

全館無線LANの最適設計に関する検討

藤枝 俊輔^{1,a)}

概要：無線LANインフラは数多く運用されているが、まだ多くのインフラではAPを分散配置してスポットにサービスを提供している。無線LANの需要増加から建物全体を提供エリアとするサービスが求められているが、連続する空間のセル設計は複雑であり、ベンダーが推奨する細かなセル設計は高価である。可能な限りコストに最適化するため、サイトサーベイツールによるデータを元にセル設計を行った事例を報告する。

1. はじめに

現在、建物内においてインターネットユーザが利用するのは主に無線LANである。近年のユーザ環境はモバイル端末が主体であり、タブレット端末やスマートフォンの普及によって、その傾向はより顕著になった。有線LANポートを持たない端末が増加し、家電や周辺機器が無線LANでネットワーク接続し、ユーザデータはクラウドに存在している。このため、無線LANが利用できない場所ではユーザの活動が大きく制限される状況になっている。

こうしたユーザ環境の変化に関わらず、企業や大学における無線LANのサービスレベルは後追いになっており、有線LANのレベル遠く達していない。既に、有線LANの運用管理技術は成熟期にあり、このためネットワーク管理者の主要な業務は、適切な技術や製品の選択と、金銭や人員といった資源をネットワーク規模に合わせて適切に確保し配分することである。一方、無線LANは未だに有線LANサービスの延長線上に置かれ、消極的な意味でベストエフォートで提供される場合が多い。

無線LANでは、周辺要因がRF利用や通信性能にどのように影響するか把握困難であるため、多くのインフラが明確な設計指標ではなく、経験則やアドホックな対応によって構築されている。また、運用管理ではベンダーが提供する無線LANシステムの機能や設定のパッケージングへ依存する場合が多い。もちろん無線LANは電波という目に見えず複雑な特性を持った媒体を利用するために、設計・管理の難さがある。しかし、その設計・管理技術を速やかに体系化し、有線LANと同等の運用水準を実現する必要

がある。

有線LANの運用が成熟した過程では、実環境においてもネットワーク階層構造の各層に十分な性能と信頼性を確保してきた。その各層のうえで、ネットワーク環境を最適化し、また技術者は、複雑な障害に対してレイヤを順に追って問題を切り分けることができた。無線LANも、大規模なサービスにおいては各レイヤを適切に設計し、積み重ねて構築すべきと思われる。エンタープライズクラスの無線LANは、電波のサイトサーベイにより電波設計を行ったリトラブルシュートを行う事例が増えているが、設置基準は暫定的な目安や経験に置かれており、セル設計についてより明確な判断基準が求められる。

本論文では、無線LANインフラの設計・運用・管理の体系化を目的とし、建物内全館にうまく無線LANサービスを提供するためのセル設計について、必要な情報、指標、手法をボトムアップで議論する。本学柏キャンパス新領域環境棟の全館無線LANインフラ入れ替えを事例に検討する。

2. 対象とする無線LAN規模

無線LANインフラの規模は、端末の密度と必要なチャネル数によって4つのスケールに分類できる。

- A：1チャネルでカバーできる小規模環境（個人、自宅、店舗、小規模オフィスなど）
- B：複数チャネル必要であるが、チャネルの再利用は必要ない環境（中規模以上のオフィス、大学の講義室など）
- C：利用可能な全チャネルを利用しても端末数をカバーすることが困難な大規模高密度環境（大ホール、スタジアムなど）
- D：端末数や面積をカバーするためにチャネルの再利用が必要な環境で、壁などの遮蔽物があっても電波環境

¹ 東京大学新領域創成科学研究科
Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

^{a)} sirokuma@k.u-tokyo.ac.jp

としては連結された空間（大学の研究棟，オフィスビル，ホテル，ショッピングモールなど）

A～Dを，端末数と必要チャネル数との関係から図1に整理する．AやBは，周辺からの干渉やノイズがなければ，基本的には面積と端末数をカバーするAPを設置すればよく，構築は比較的簡単である．既存の無線LANサービスの多くは，A～B規模のインフラを需要が高いエリアにのみスポット的に配置する事例が多い．Cは狭い空間でチャネルの最利用が必要であり，アンテナの指向性等により電波の特殊な局所化が必要なケースである．本研究が対象とする無線LAN環境はスケールDである．比較的大きな建物全体のように，サービスエリアが連続しており，面積や収容端末数などの理由でチャネルの再利用が必要な環境である．

