハイバンドUWB装置を倉庫内で使用した場合の屋外へ漏洩する電波を定量的に明らかにした。

5.2.1 検討手順

本技術試験で得た倉庫内と屋外の境界(壁等)の透過損失や開口部(荷の搬出入口)から屋外に向けた電波伝搬状況の結果をもとに、技術試験を実施した倉庫でハイバンドUWB装置を使用した場合の屋外への電波漏洩状況を考察する。

屋外へ漏洩する電波が強くなる倉庫内の様々な場所、具体的には屋内外の境界付近でハイバンドUWBの移動機が利用される場合で検討した。

算出にあたっては、まずハイバンドUWBの等価平方輻射電力(EIRP)を図 5.2.1 に示す方法で実測結果を基に算出し、 $-20.9\text{dBm}/5\text{MHz}$ とした。



() 3.5.3 (図 3.5.3) の距離 2m の値 [$-39.5(\text{dBm}/5\text{MHz})$] に 5dB を加算。(3.7.3.2 参照)

図 5.2.1 EIRP の実測、算出方法

次に上記の EIRP 値でハイバンドUWB装置の位置から電波が倉庫外に自由空間伝搬していくとし、

[ある場所における受信電力 (dBm/5MHz)]
= [EIRP ($-20.9\text{dBm}/5\text{MHz}$)] - [境界部分の透過損失] - [自由空間伝搬損失]
により求めた。なお、境界部分の透過損失は、技術試験結果の値を適用した。

5.2.2 検討結果

技術試験を実施した倉庫で実際にハイバンドUWBを使用した場合の屋外への電波漏洩状況の検討結果を図 5.2.2に示す。

屋外の各ポイントに到達するUWBからの電力を 5MHz 幅のピーク値で示す。

なお、倉庫敷地外の建造物等による遮蔽は無視した。

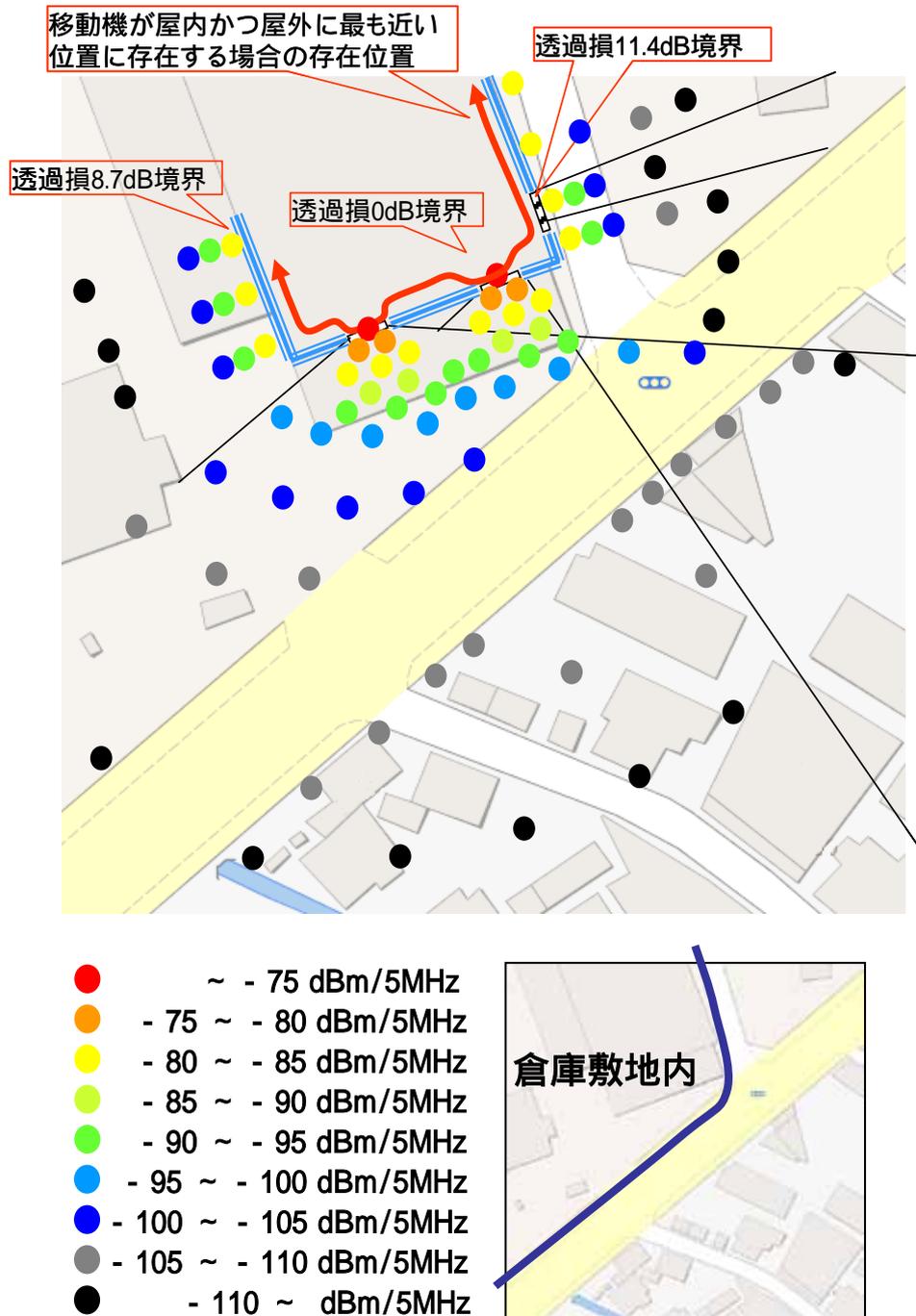


図 5.2.2 倉庫で使用するハイバンドUWBの屋外への電波漏洩状況

5.3 倉庫で使用されるハイバンドUWBの固定マイクロへの干渉検討

倉庫で使用されるUWBの屋外の固定マイクロへの干渉について、定量的に明らかにし、分析をした。

5.3.1 前提条件

ハイバンドUWBが 7.5GHz 帯を用いる固定マイクロ(中継用固定マイクロ、および携帯電話エントランス)に与える干渉について、技術試験を実施した倉庫環境をモデルに、干渉検討を行った。

