U.D.C 537.8.7

屋内測位技術に関する調査研究およびサブギガ帯に着目した屋内電波伝搬に関する基礎検討

渡辺　拓人*　　池田　直広*

要　約：　建設現場における資機材の数量や人や物の所在（位置）の管理を効率的に行うことを目的とした位置情報を取得するための測位技術に関する調査を行った結果を報告する。測位技術の中には，3D レーザースキャナ，トータルステーション等のレーザーを用いたミリメートル級の高精度な測位を行えるデバイスも存在するが，ここでは，Bluetooth や Wi-Fi に対応した 2.4 GHz 帯の電波，またはサブギガ帯（920 MHz 帯）の電波を用いた技術を対象とし，ゼネコン各社での取り組み内容や，目的，測位対象物，および使用する測位手法に着目して整理を行った。その中で，2.4 GHz 帯に比べて電波の回り込み性能に優れたサブギガ帯に着目し，屋内における電波伝搬環境のシミュレーションおよび実測を行い，これらの結果より，屋内測位へ適用する際の課題抽出を行った。

ｷｰﾜｰﾄﾞ：　屋内測位，2.4 GHz 帯，サブギガ帯，RSS（Received Signal Strength），AoA（Angle of Arrival），

目　次：

1. はじめに
2. 2.4 GHz 帯の屋内測位技術
3. サブギガ帯の屋内測位技術
4. サブギガ帯における電波伝搬解析
5. 考察・まとめ

1. はじめに

建設現場での省力化に向けて，現場内の車両や人，資機材の数量や所在（位置）の管理を効率的に行うために，主に 2.4 GHz 帯の電波を用いた測位システムの導入が進められている。規模の大きい超高層建築や物流施設等の建設現場では，多数の協力会社の作業員が入れ替わり入場するため，資機材の協力会社ごとの使用状況や所在管理に困難が伴う。高所作業車やフォークリフトなどの建機や，台車や立ち馬といったレンタルで導入している資機材は膨大に存在しており，正確な数量や，資機材の紛失，使用中または空き状態なのかを把握できるような管理方法が求められる。このような課題に対して，作業員や高所作業車の位置情報を端末上に表示し，遠隔で高所作業車の利用状況・予約状況を閲覧できるようなシステムがある。予約状況や貸出実績をデータで把握できるため稼働率データによって管理効率も向上し，無駄な台数を削減することで，レンタル費の低減にも繋がっている。また，デジタル空間上に資機材や人の位置情報を融合させて，現場内に設置された複数のカメラや IoT センサ等から得られた情報を端末上に表示し，リアルタイムに現場全体の状態を可視化できるシステムが開発され，現場管理に必要な様々な情報を同一画面内に一元化することで位置情報と他の情報を連携させる事を可能としている。

このような位置情報の活用において，建設現場における位置を検知するための手段としては主に 2.4 GHz 帯の電波を用いた通信モジュールが用いられており，例えば図 1 に示すシステムは，2.4 GHz 帯の BLE（Bluetooth Low Energy）を用いたシステムであり，移動体に取り付けたビーコン（資機材ビーコン）と建物に設置されたビーコン（固定ビーコン）との間の通信により電波の強さを計測することで強さに応じた距離を算出し移動体の位置を推定している。

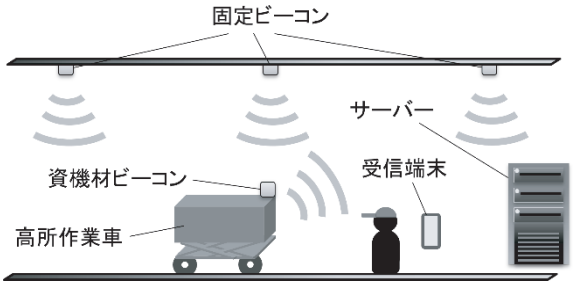

図 1　2.4 GHz 帯の電波を用いた測位システム

2. 2.4 GHz 帯の屋内測位技術

2.4 GHz 帯の BLE を用いた測位システムでは，高精度な測位を実現するために見通しが利くよう多数のビーコンを設置することで，直近のビーコンと移動端末との通信により，電波の受信レベルを計測する[1)]。BLE デバイスがブロードキャストしているアドバタイズパケットには，事前に設定された 1 m 地点での RSS（Received Signal Strength）の実測値が含まれており，事前に測定された 1 m 地点での RSS を基準 RSS（以下規準 RSS）として設定

