

# ワイヤレス VAV/FCU システムの開発

## Development of a Wireless VAV/FCU System

株式会社 山武  
ビルシステムカンパニー

柏屋 弘  
Hiroshi Kashiwaya

株式会社 山武  
ビルシステムカンパニー

水高 淳  
Jun Mizutaka

### キーワード

Wireless, ZigBee, ダイバシティ, VAV, FCU, 空調システム

梁やダクトなど金属製の障害物がある居室天井裏でのワイヤレス通信は、見通しのある屋外などの環境に比べ、電波強度が極度に減衰するため伝送距離が著しく短くなる。今回、天井裏においても良好な通信品質を確保可能なメッシュダイバシティ通信技術を開発・適用することで、有線システムと比べ工事期間を大幅に短縮可能なワイヤレス VAV/FCU システムを開発したので報告する。

In wireless communications, radio field intensity is extremely low and the transmission range is severely limited places like an attic having metal obstacles such as beams or ducts, compared with that in the open air. We have developed a mesh network diversity communication technology that ensures good communication quality even in such attic spaces. Based on this technology, we developed a wireless VAV/FCU system that can be constructed in far less time than wired systems. This paper describes these developments.

## 1. はじめに

近年、大規模化／高層化が進む高層ビルに関しては、建築工法等の技術開発により、フロアあたり建築工程 3～4 日が実現しており、空調設備もこれら短工期に対応する技術開発が進んでいる。計装工事分野も例外ではなく、以下の様な取組みにより施工の効率化を図っている。

- ① 天井スラブにケーブル支持材料を施設し配線する「天井内ころがし配線工法」
- ② 結線部分コネクタ化
- ③ 制御盤サブパネル化

これらは配管／配線／結線作業を低減するための工夫であるが、作業そのものをなくすことができれば、さらなる計装工事効率化が実現する。

居住者にとっての快適性と省エネルギーの点から、オフィスの空調制御としては、VAV(Variable Air Volume), FCU(Fan Coil Unit)を用いる制御が主流となっており、その実現のため当社では VAV コントローラ (Inflex™VC), FCU コントローラ (Inflex™FC), 連携制御コントローラ (Inflex™ZM) 空調機コントローラ (Inflex™GC) を提供してきている。

現在、天井裏での取り付け作業を省略するため VAV/FCU ユニットに VAV/FCU コントローラを先行して取り付けているが、その後の通線／結線のための作業工数が未だ大きい。

そこで今回、VAV/FCU ユニット設置後に、電源を投入し、後述する施工調整ツールを用いてアドレス等の通信パラメータを設定するだけで自動的に通信を確立できる、ワイヤレス VAV/FCU システムを開発した。

設置作業と電源工事以外の作業を省くことが可能となり、結果として、居室内の計装工事に関して 50% 以上の効率化を図ることが可能となる。

## 2. システム構成

ワイヤレス VAV/FCU システムの概略を図 1 に示す。天井裏に設置される VAV/FCU コントローラ、機械室の制御盤内に設置される連携制御コントローラ及び空調機コントローラで構成される点は従来の有線システムと同様である。

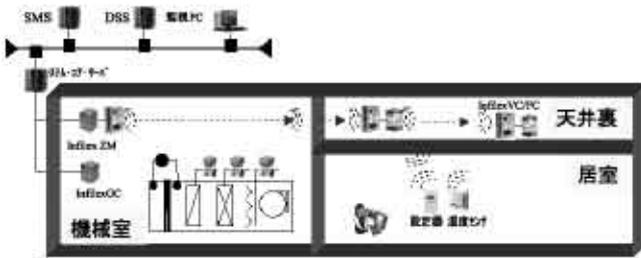


図1. システム概略図

本システムの特徴はワイヤレスアダプタと呼ばれるワイヤレス通信用アンテナモジュールを各コントローラに接続することで、コントローラ通信やセンサ通信がワイヤレスとなる点にある。なお、ワイヤレスアダプタの電源はコントローラから供給され、バッテリーは不要である。