なお、倉庫の実環境を踏まえた上で、干渉が最も起きやすい以下の条件を設定した。

- (1) UWBは、屋外に最も電波が漏洩しやすい位置である開口面(荷の搬出入口)で使用される移動機とした。したがって壁等による透過損は 0dB とした。
- (2) UWB・固定マイクロ間は見通し区間とし、倉庫外では自由空間伝搬とした。
- (3) 固定マイクロの伝搬路上の真下にUWBが存在するとした。

倉庫で使用されるハイバンドUWBと被干渉固定マイクロとの位置関係を図 5.3.1 に示す。

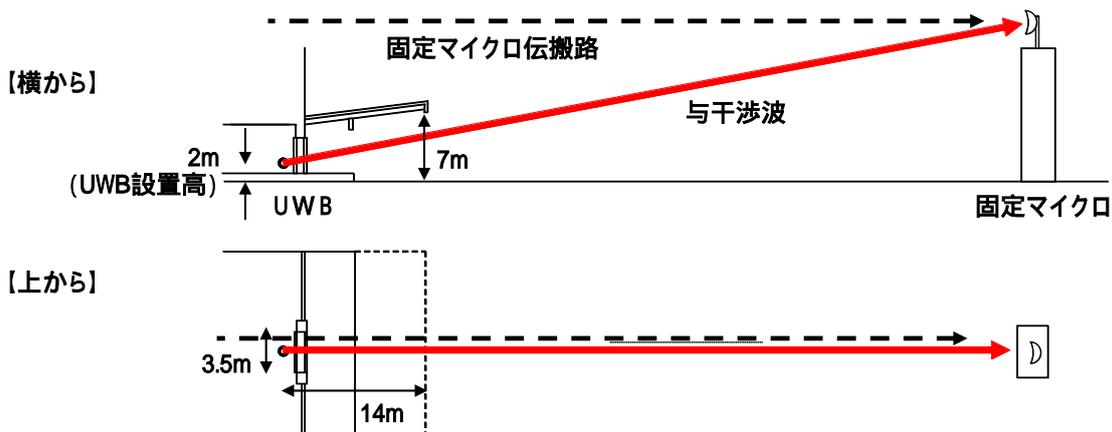


図 5.3.1 倉庫で使用されるハイバンドUWBと被干渉固定マイクロとの位置関係

5.3.2 被干渉となる固定マイクロの位置

被干渉固定マイクロの位置は、倉庫及び倉庫周囲の環境や既存固定マイクロの利用状況から、まず、固定マイクロの位置の範囲を明確化した。これを以下に示す。

- (1) 倉庫からせり出す屋根(ひさし)で見通し外となる位置は対象外とする。
倉庫におけるトラックの横付け位置には、鉄製の屋根(ひさし)がせり出しており、これによりUWBから見通せない位置にある固定マイクロは対象外とした。
技術試験を実施した場所で、UWBが最も屋外に近づく位置から屋根(ひさし)の端を見た仰角は約 21°であり、この値を適用した。
- (2) 倉庫開口部に置かれたUWBから固定マイクロ方向には、50m 先までは障害物がなく、50m 以遠の固定マイクロ方向への見通しを妨げる障害物は、50m 先の高さ

15m の建造物とする。

技術試験を実施した倉庫構内には、トラック用駐車スペースがあり、倉庫では50m 程度の見通しがあることを考慮した。また、高さ 15m の建造物として、2 階建て倉庫、もしくは、3～5 階程度の一般建築物を想定した。

(3) 固定マイクロの空中線高は 35m～150m の範囲とする。

中継回線として利用される場合、特に都市部では地上高を高くしており、固定マイクロの伝搬路が伝搬障害防止区域に指定されるためには、「電波伝搬路の中心線のすべて又は一部が地上高 45m 以上」なる条件があることから、空中線高は 45m 以上が一般的とも言えるが、近年の携帯電話エントランスの利用も考慮し、さらに 10m 低い 35m とした。