*技術研究所　建設 ICT グループ

することで，基準 RSS と実測された RSS から距離を算出することができる。そして，算出された距離およびサーバー側に登録されている固定ビーコンの座標情報に基づき，移動端末の位置を知ることができる。本手法では，電波の通信経路に障害物が存在せず見通しが利く LOS（Line of Site）で利用することが前提となり，見通しが利かない NLOS（Non Line of Site）の場合では，障害物の影響により RSS に大きな減衰が伴うため，算出される距離の誤差が大きくなる。現実的には LOS においても床や壁による反射波と直接波が干渉して RSS は空間的な配置条件によって変動を生じるため，推定値にはこれらの反射波に起因する誤差が含まれる。

また，Bluetooth5.1 規格以降では，RSSI を利用しないで位置の推定を行う手段として，電波の位相を利用する仕組みが新たに組み込まれている。この位相情報を用いた測位手法には受信した電波の到来角度を算定する AoA（Angle of Arrival）や，送信した電波の放射角度を算定する AoD（Angle of Departure）と呼ばれる測角技術が用いられており，測位環境やシステム構成によって高精度な測位が実現できる。しかしながら，到来角度の算定には，反射波の影響を全く受けない訳ではなく，建物で反射して電波が伝搬するマルチパス環境や，遮蔽されて減衰する環境では，推定角度に誤差が生じる可能性がある。また NLOS においては電波の経路に金属のような遮蔽物があると，直接波よりも反射波の受信レベルが支配的となり誤差が増大する。また測角型は単純な RSSI 測位と比べるとシステムが複雑となるため高いノウハウが必要とされている。また建設現場の中に測位対象となる移動端末との見通しが利くよう多数のビーコンを設置することが前提となるため，導入した後の管理の省力化効果と見合う機材・設置費用を含めた導入コストを実現することが課題となる。

NLOS においても所定の位置精度を実現する方法として，フィンガープリント測位（位置指紋測位）と呼ばれる手法があり，この手法では，必要な情報を収集するためのサイトサーベイと呼ばれる作業が必要となる。このサイトサーベイでは測位エリア内で各ビーコンからの RSS を測定し，測定した位置と対応付けて RSS を記録していく。このように，事前に各測定点の座標データと RSS のデータに基づくデータベースを作成する必要がある。測位方法としては，このデータの情報の中から，実際に端末が受信した RSS レベルと似ている場所を探索し，その場所に端末があると推定する。本手法は周辺環境の変化に対して，再取得の繰り返しが必要となるため，環境変化の大きい建設現場では日々のデータ取得が必要な点が課題となる。

次に具体的な 2.4 GHz 帯測位システムの開発事例について示す。図 2 に，Wi-Fi と屋内 GPS を用いた測位システムを示す[2)]。屋内に設置されている Wi-Fi ネットワークと屋内 GPS「IMES：Indoor Messaging System」を用いて，屋内での歩行者ナビゲーションにより避難誘導の実現を目的としている。このシステムでは，携帯端末から送信された位置情報を受信して当該位置情報を送信する Wi-Fi アクセスポイントと，屋内 GPS 送信機から送信された屋内位置情報を受信し，屋内位置情報と自己の位置情報とを送信する固定端末を備えている。屋内 GPS に配置間隔が位置精度に直接関係するため，高精度に位置を把握するには，屋内 GPS の配置間隔を狭く取る必要がある。