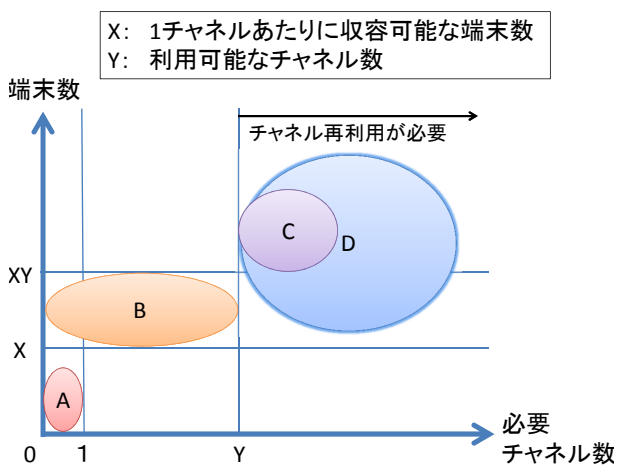


図1 無線LANインフラ規模
 Fig. 1 Scales of WLAN infrastructures

2.1 問題点

多数のAPを統合管理する既存の無線LAN管理システムは，APのチャネル選択や電波出力を自動調整し，AP間の干渉を最小限に抑える機能を備えている．これらの機能は面積に対し多数のAPを設置する場合は有効に働くと考えられるが，面積に対するAP数の比率が下がるほど干渉を回避できなくなる．AP数が少ないほどクライアントとの距離が広がり，送信電力を強くする必要があるため，電波がオーバーラップする範囲も増加する．このように，APの自動調整機能は，それが有効に働くAP密度・配置において補助的に用いるべき機能であるのに対し，そのベースとなるAPの密度・配置は不正確な経験則で行われることが多い．

また，ベンダーが提供するAPの設置ガイドラインは，1) 簡易な環境をテストケースにしており，2) コスト対効果を考慮しておらず，3) 自社製品のパラメータを前提としている場合が多い．ネットワーク管理者は，1) 建物全体をカ

バーする場合は電波環境が複雑であり，2) 予算と効果の比較が重要な判断基準であり，3) 客観的視点で製品を選択する必要があることから，システム側に余裕をもたせたガイドラインだけでは十分な助けにならない．結果として，導入されるシステムは投資が過剰になったり，構成を絞り過ぎて要求を満たせない構成になる可能性がある．

一方，電波環境のシミュレーションによりAP配置を最適化する手法も存在する．しかし，携帯電話などのセル設計と異なり，無線LANの2.4GHz帯や5GHz帯はコンクリートや金属などの遮蔽物により大きく減衰するため，実用的な計算には実際の遮蔽物に関する詳細なデータが必要になる．シミュレーションコストとのバランスから，おおまかな予備設計等に利用するのが現実的である．

3. 干渉とノイズ

議論の前提として，無線LANにおける電波干渉とノイズの影響を整理する．

無線LANが利用する周波数帯 (Radio Frequency, 以下RF) は，複数ノードが接続する半二重の共有メディアである．802.11では，DCF(Distributed Coordination Function)によりRFへのアクセスを公平化している．各ノード (APおよび端末) は，CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)により，RFの空きを確認し (Clear Channel Assessment, 以下CCA)，空いている場合のみMACフレームを送信する．ノードは，RFが利用されている場合，ランダムバックオフタイムを設定し送信を待機する．

CCAのスレシールドは，MACフレームとそれ以外のエネルギーで別に定義されている．802.11nにおいて，同一チャネル上のMACフレーム (Co-Channel Interference, 以下CCI) に対するスレシールド (以下CCIスレシールド) は-82dBm以上である [1]．図2のように，チャネル同士を離して設置しても，-82dBm以上で他方のMACのフレームが受信されると，RFは使用中と判定される．すなわち，他セルの通信によって自分が通信できる時間が減少し，遅延が生じ，スループットの低下を招く．