上記、ハイバンドUWBと被干渉対象固定マイクロとの位置関係から、検討対象となる被干渉固定マイクロの空中線位置のとりうる範囲を図 5.3.2 に示す。

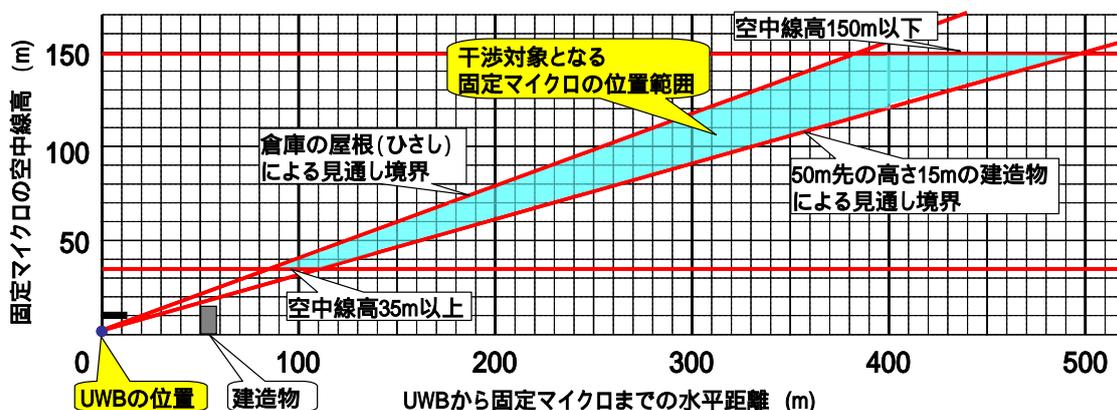


図 5.3.2 干渉検討対象となる被干渉固定マイクロの空中線位置のとりうる範囲

5.3.3 被干渉固定マイクロの諸元と干渉計算

被干渉システムとして、7.5GHz帯中継用固定マイクロシステム及び7.5GHz帯携帯電話エントランスシステムを選択した。干渉検討に関わる諸元を表 5.3.1 に示す。

表 5.3.1 被干渉対象システムの諸元

	中継用固定マイクロ	携帯電話エントランス
使用する周波数帯	7.425GHz～7.75GHz	
受信空中線利得	46.5dBi(4.0m パラボラ)	36.9dBi(1.2m パラボラ)
受信給電系損失	9dB	4dB
許容干渉レベル [kTBF-20]	-129.8dBm/MHz	-128.8dBm/MHz

被干渉システムの受信機入力レベルは以下の計算によった。

- 被干渉システムの受信機入力レベル(dBm/MHz)
- = UWB の EIRP (dBm/5MHz) (技術試験によるピーク値)
 - 自由空間伝搬損(dB)
 - + 固定マイクロの受信空中線利得(dBi)
 - 固定マイクロの受信空中線の指向特性による減衰分(dB)
 - 固定マイクロの受信給電系損失(dB)
 - 7(dB) (5MHz 幅から 1MHz 幅に換算 : $10\log(1/5)$)
 - 13(dB) (稼働率 5%として計算 : $10\log(5/100)$)

受信空中線の指向特性は、実際の空中線の特性を適用した。

5.3.4 検討結果

固定マイクロが最も干渉を受けやすい位置、すなわち

- ・UWB装置・固定マイクロ間距離が短い
- ・固定マイクロの受信空中線の主ビーム方向とUWB装置の方向とのなす角が小さい

を想定して干渉計算を行った。

その結果、いずれの位置においてもUWBによる干渉波は、固定マイクロの許容干渉量を下回る結果を得た。

中継用固定マイクロ、携帯電話エントランスおのこのについて、許容干渉量に対するマージンを図 5.3.3、図 5.3.4 にそれぞれ示す。

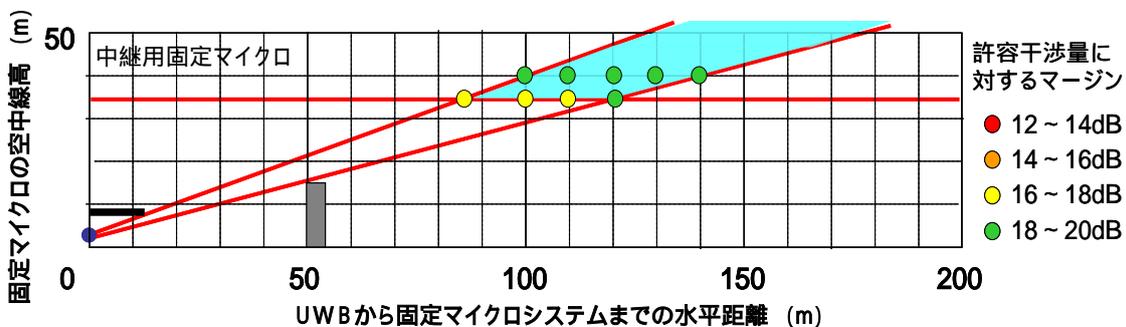


図 5.3.3 許容干渉量に対するマージン(中継用固定マイクロ)

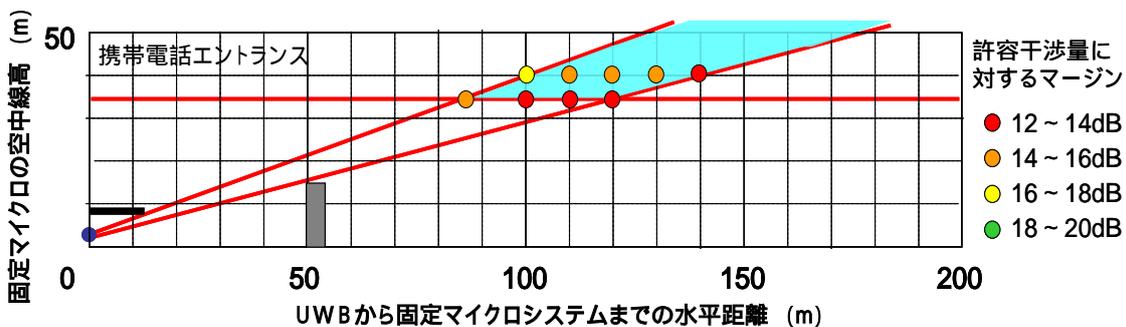


図 5.3.4 許容干渉量に対するマージン(携帯電話エントランス)