### 2.1 構成機器

ワイヤレス VAV/FCU システムを構成する機器は、下記の4製品である。

- ① ZM アダプタ  
InflexZM と InflexVC/FC とのコントローラ通信をワイヤレス化するための (InflexZM 用) アダプタ。
- ② VC/FC アダプタ  
InflexZM と InflexVC/FC とのコントローラ通信及び、InflexVC/FC とセンサ/設定器とのセンサ通信をワイヤレス化するための (InflexVC/FC 用) アダプタ。
- ③ ワイヤレスネオパネルⅡ  
VAV/FCU 用のワイヤレス設定器
- ④ ワイヤレスネオセンサⅡ  
室内温度計測用のワイヤレス温度センサ



図2. ZM アダプタ, VC/FC アダプタ



図3. ワイヤレスネオパネルⅡ



図4. ワイヤレスネオセンサⅡ

### 2.2 ネットワーク構成

InflexZM を核とする空調系統毎に無線のサブネットワークを形成する構成とした。有線システムにおける各 SC-bus のネットワークを1つの無線サブネットワークとする形である。中央監視からは、有線システムと全く同一の見え方となる。

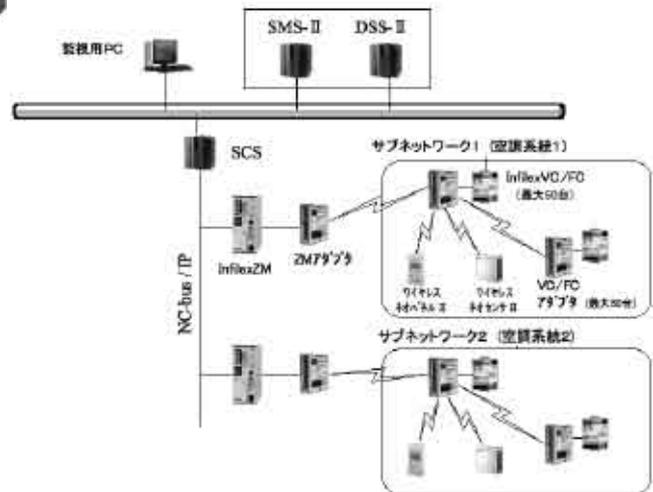


図5. ネットワーク構成

## 3. 居室内のワイヤレス通信

### 3.1 ワイヤレス通信の適用対象

ワイヤレスで接続する VAV ユニット, FCU ユニット, InflexZM は、居室内および機械室に点在している。

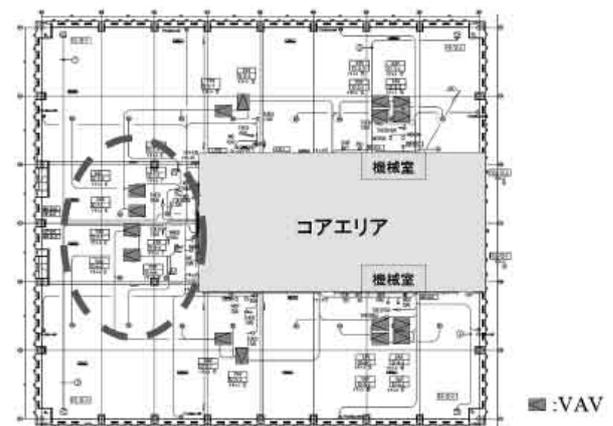


図6. フロアレイアウト例

ワイヤレス通信で用いる電波であるが、金属製の障害物があると透過せず反射するため、電波が減衰し伝送距離が短くなる。たとえば図6のようなフロアレイアウトがあった場合に、点線で囲った VAV ユニットと機械室内の InflexZM の間には、エレベータ等の金属製機器が多いコアエリアがある。直接通信させることは期待できない。

また、機械室から直線距離が数十メートル離れた場

所に VAV ユニットが設置される場合もあり、直接通信させるには遠く、伝送距離の制約から安定した通信ができないことが想定される。

こうした事情から、機械室内から、個々の VAV ユニット、FCU ユニットまでを直接ワイヤレスで通信させる方式よりも、ワイヤレスメッシュネットワーク方式がビル空調システムのワイヤレス化には適していると判断した。