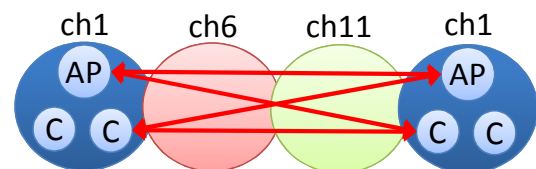


図2 同一チャネル間干渉
 Fig. 2 Co-Channel Interference

一方，エネルギー検知 (Energy Detection, 以下ED) におけるスレシールド (以下EDスレシールド) は-62dBm以上である [1]．例えば，2.4GHz帯に共存するコードレス電話，電子レンジ，オーディオトランスミッター，Bluetooth

等による電波が、ED スレシールド以上で検知されると、無線 LAN ノードは送信を待機する。こうした無線 LAN 以外の機器からの干渉は、無線 LAN 利用の観点からは除去すべきであるが、ISM バンド運用ポリシーとして、他の利用とのバランスを考慮する必要がある。MAC フレームが送信された場合も、PLCP ヘッダが読み取れなかった場合には ED スレシールドが適用されるが、ED スレシールドは CCI スレシールドより遥かに (20dB) 高いため、無線 LAN 同士の干渉は CCI スレシールドを基準に考えればよい。

本論文では、CCA スレシールド以上の MAC フレームとエネルギー、そして送信 MAC フレームの一部が受信側で破損した場合を干渉と呼ぶ。それ以外をノイズと呼ぶ。

4. 環境棟無線 LAN の設計

4.1 環境棟の特徴

事例として用いる環境棟は、2006 年 3 月に竣工した地上 7F、地下 1F の研究棟であり、延床面積約 21000 m^2 である。建築設計において、エネルギーの効率的な利用と開放的な住環境を目的に、S 字の形状による中庭の設置や、外装内装への多数のガラス利用や、7F までの吹き抜けなどが設置され、高い通風性と採光性を確保した現代的な建築物である。



図 3 環境棟外観

Fig. 3 Exterior of Kankyoutou

環境棟では、建物内部にガラス面が多く、研究室等でユーザが設置する AP が増加すると周波数帯が混雑する可能性があるため、竣工と同時に、全館をサービス対象とした無線 LAN インフラを構築した。棟内には Cisco AP1010 を 46 台設置した。AP は無線 LAN コントローラ 4404 にて集中制御しており、チャンネルおよび送信出力は Cisco の RRM(Radio Resource Management) 機能によって自動調整している。しかし、既存インフラでは十分なエリアをカバーできておらず、ユーザが自ら設置した AP が多数存在している。この無線 LAN インフラを改善し、本来の目的とする全館対応を検討する。棟内では 2F ~ 7F の内部構造がほぼ同一であり、AP は各フロアの同一箇所 (フロアに各

6 個) 設置されている。図 4 に環境棟 3F の図面を示す。丸で囲まれた数字は AP の配置を示している。



図 4 既設無線 LAN

Fig. 4 Existing WLAN infrastructure

4.2 現状調査

棟内全フロアに対し、居室を含めて無線 LAN のサイトサーベイを行った。ソフトウェアには Ekahau Site Survey[4]、サーベリアダプタは Ekahau NIC-300 を利用し、調査は 2012 年 1 月 30 日 (学期中の平日昼間) に行った。図 4 の黄色部分が無線 LAN サービス対象エリアであり、緑のラインが調査ルートである。図 5 に、測定された RSSI(Received Signal Strength Indication) の -80dBm から -50dBm の分布を示す。測定結果から一般ユーザによって持ち込まれた AP は除外している。このとき、各 AP に自動設定されていたチャンネル設定は表 1 の通りである。括弧内は送信出力 (mW) であり、括弧書きのないものは 100mW である。