5.3.5 考察

中継用固定マイクロについては、受信空中線の指向特性が鋭いことから、UWBの近傍では、干渉許容マージンは距離に依存する。

一方、携帯電話エントランスは空中線が小型であり、指向特性の関係から干渉許容マージンは、距離よりもUWBから空中線を見た仰角が支配的となる。

本検討では、被干渉システムの受信空中線の指向方向上にUWBが存在する最も厳しい条件で検討したが、UWBが被干渉システムの指向方向から外れれば、その分、被干渉システムの受信空中線利得が軽減され、これにより干渉許容量に対するマージンが増加する。

また、開口部では、荷の積載、トラックの横付け、倉庫敷地と敷地外との境界の塀等、UWBからの電波の屋外への遮蔽物が多く存在すること、必要により搬出入口の鉄扉が閉められ完全な遮蔽となること等から、漏洩電波が他の被干渉システムへ及ぼす影響はより小さくなると考えられる。

倉庫には複数の開口部(間口は約 3.5m)が存在し、この場所にUWBが取り付けられた荷が複数存在することも想定されるが、これらのUWBは同一システムに収容され運用されるものであるため、複数のUWBが同時に電波を送出することは考えにくく、倉庫の開口部からの干渉波は1台のUWBのみによるものとみなすことが妥当である。

屋根(ひさし)や近隣の建造物との関係から、開口部では固定マイクロの空中線との見通し状態に制限があった。一方、見通し状態の良い、すなわち2階以上の上層階に設置されたUWBによる干渉では、1階と比べて固定マイクロ側の受信空中線利得が増加することになるが、上層階には開口部となりうる荷の搬出入口はないため、ブロック壁 8.4dB、通気窓 11.2dB の減衰が見込まれることになる。

5.4 UWB無線センサーの既存固定マイクロへの干渉検討

5.4.1 背景

ハイバンドUWBから固定マイクロへの干渉について、技術試験を実施した実際の倉庫を例に特定のモデルを想定した場合には、周波数共用が可能との結論を得た。様々な環境におけるUWB無線センサーの導入の検討では、2006年に行われた情報通信審議会情報通信技術分科会UWB無線システム委員会報告におけるシミュレーション検討を踏まえた干渉検討が必要である。UWB無線センサーの確率密度分布と、都市内電波伝搬の伝搬損失を考慮した干渉モデルのシミュレーション検討を行ったので、これを以下に示す。

『UWB無線システム委員会 報告書 (2006.3.27)』(以下、『報告書』)における干渉検討の結論は、『報告書』第5章「UWB無線システムの技術的条件」に示されており、第5 - 1 (7) 節には通信速度として50Mbps以上の限定が示されている。本調査検討会におけるUWB無線センサーネットワークにおいては、マルチパス伝搬環境における正確な測距、測位を行うアプリケーションが想定されるため、パルス繰り返し周期が30MHz以下、すなわち距離にして10m程度の範囲内でのパルス分離を前提として運用されることが考えられる。ここでは、『報告書』において前提とされた諸条件を踏まえ、50Mbps以上の伝送速度を有する通信設備と、主に50Mbps未満の伝送速度を有するセンサー設備が混在するアグリゲーション環境における既存システムへの干渉検討結果を示す。なお、『報告書』においては都市内のUWB普及率が高いため、これを最悪条件としている。

5.4.2 干渉モデルの考え方

『報告書』においては、ハイバンドUWB周波数帯域の既存システムにおいて、7.5GHz帯の固定マイクロ(資料4 - 1)と、9GHz帯の海上レーダ(資料4 - 3)がモデルとして想定されている。このうち、固定マイクロは干渉許容条件である干渉許容レベルがKTBF-20から求められる-129.8[dBm/MHz]と厳しい条件であり、この条件をクリアすることがUWB無線センサーと、既存固定マイクロの両立を可能とする条件であるといえる。一方、海上レーダ特に港湾監視レーダに関しては、固定マイクロに比較して、許容干渉レベルが-105(dBm/MHz) (『報告書』参考資料4 - 3参照)と大きく、また施設も港の周辺に偏在していると考えられ、システム共用条件は若干緩和されると考えられる。

『報告書』参考資料4 - 1では、マイクロ波UWBとの周波数共用条件を、検討するために図5.4.1に示すモデルを用いて、固定マイクロ波とマイクロ波UWBの周波数共用が成立することが算出されている。

しかし近年、同参考資料4 - 1 6ページに記載されているように、比較的地上高の低いエントランス回線が利用され、携帯電話の基地局等と同等の高さにマイクロ波アンテナが設置される可能性も考えられる。^[7]

一方、3GHz以上のマイクロ波帯の都市内伝搬損失の実測と推定式の検討が行われてお

[7] 大容量無線エントランス方式の開発：NTTDoCoMo テクニカルジャーナル Vol 13.No2 p.p.74-77 2005年7月)

り、『報告書』において前提とされている自由空間伝搬損失は、実測においては伝搬損失が4乗に比例することが示されている^{[8] [9]}。

特にアグリゲーション干渉が問題となる、都市内伝搬環境においては、ハイバンドUWBと既存固定マイクロが見通し条件に存在する可能性が低いと考えられ、この条件を用いてシミュレーション検討を行う。