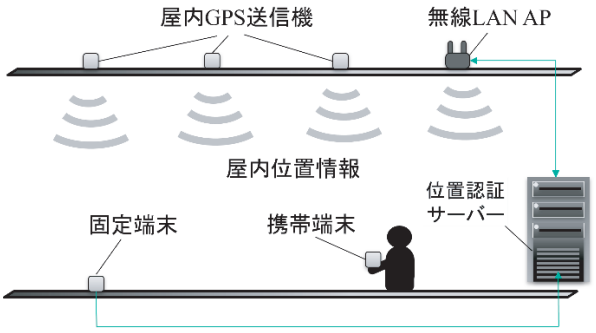

図 2　Wi-Fi と屋内 GPS による測位システム

次に，図 3 にメッシュ Wi-Fi を用いた測位システムを示す[3)]。このシステムでは，建設現場の中における地下階，高層階などセルラー回線の届かない場所において，網羅的にインターネット環境を提供できるメッシュ Wi-Fi を用いている。メッシュ Wi-Fi アクセスポイントと測位用受信機器を一体化させて利用することで，少数機器での Wi-Fi 通信と位置情報の取得を可能としている。従来に比べ設置する機器数量を削減でき，設置・盛替え等に係る大幅な省人化とコスト削減を可能としている。また，工程進捗によって通信環境が変化する建築現場でも適用可能としている。これらの 2.4 GHz 帯測位システムの共通の課題として，2.4 GHz 電波の特性上，電波の到達範囲が狭く，多数のビーコンの設置・盛替えに伴うコストの低減が課題と考えられる。

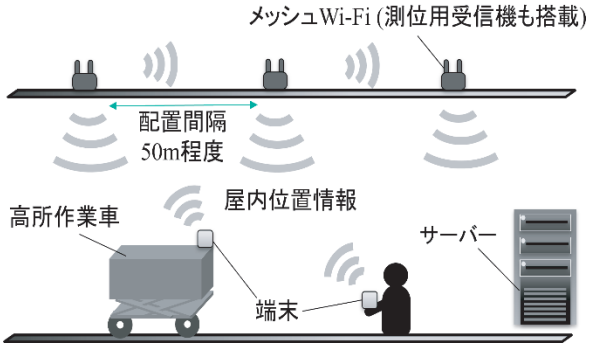

図 3　Wi-Fi と屋内 GPS による測位システム

3. サブギガ帯の屋内測位技術

サブギガ帯は日本国内において 920 MHz 帯（915～928 MHz）に割り当てられたアンライセンスバンドで Wi-SUN，Sigfox，LoraWAN 等の規格があり，メーカー独自

のプロトコルを実装されている。特徴としては，省電力かつ長距離通信に適しており，2.4 GHz 帯の数倍の飛距離を確保できる点である。このような特徴を活かせば，現場の中に設置する無線モジュールの設置間隔を広く取ることで設置数量を減らすことができ，導入コストや運用手間を削減できる可能性がある。

図 4 にサブギガ帯の電波を用いた測位システム[4] の研究事例を示す。建設現場のように見通しが利きづらい環境でも電波の回り込み性能や長距離通信に適した特徴を持つサブギガ帯の通信モジュールにより，現場作業員や現場資機材の迅速な位置把握が可能とされている。またモジュールと一体化した熱中症のセンサによる体調管理も同時に行えるシステムとしている。このシステムでは，無線モジュールが搭載されたセンサや端末から発信されるサブギガ帯の電波を，現場に設置されたサブギガ帯無線モジュールが複数のアンテナで受信し，受信した電波を解析することで，センサや端末の位置を AoA で検知している。サブギガ帯の特徴により，電波の到達距離は現場内で 100 m 以上であり，従来の屋内測位システムよりも設置するモジュールの個数を削減できるとされている。

このようなシステムを導入する場合，電波の到達距離で考えると四隅に無線局を置けば全体をカバーすることが可能だが，移動体から 3 つ以上の無線局が見通し内に存在しない場合，NLOS 測位となるため誤差が大きくなってしまう点が課題と考えられる。また AoA の場合，金属板の遮蔽の影響により誤差が生じることが考えられるが，見通し内における高精度な測位が期待できる。