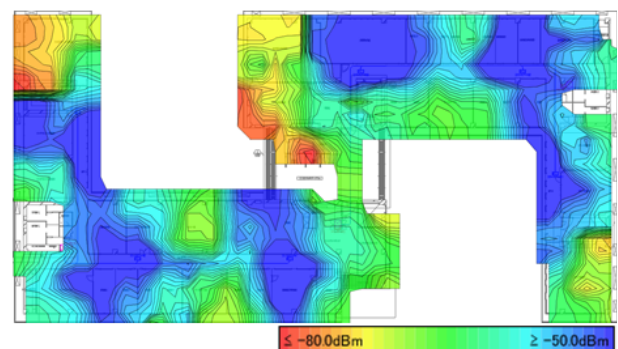


図 5 RSSI 測定値

Fig. 5 Measured RSSI

4.3 要求仕様

既存機器を 2006 年に設置した当時は、予算内でおおよそ棟全体をカバーする、といった抽象的な仕様で無線 LAN インフラを構築したため、接続エリアと通信性能に問題が生じている。システム入れ替えにおける根本的な問題として、要求仕様の不透明性があるため、図 5 のように単純に

表 1 チャンネル設定

Table 1 Channel configuration

	AP1	AP2	AP3	AP4	AP5	AP6
7F	1	6	11	6	11(50)	1
6F	6	11	1	11	1(25)	9(50)
5F	11	1	6	1	6	11
4F	1	6	11	6	11	1
3F	6	11	1	11(50)	1	6
2F	11	1	6	1	11	6(50)

RSSIを測定するだけでは、セル設計の基準が作れない。そのため、要求仕様を以下のように定義した。

- (1) 2.4GHz帯では、サービスエリア内全域において、802.11n 端末が利用可能な最高のデータレートで接続可能とする。
- (2) クライアントはノート PC、タブレット端末、スマートフォンの混在とし、802.11a/g のレガシー端末も許容する。(802.11b 端末は別途検討)
- (3) 5GHz帯は、2.4GHz帯の提供に最適化した AP 配置上で提供する。

5GHz帯ではなく、2.4GHz帯を基準とした理由は、コストバランスと、現状の端末数の割合である。

2.4GHz帯で最高通信レートを利用するには、対応する変調レートを満たす RSSI を確保する必要がある。表 2 は、802.11n が要求する最小感度である。2.4GHz帯ではチャンネル幅 20MHz での運用が現実的であるため、最高変調レートでの最小感度は -64dBm となる。空間ストリーム数 1 の場合は 72.2Mbps(MCS7)、空間ストリーム数 2 の場合は 144.4Mbps(MCS15) の通信速度になる。802.11n では送信側のビームフォーミングにより受信側の RSSI が向上する可能性があるが、ビームフォーミングは受信側からのフィードバックが必要であり、現在は未対応の 802.11n 端末が多い [2] ことから、セル設計では AP からの RSSI を 802.11n の要求通りに確保することにした。クライアントからのフィードバックを必要としないベンダー独自の類似機能 [7][8] が提供されているため、それらの効果は今後調査が必要である。

4.4 カバレッジの考察

4.3 の仕様に必要な RSSI(-64dBm) を閾値としてサーベイ結果を再検討する。図 6 は -50dBm ~ -64dBm に絞り込んだ RSSI 分布である。赤い部分が閾値以下であり、減衰が大きいコンクリートの柱と梁、そして AP 数が絶対的に少ないため、大きな不足が生じている。この部分を埋めるセル設計が必要である。

4.5 CCI と送信出力制御

3 で述べたように、セル間の CCI はパフォーマンスを低

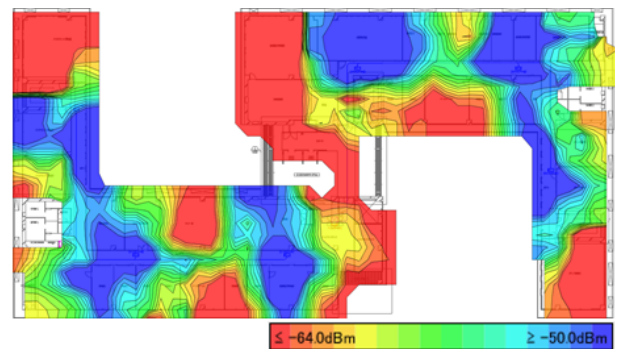


図 6 2.4GHz帯の RSSI

Fig. 6 RSSI on 2.4GHz band

下させるため、セル内には同一チャンネルを利用する他セルからの MAC フレームが、CCI スレシールド (-82dBm) 以上で届かないよう設計する必要がある。図 7 は、4F における AP2 のカバーエリア (ch6, -64dBm 以上、紫部分) と、ch6 における他の AP からの電波強度 (-82dBm ~ -50dBm, 茶色) のオーバーラップを示している。オーバーラップ部分は、他セルからの CCI によって干渉が発生していることになる。具体的な干渉源は、図 7 の赤矢印で示すように、1フロア下 (3F) の AP1 と、1フロア上 (5F) の AP3 である。