### 3.2 ワイヤレスメッシュネットワーク

近年、無線のメッシュネットワークが登場してきている。ワイヤレスメッシュネットワークとは、ある通信ノードが目的の通信ノードと直接通信できない場合、バッテリーのように他の通信ノードが中継しながら通信していく通信方式である。

システム稼働後に障害物が設置されたり、中継していた通信ノードが故障したりし通信が途絶えても、迂回路に通信ルートを切り替えることで継続通信できることを特徴とする。

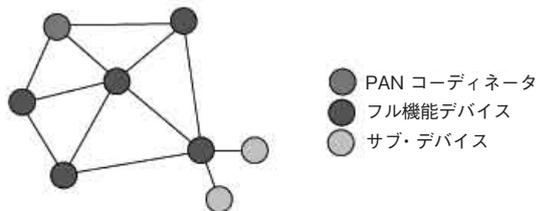


図7. ZigBee のメッシュネットワーク

ワイヤレスメッシュネットワークの1つとして、米国 ZigBee アライアンスが規格化した ZigBee がある。MAC 層以下の下位レイヤーには、Bluetooth や無線 LAN などと同じ 2.4GHz 帯を利用する IEEE 802.15.4 を用いる。通信速度は最大 250kbps という比較的低速な通信であるが、8 ビット CPU にも搭載可能な低コスト性と、電池駆動でも数年動作可能という低消費電力を訴求点として、ビルオートメーション機器や、家電のリモコンなどへの適用を狙っている。

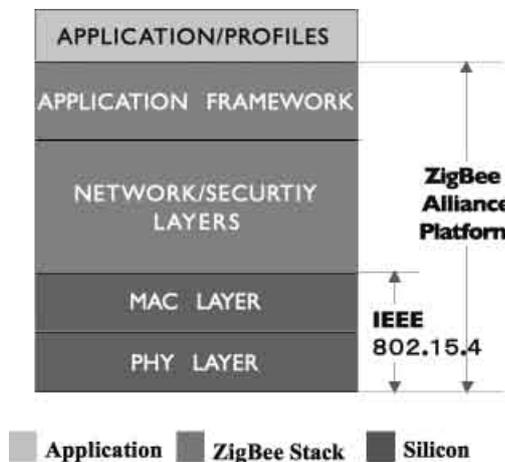


図8. ZigBee のプロトコルレイヤ構成

前述した居室内での無線通信に必要な要件を満足し、安定した通信品質を得ることを目的に、ワイヤレス VAV/FCU システムの通信方式のベースとして ZigBee を採用することとした。

## 4. 室内の電波伝搬

### 4.1 電波伝搬にとっての天井裏の状況

空間を電波が伝わっていくことによりワイヤレス通信が可能となる。電波は波動エネルギーであり、送信点と受信点を結ぶ直線上だけでなく、その直線を中心とした回転楕円体の空間(フレネルゾーンと呼ばれる)を通して伝搬していく。

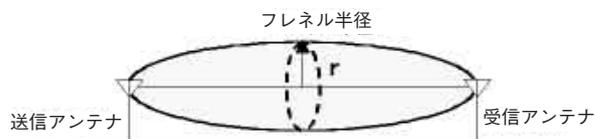


図9. フレネルゾーン

電波のエネルギーの大部分はこのフレネルゾーン内を通過して伝達されるため、その空間内に障害物があると受信電界強度が十分に得られなくなり通信エラーの発生要因となる。たとえば障害物がフレネルゾーンの半分を覆った場合には、理想的な自由空間での電波伝搬に比べ伝搬損失が 6dB 増えることとなる。一般に、十分な受信電界強度を得るためには障害物で覆われる部分が 40% 以下であることが必要だといわれている。このフレネルゾーンの大きさであるが、送信点と受信点の中間地点での最大半径(フレネル半径)は

$$\text{フレネル半径} = \frac{\sqrt{(\lambda \times D)}}{2}$$

$\lambda$ : 波長

D: 通信距離

で計算できる。

今回のワイヤレスシステムの適用対象である VAV 及び FCU であるが、居室天井裏におよそ 7~14m 間隔で設置される。仮に伝送距離が 15m だとすると、良好な通信品質を得るためには見通しがあるだけでなく、半径 68.5cm の障害物のない空間が必要となる。