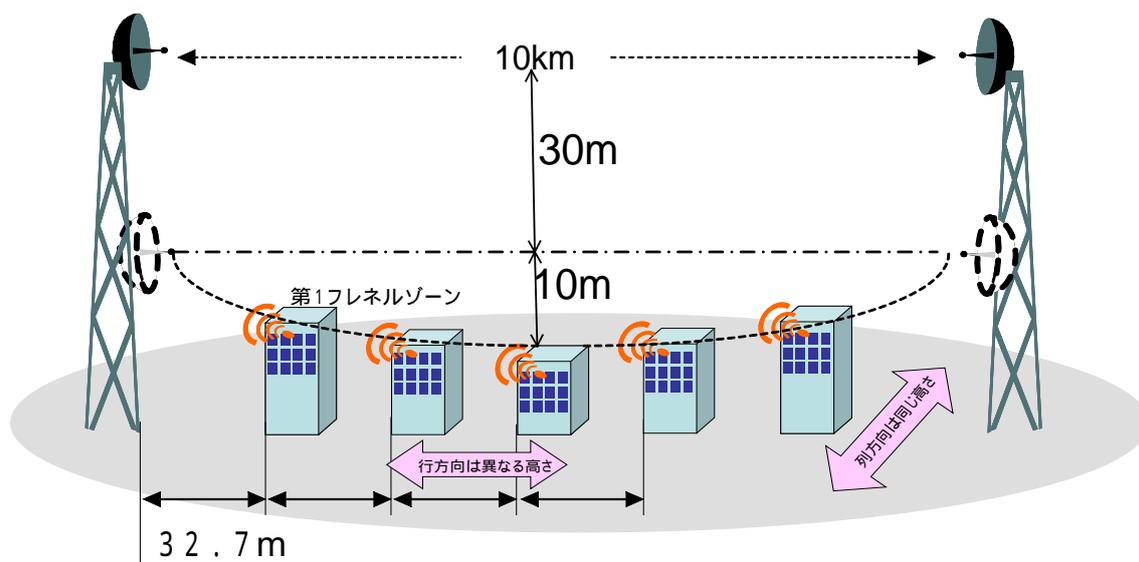


図 5.4.1 固定マイクロ波無線システムへの干渉モデル

5.4.3 UWB無線センサーの分布

- (1) ハイレート(50Mbps 以上)UWB無線機 : ピコネット 250device/km²

これは、上記『報告書』の前提となる分布である。

- (2) ローレート(50Mbps 未満)安心安全セキュリティータグシステム : 292device/km²

ローレートシステムは次の前提を仮定する。

リーダ、タグから構成されていて、リーダはACフック、タグはリーダの無線エリアに入った時のみ送信する。センサーシステムにおいては、タグは省電力のために通常は電波を送出しない。タグがリーダのエリア(本検討では、リーダを中心とした半径10mのエリア)に入った場合において、キャリアセンスを行いタグは電波を放射することを前提とする。

地域は東京等大都市圏を想定し、表 5.4.1にUWB無線センサーの普及密度の計算結果を示す。各種統計資料から公共施設(病院等)、事務所、工場、倉庫、大型店舗等の専有面積を計算し、UWB無線センサーが密に配置され

[8] 第4世代システムに向けた多重波伝搬特性の解明(NTTDoCoMo テクニカルジャーナル Vol. 12.No2 p.p.37-42 2005年7月)

[9] 400MHz～8GHz帯のマイクロセル伝搬損失推定式(第477回電波研連F分科会(URSI-F)資料2003年9月)

た場合、すなわちUWBリーダーが半径10mのエリアをカバーするとして、リーダーがすべての床面積をカバーするとした場合の普及密度である。

表 5.4.1 UWB無線センサーの普及密度

機器名	施設名	最大密度地域	1 km ² あたりの占有面積 (m ² /km ²)	台数密度 (台/km ²)
UWB無線センサー	事務所	東京都	36,561.4	182.8
	病院	大阪府	3,846.1	19.2
	屋内展示施設	東京都	594.9	2.9
	物流倉庫	大阪府	3,582.8	17.9
	大型店舗	東京都	950.6	4.7
	工場	大阪府	12,830.0	64.1
合計				291.3

これらより端末普台数は、ハイレートの通信用途UWBとローレートのセンサー用途UWBを合計して、542 device/ km²となるが、干渉計算における前提としては、マージンを加えた1000device/ km²とする。

5.4.4 検討結果

今回のモデルは文献^[10]を参照、シミュレーション計算照合をした上で、3点を考慮している

- (1) マイクロ波アンテナ高を10mとして検討すること。
- (2) 伝搬損失は、マイクロ波アンテナから100m迄は距離の2乗、100m以上は3.3乗に比例すること。
- (3) 端末分布密度を均一とし、アンテナ背面方向のアグリゲーション干渉も考慮に入れること。

(2)に関しては、文献^[10]におけるダブルスローブモデルを用いている。このモデルにおける、伝搬損失量は、文献^[8]、^[9]の測定結果より小さく、干渉量としては大きくなることを前提としている。

なお、計算の前提としては、アンテナ指向性はITU-R F699(パラボラ標準モデル)、1245(パラボラ、アグリゲーション干渉検討モデル)利得46.5dBi、屋内の伝搬損失12dB、UWB無線の稼働率は5%として計算している。