図 4　サブギガ帯の電波を用いた測位システム

4.　サブギガ帯における電波伝搬解析

サブギガ帯の無線到達範囲を把握するため，実際の建物を対象とした電波伝搬特性をレイトレース法（3D 電波伝搬シミュレーションソフト EEM-RTM ver. 3.5）で解析する。図 5 に解析モデルを示す。まず，直接波及び反射波の干渉により RSS の空間変動がどの程度生じるか確認するため，RSS の距離に対する分布解析を行った。天井と床をそれぞれ岩綿吸音板（ε_r=2），コンクリート（ε_r=7）とし，送信アンテナ（*Tx*）および受信アンテナ（*Rx*）は，無指向性アンテナ（Gain＝0 dBi），*Rx* は水平方向の距離 20 m に対して，1000 点を等間隔に配列した。

図 6 に解析結果を示す。自由空間の理論値を解析値と併せて示す。この結果より，理論値は指数関数的に RSS が減衰する一方，解析値は，天井や床の反射影響を受けて，距離が 10 m 以上離れた場所では，理論値との差が最も大きくなり 10 dB 以上の空間変動が生じることが分かった。

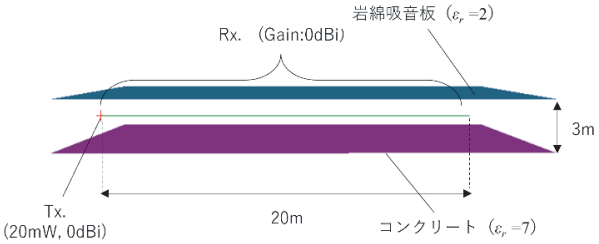

図 5　レイトレース法解析モデル

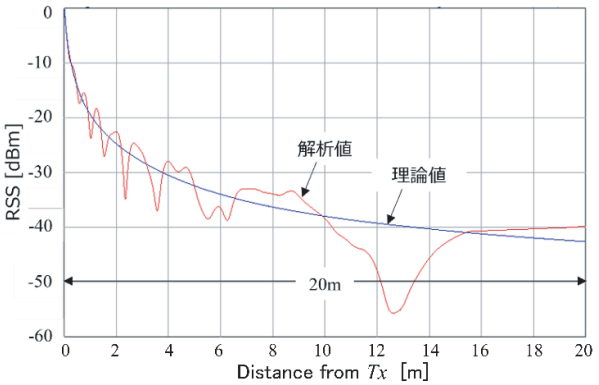

図 6　図 5 における RSS 解析結果

次に，実際の RSS を推定するため，図 7 に示す実際の建物を模擬した解析モデルについて検証した。柱や間仕切壁をコンクリート（ε_r=7）とし，各階のスラブは透過損失の実測値である－10 dB とした。送信アンテナ（Tx）および受信アンテナ（Rx）は，無指向性アンテナ（Gain＝0 dBi）としており，Tx は 1F に隅に設置した。Rx は垂直方向に配列しており，等間隔に 1000 点とした。また実際には，建物内の人の動き等によるフェージングも考慮する必要があるが，ここでは静的環境の解析を行っている。

図 8 に解析結果と併せて解析の妥当性検証のために実測値を併せて示す。解析値は赤線で示しており，青線は参考データとして位相を考慮せず，Rx におけるレイの振幅を合算した場合の RSS である。なお，各フロアにおける実測値をドットで示す。実測では，各階における床上 1.6 m の高さにおける RSS を計測した。この結果より，赤線の解析値には大きな空間変動が生じていることが確認でき，局所的に 20 dB 程度 RSS が低下する箇所が存在する事が分かり，実測値と解析結果は概ね傾向が一致する事が確認できる。ここで，サブギガ帯によりカバーできる範囲は，通信モジュール自体の最低感度に依存するが，メーカーごとに独自の仕様となっている。一般に－100 dBm 以上で通信可能な受信感度であり，解析結果より 1F～5F までカ