伝搬距離(m)	フレネル半径(cm)
1	17.7
5	39.5
10	55.9
15	68.5
20	79.1
25	88.4
30	96.8

図10. 伝搬距離とフレネル半径

しかしオフィスの天井裏は、電波伝搬にとってはあまり好ましくない環境である。建築構造物である柱や梁は金属体であり電波にとっては障害物である上に、その間を縫うように走っている空調ダクトや排煙ダクトも金属体である。電波伝搬にとって天井裏は障害物だらけであり、安定した通信品質を確保するのが極めて難しい環境なのである。



図 11. オフィスの天井裏

#### 4.2 VC/FC アダプタの取付

コントローラ通信をワイヤレス化するための VC/FC アダプタは、VAV ユニットの外側にネジ止めを取り付ける事とした。VAV ユニットと一体化し現場に設置することで工事期間の短縮につながるからである。



図 12. VC/FC アダプタの VAV ユニット取付け

しかし VAV/FCU ユニットは金属できており、無線機器をその近くに設置することは、アンテナの指向性を乱し送信特性を著しく低下させることとなる。障害物の無い屋外であれば数 km は伝送距離が出る無線システムであっても、このような形で天井裏に設置すると、安定した通信品質を確保しようとすると十数 m 程度の距離でしか出なくなってしまう。

#### 4.3 マルチパスフェージングの発生

屋内環境は電波伝搬にとっては過酷な環境である。マルチパスフェージングという現象が発生するためである。

天井裏の梁やダクト、室内のキャビネットやロッカー等の金属製什器といった障害物に加え、天井や床自体にデッキプレートと呼ばれる金属板が使われている。

電波は金属体にぶつかると透過せずに反射する。送信機から受信機まで、電波は様々な経路（マルチパス）

を通して伝わっていく。

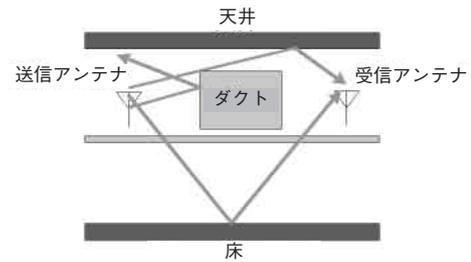


図 13. 居室内のマルチパス

反射なしに伝わる直接波、1 度 2 度と反射を繰り返しながら伝わる波など様々な波がある。それらが受信機のアンテナで受信・合成されることになるが、経路長が異なるため位相差が発生しており、その合成波は振幅方向、時間軸方向で歪んでしまうことになる（フェージング）。

このマルチパスフェージングの結果、わずかに受信アンテナの位置を変えるだけで受信電界強度が大きく変化する現象が発生する。図 14 に x-y 平面上でアンテナを移動した場合の受信電力強度の測定結果を示した。位相が打ち消し合い受信電界強度が著しく減衰する地点（ヌルポイント）が発生している。このような場所無線器を設置すると、通信エラーが発生することになる。

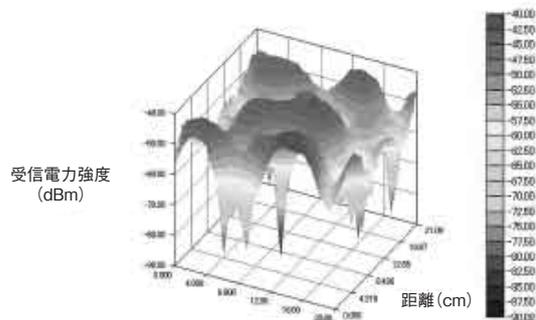


図 14. 受信電力強度の分布 (X-Y 平面)