以上の計算結果より、表5.4.2に示すように、kTBF-20の干渉基準-129.8(dBm/MHz)を満たしており、固定マイクロ波システムへの干渉量は許容値に対して3dB程度のマージンを持って、共用条件を満たすことが分かる。

^[10] W.Sorgel et.al “Sensitivity of Aggregate UWB Interference Models to their Parameters” Proceedings of The 2nd work shop on Positioning and Communication(WPNC’05)&1st Ultra Wideband Expert Talk (UET’05)

表 5.4.2 アグリゲーション干渉の計算結果(7.5GHz)

Antenna model	ITU-R F699	ITU-R F1245
Inter ference level 1000device/km ²	-132.8dBm/MHz	-133.6dBm/MHz

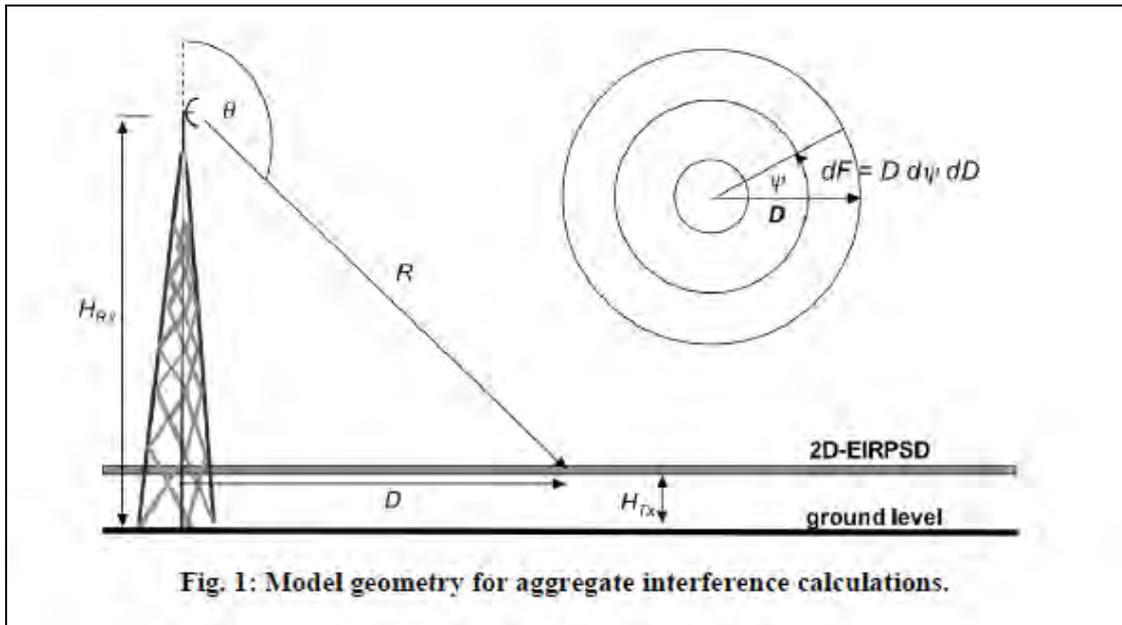


図 5.4.2 干渉のモデル

5.5 今後の検討課題

UWB無線センサーシステムと他の無線システムとの周波数共用条件を検討するため、5.3では、特定のモデルを想定した検討を行った。また、5.4では2006年に行われた情報通信審議会情報通信技術分科会UWB無線システム委員会報告におけるシミュレーション検討を踏まえ、試算としてUWB無線センサーシステムの確率密度分布と、都市内電波伝搬の伝搬損失を仮定してシミュレーション検討した結果を示した。

同様に、他の手法による干渉検討事例を調査したところ、情報通信審議会UWB無線システム委員会「準ミリ波帯を用いたUWBレーダシステム(24GHzレーダ)に関する答申(2009.11.24)」の中に、システム間干渉計算モデルとしてITU-R勧告P.452-13を用いた事例があった。

また、ヨーロッパの最新動向として、ETSI資料(Draft ETSI EN 302 065 V1.2.1(2009.12))に干渉軽減技術の記載などが見られることが分かった。

以上のことから、今後のUWB無線センサーシステムと他の無線システムとの周波数共用条件の検討課題としては、以下に示す、ITUの勧告等に基づく干渉検討モデルの検討、都市部におけるマイクロ波帯の電波伝搬試験、報告等の調査などがあげられる。

- (1) ITUの周波数システム共用条件を導出するための干渉検討方法の勧告(ITU-R P.452-13 "Prediction procedure for the evaluation of microwave interference between station on the surface of Earth at frequencies above about 0.7GHz")と他の干渉計算モデルの比較検討、特に、送受信装置周辺の建物の影響についてクラッタ損失として考慮する手法等に関する検討。
- (2) UWBシステム側の被干渉検討、特に9GHz帯における高出力レーダによる干渉検討。
- (3) 干渉軽減技術として、主にヨーロッパに於いて検討されているLDC (Low Duty Cycle) 等干渉軽減技術に関する調査及びシミュレーション検討。
- (4) ハイバンドUWB周波数帯における都市内伝搬損失に関する文献調査。
- (5) 上記(1)、(2)の確認、比較のための都市内電波伝搬特性の実測、評価に基づく干渉条件の検討