バーできるが，空間変動の大きい箇所では通信不可となる領域も存在することが分かった。

5. 考察・まとめ

本稿では，電波を用いた測位技術を比較して特徴や用途を整理した。測位技術により現場での高所作業車，資機材，人を対象とした位置情報を取得し，遠隔で稼働状況や実績を管理できる事がメリットである一方，測位システムの導入費や設置・盛替え等のコスト削減が課題と考えられる。また，サブギガ帯の屋内電波伝搬解析を行い，スラブの透過損失が－10 dB 程度の場合では，少数の無線局で測位システムを構成できる可能性があることが分かった。一方，フロアを隔てた NLOS 測位では，RSS の減衰程度によって位置の推定誤差が大きくなるため，電波の減衰を補正する手段等が必要となる事が課題として挙げられる。

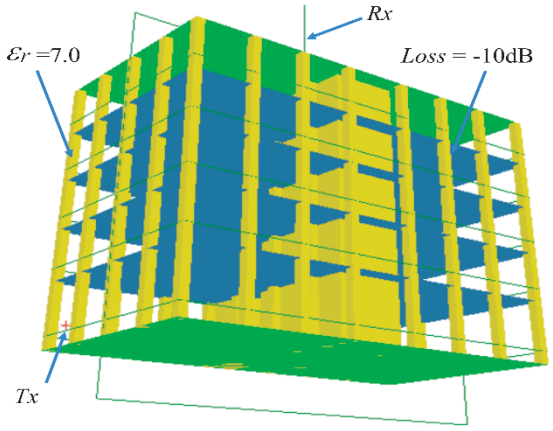

図 7　建物を模擬した解析モデル

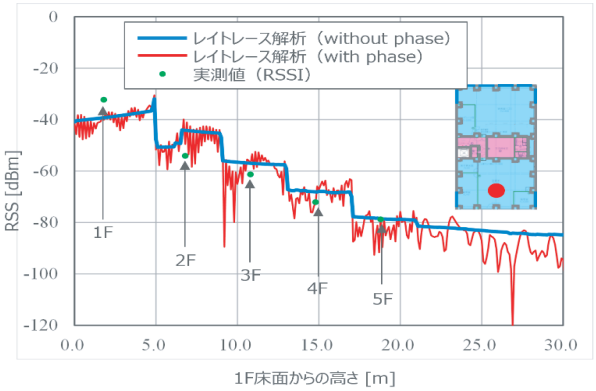

図 8　RSS 分布の解析結果および実測値

謝　辞

電波伝搬解析において，ご指導を賜りました九州大学 牟田准教授に感謝致します。

参考文献

1）https://www.takenaka.co.jp/solution/future/ichiplus/（竹中工務店「位置プラス」）
2）https://www.shimz.co.jp/solution/tech106/index.html（清水建設株式会社「IMES」）
3）https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2021/210420_8100.html（大成建設株式会社「T-BasisX」）
4）特開 2019-138785（P2019-138785A），現場管理システム（戸田建設株式会社，マンパワーグループ株式会社）

Survey of Research and Technological Development Related to Indoor Positioning Technique and an Analytical Study of Indoor Propagation of EM-wave at Sub-GHz band.

T. Watanabe and N. Ikeda

In this report, we describe the survey on positioning technology for obtaining location information for the purpose of efficiently managing the quantity of materials and equipment such as a vehicle and the position of people objects at construction sites. In positioning systems, various technique are used, such as GPS（Global Positioning System）as a representative method, laser devices as methods of highly accurate, and three dimensional laser scanners. In this survey, positioning systems using EM-wave of 2.4 GHz band, such as Wi-Fi and Bluetooth, and SubG band（920 MHz band）were focused. Radio wave transmission characteristics and indoor radio wave propagation environment were studied by simulation and actual measurement. Next, indoor RSS（Received Signal Strength）was measured to find problems for realization of an indoor positioning systems using Sub-GHz band.