この受信電界強度の場所による変化は、常に一定しているわけではなく時間変動している。人の動作や、キャビネットやロッカーなどの扉の開閉、換気扇等の回転などの影響を受け時間変化する。

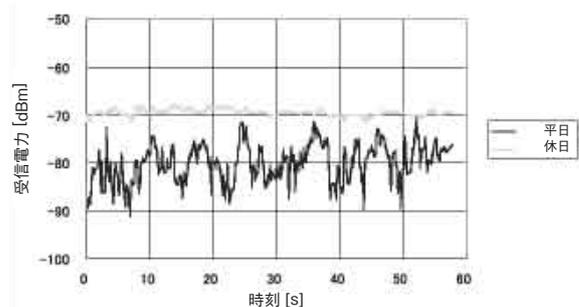


図 15. 受信電力変化の時間変化

受信電界強度の時間変化は、人の多い平日では激しく絶えず大きく変動し、人の少ない休日では比較的安定している。

## 5. メッシュダイバーシティ技術

これまで述べてきたように、ワイヤレス VAV/FCU システムを適用する居室天井裏での電波伝搬には下記の問題があった。

- 1 天井裏障害物による受信電界強度の低下
- 2 VAV ユニット直付けでのアンテナ指向性の乱れによる受信電界強度の低下
- 3 マルチパスフェージングによる受信電界強度の時間変動とヌルポイントの発生

これらの問題を解決するため、メッシュネットワークと2本のアンテナを用いる空間ダイバーシティ方式を組み合わせた、メッシュダイバーシティ技術を開発した。

### 5.1 受信電界強度の改善

送信機と受信機間に見通しがいい場合、受信電界強度はレイリー分布に従うことが知られている。

アンテナを2本用意し、受信した電波の受信電界強度の強い方を採用する空間ダイバーシティを用いることで平均受信電界強度が3dB改善し、また、受信成功率99%で通信させるのに必要なフェージングマージンが17dBから10dBへと7dB改善する。

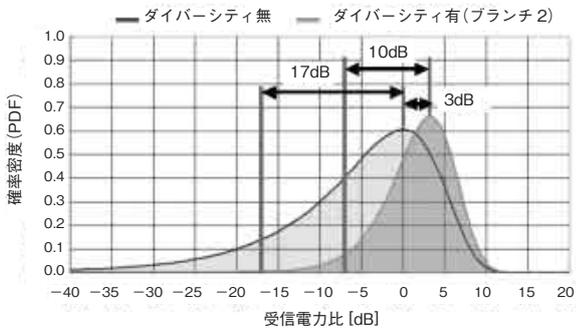
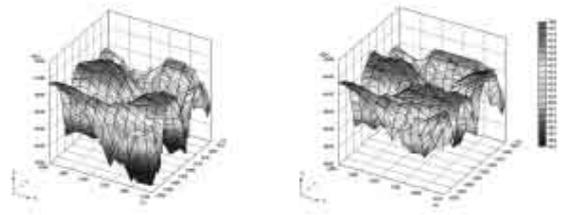


図 16. レイリー分布とダイバーシティによる改善

これより空間ダイバーシティ方式を採用することで、天井裏の通信と VAV ユニットへの取付けにより短縮した伝送距離を改善するのが有効であることが裏付けられる。

空間ダイバーシティの効果を実測データに対して適用した結果を図 17 に示した。z 軸は x-y 平面上の各地点での受信電界強度を示している。空間ダイバーシティの適用後に、受信電界強度が悪い点が改善されてほぼ無くなるのがわかる。



(a)送信ダイバーシティ無 (b)送信ダイバーシティ有  
図 17. ダイバーシティによる受信電界強度の改善

### 5.2 マルチパスフェージングの時間変動対策

ZigBee には、受信電界強度の低下等で通信品質が悪化した場合に、代替ルートへ通信ルートを切り替えるルーティング機能がある。しかし図 15 に示した様に、マルチパスフェージングによる受信電界強度は人の移動等の影響で短時間で大きく変動するため、ルートの切替えだけで対応することは難しい。