參考資料

参考1 使用機器および特性等

機器名	製品名	備考(S/N 等)
ハイバンドUWB固定機	UWB Product Development Kit (GIT)	WU001 WU002
ハイバンドUWB移動機	UWB Product Development Kit (GIT)	WU001
ローバンドUWB (固定機、移動機兼用)	日立 Air Sense UWBエントリーモデル	
受信電力測定用アンテナ	Doubleridge Horn Antenna Model 3115 (ETS・LINDGEN)	S/N:00066542
スペクトラムアナライザ	E4407B (Agilent)	S/N:MY41440628
LNA	8449B (Agilent)	S/N:3008A01646
距離計	DIST D5 (Leica Geosystems)	S/N:391140724

・受信電力測定用アンテナ

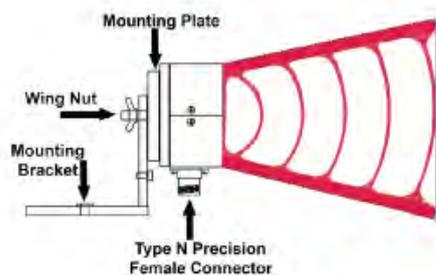
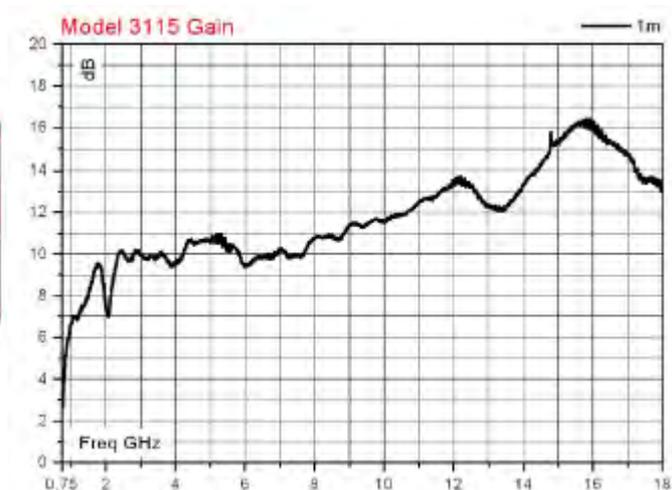
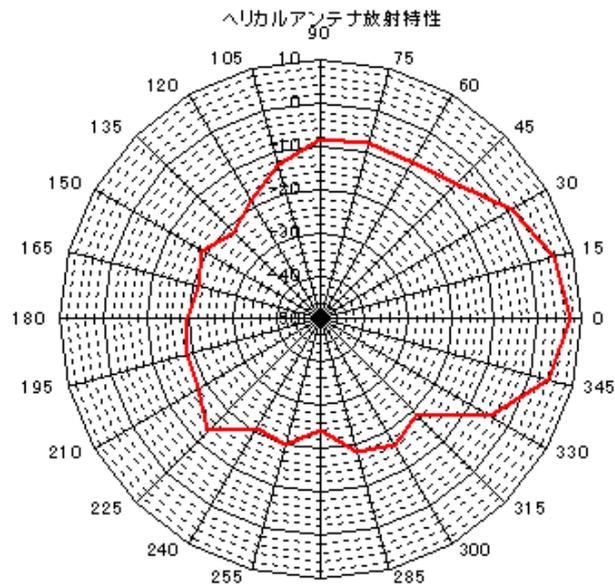


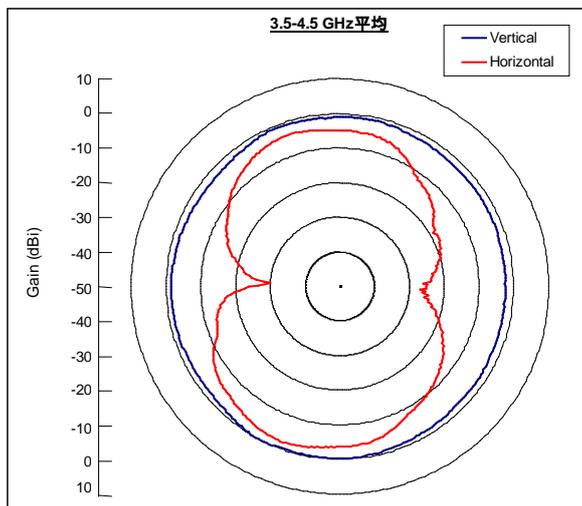
Figure 2. Model 3115 Mounting Diagram



・ハイバンドUWB無線装置のアンテナ放射特性(ヘリカルアンテナ)



・ローバンドUWB無線装置のアンテナ放射特性



	Vertical (dBi)	Horizontal (dBi)
max	-0.20	-2.21
min	-2.56	-30.12
ave	-1.55	-7.41

参考2 調査検討会開催趣旨

UWB無線センサーネットワークの周波数共用条件に関する調査検討会 開催趣旨

近年、倉庫、工場などにおける作業者の安全管理や物品管理の効率向上などの用途において、人や物品の動線把握、個別位置を管理するシステムに対する要望が高まっている。

既存の近距離無線システムを利用したセンサーネットワークは、倉庫や工場などの反射波の多い屋内空間では高精度な位置測位が困難であることから、より高精度な測位が可能なUWB無線システムを活用したセンサーネットワークが期待されている。

UWB無線システムは、非常に広い帯域幅にわたって電力を拡散させる無線システムであり、センサーネットワーク向けの低速(インパルス型)のUWB無線システムは倉庫や工場など反射波の多い屋内空間でも安定した通信が可能であり、数十センチメートルの高精度な測位を可能にするという特徴がある。

一方、UWB無線システムは、他の無線システムと周波数共用を図っており、その導入に当たっては他の無線システムとの周波数共用等の技術的条件を検討する必要がある。

このため、ハイバンド(7.25GHz～10.25GHz)のUWB無線システムを活用したセンサーネットワークについて、倉庫、工場等の実環境において建物構造による電波の遮蔽効果等を調査検討し、他の無線システムとの周波数共用条件等に反映することを目的として調査検討会を開催する。

参考3 調査検討会開催要綱

UWB無線センサーネットワークの周波数共用条件に関する調査検討会 開催要綱

1 名称

この検討会は、「UWB無線センサーネットワークの周波数共用条件に関する調査検討会」(以下、「検討会」という。)と称する。

2 目的

ハイバンド(7.25GHz～10.25GHz)のUWB無線システムを活用したセンサーネットワークについて、倉庫、工場等の実環境において建物構造による電波の遮蔽効果等を調査検討し、他の無線システムとの周波数共用条件等に反映することを目的とする。

3 検討事項

検討会の目的を遂行するため、次の事項について調査検討する。

- (1) 実環境での屋内外の電界強度状況の把握
- (2) 電波の遮蔽、漏洩状況の把握
- (3) 測位、測距への適用可能性と実用レベルに必要な最低電界強度の把握
- (4) 他システムとの与被干渉状況
- (5) 機能の有効性と測位、測距の誤差等の把握

4 組織

検討会の組織構成は、次のとおりとする。

- (1) 検討会は、近畿総合通信局長の委嘱を受けた者により構成する。構成員は、別添の構成員名簿のとおりとする。
- (2) 座長1名を置く。座長は構成員の互選により選出する。
- (3) 副座長を置く。副座長は座長が指名する。
- (4) 検討会には、必要に応じて作業部会を置くことができる。

5 運営

検討会の運営は、次のとおりとする。

- (1) 検討会は、座長が招集し、主宰する。
- (2) 副座長は、座長を補佐し、座長不在の場合は座長の職務を代行する。
- (3) その他、運営に関して必要な事項は、座長が定める。

6 開催期間

検討会の開催期間は、平成21年7月から平成22年3月までとする。

7 事務局

本検討会の庶務は、近畿総合通信局無線通信部企画調整課が行う。

参考4 調査検討の開催状況

年月日	審議・作業内容
平成 21 年 7 月 9 日	第1回検討会の開催 <ul style="list-style-type: none"> ・ 開催趣旨の確認及び開催要綱の承認 ・ 座長の選出、副座長の指名 ・ 作業部会の設置及び構成員の確認 ・ 審議予定の承認 ・ UWBの現状と動向(報告) ・ 技術試験の実施項目の確認
平成 21 年 7 月 30 日	第1回作業部会の開催 <ul style="list-style-type: none"> ・ 技術試験の実施方法について討議
平成 21 年 9 月 10 日	第2回検討会の開催 <ul style="list-style-type: none"> ・ 技術試験で用いるUWB機器の確認 ・ 技術試験の実施場所・実施方法の確認
平成 21 年 11 月 12 日 ～ 11 月 20 日	技術試験の実施 公開技術試験の実施(11月18日)
平成 21 年 12 月 17 日	第2回作業部会の開催 <ul style="list-style-type: none"> ・ 技術試験結果の確認
平成 22 年 1 月 26 日	第3回検討会の開催 <ul style="list-style-type: none"> ・ 技術試験の結果について確認 ・ 報告書の構成について確認
平成 22 年 2 月 17 日	第3回作業部会の開催 <ul style="list-style-type: none"> ・ 報告書案について討議
平成 22 年 3 月 11 日	第4回検討会の開催 <ul style="list-style-type: none"> ・ 報告書の確認

参考5 調査検討会構成員名簿

(五十音順、敬称略)

： 座長	： 副座長
有田 隆	富士通コンポーネント株式会社 マーケティング本部 第四マーケティング部 部長
岩井 誠人	同志社大学 理工学部 電子工学科 准教授
神野勝三郎	財団法人テレコムエンジニアリングセンター 西日本サービスセンター 所長
笹岡 秀一	同志社大学 理工学部 電子工学科 教授
竹垣 弘	社団法人全国陸上無線協会 近畿支部 企画調査委員
西川 久	株式会社日本ジー・アイ・ティー 開発本部 本部長
原田 永康	三菱電機株式会社 通信エンジニアリングセンタ 関西通信システムエンジニアリング部 専任
深川 隆	パナソニック株式会社 東京R & Dセンター 通信コアデバイス開発センター 要素開発グループ 主幹技師
水田 秀廣	パナソニックロジスティクス株式会社 ソリューション事業本部 事業管理グループ グループマネージャー
宮崎 祐行	株式会社日立製作所 中央研究所 主任研究員
李 還幫	独立行政法人情報通信研究機構 新世代ワイヤレス研究センター 医療支援ICTグループ 主任研究員

以上

参考6 作業部会構成員名簿

(五十音順、敬称略)

： 部会長

岩井 誠人 同志社大学 理工学部 電子工学科 准教授

西川 久 株式会社日本ジー・アイ・ティー 開発本部 本部長

深川 隆 パナソニック株式会社 東京R & Dセンター
通信コアデバイス開発センター 要素開発グループ 主幹技師

宮崎 祐行 株式会社日立製作所 中央研究所 主任研究員

李 還幫 独立行政法人情報通信研究機構 新世代ワイヤレス研究センター
医療支援ICTグループ 主任研究員

以上