代替ルートを決定するためのルーティングテーブルの更新(ルート探索)を行うには2秒程度の時間が必要となるが、この間通信ができなくなるため、人の移動に合わせて短期間で更新し続けていくことは難しいからである。

受信電界強度の瞬時低下による通信エラーの発生を防ぐためには、ルーティング機能とは別の仕組みが必要となる。

そこで今回、人の移動等による短時間での受信電界強度の変動に対応可能な空間ダイバーシティ制御を開発しメッシュネットワークと融合させた、メッシュダイバーシティ技術を開発した。概念的には下記のような動作となる。

- ・MAC 層レベルでの通信エラーの発生を監視し、短時間で利用アンテナを切替える(ダイバーシティ機能)
- ・一定期間継続して通信エラーが解消しない場合に、ルート探索し迂回ルートに切替える(メッシュネットワーク機能)

このメッシュダイバーシティ技術によりコントローラ通信やセンサ通信をワイヤレス化した場合、安定した通信品質を保証できるのか、その検証のために数か所の商用ビルでの電波伝搬計測と、当社3事業所で長期フィールドテストを行った。その結果、居室天井裏という悪環境下でも高い通信品質を確保できることが検証できた。

## 6. 施工調整ツール

VC/FCアダプタであるが、VAVユニットやFCUユニットの外側にネジ止めされた状態で現場天井裏に設置される。目標である工事期間の短縮を実現するには、電気工事や内装工事などの他工事の進捗とは無関係に調整ができるようになっていくことが望ましい。理想を言えば、他の工事がすべて完了した後に、空調システムの調整を開始できる柔軟性があると良い。

そのためには天井板が敷設された後、天井裏に上らずに床から調整作業ができるようになっていくことが望まれる。



図 18. ワイヤレスチェッカー

こうした要望を具現化するため、下記機能を持つワイヤレスチェッカーを開発した。

### ① 天井裏の VC/FC アダプタの探索機能

ツールの周囲に存在する VC/FC アダプタを検索・表示する。工場出荷時の VC/FC アダプタは、MAC アドレスが異なるだけで人が理解できる識別情報は設定されていない。

そのためボタン操作で VC/FC アダプタのブザーや LED の鳴動 / 点灯で確認し、アドレス等の識別子を設定可能にするための機能を提供する。

### ② ワイヤレス通信パラメータ設定機能

本システムは、空調系統毎に無線のサブネットワークを形成する構成をとる。このワイヤレス通信を動作させるのに必要な、各サブネットワークを識別するための識別子 (PAN ID) や周波数チャンネル等のパラメータ設定を行う機能を持つ。

### ③ VAV/FCU コントローラのパラメータ設定機能

VC/FC アダプタに接続している InflexVC や InflexFC のパラメータ設定する機能。これにより、VAV/FCU ユニットの動作確認も可能となる。

このツールを提供することにより、天井板が敷設された後でも、ほぼ天井裏に上ることなく調整作業を行えるようになり工事期間短縮が可能となる。

## 7. おわりに

これまで述べた通り、今回開発したワイヤレス VAV/FCU システムの提供目的は、空調工事期間の大幅な短縮にある。新築ビルへの適用はもちろん、既設ビルにおいてもテナントを入居させたまま空調設備のリニューアル工事を行うことも狙っている。

既存の工事作業プロセスにとらわれず、作業プロセスを改革していくことにより、一層の工期の短縮を図っていききたい。

### <商標>

ZigBee は、ZigBee Alliance の日本における登録商標です。

Bluetooth は、ブルートゥース エスアイジー、インコーポレイテッドの日本における登録商標です。

Inflex は、株式会社 山武の商標です。

### <著者所属>

柏屋 弘	ビルシステムカンパニー 開発本部開発 1 部
	コントローラソフトウェア 2 グループ
水高 淳	ビルシステムカンパニー マーケティング本部 プロダクトマーケティング部