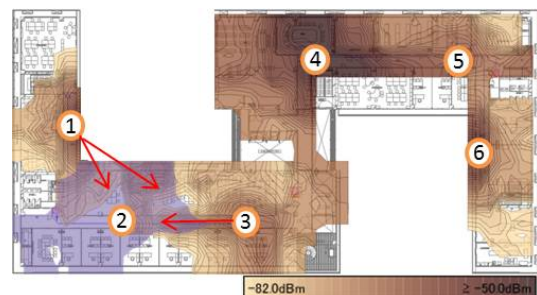


図 7 CCI が存在する範囲

Fig. 7 CCI existence area

CCI への対応には、干渉源の送信出力を弱めるのが最も簡単であり、これによって CCI を抑制できるか検討する。AP2 の出力も他セルで CCI となっている可能性が高いため、AP2 を含む周辺の全 AP の送信出力を弱めることを想定する。送信出力を半分にすると電波出力は約 3dB 低下するため、現状の送信出力 100mW と、50mW、25mW において、50mW では現状マイナス 3dB、25mW では現状マイナス 6dB で計算すれば、出力を弱めたあとの CCI 発生範囲が予測できる。その結果、図 8 に示すように、5F の AP3 からの干渉はほぼ削減できたが、3F の AP1 からの干渉が一部残ることが分かった。このため、干渉源の移動、アンテナの指向性による調整、電波の遮蔽など、他の手段との併用で対応する必要があると分かった。

4.6 SNR

リンクの品質については、エラーレートに関わる SNR

表 2 802.11n における最小感度
 Table 2 Minimum Sensitivity on 802.11n

変調	符号化率	Mimumum Sensitivity (20MHz)	Minimum Sensitivity (40MHz)	空間ストリーム 1	空間ストリーム 2	空間ストリーム 3
BPSK	1/2	-82dBm	-79dBm	MCS0	MCS8	MCS16
QPSK	1/2	-79dBm	-76dBm	MCS1	MCS9	MCS17
QPSK	3/4	-77dBm	-74dBm	MCS2	MCS10	MCS18
16-QAM	1/2	-74dBm	-71dBm	MCS3	MCS11	MCS19
16-QAM	3/4	-70dBm	-67dBm	MCS4	MCS12	MCS20
64-QAM	2/3	-66dBm	-63dBm	MCS5	MCS13	MCS21
64-QAM	3/4	-65dBm	-62dBm	MCS6	MCS14	MCS22
64-QAM	5/6	-64dBm	-61dBm	MCS7	MCS15	MCS23

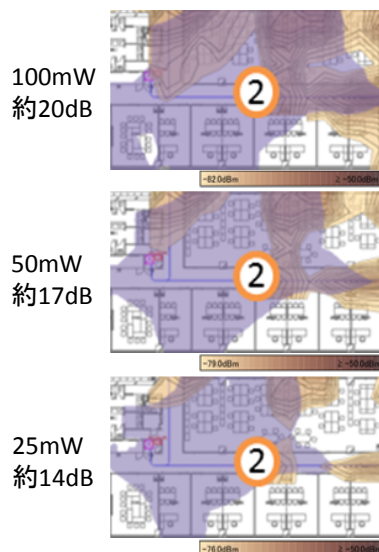


図 8 AP2 付近の CCI
 Fig. 8 CCI around AP2

が重要である。しかし、802.11n の実環境において適切な SNR については有益な情報が少ない。Cisco からは、表 3 に示す情報が推奨値 [5]、これより約 10dB 低い値が要求値 [6] として公開されているが、今回は資料の不足から基準値の設定が困難であった。図 9 に、観測した SNR における 25dB ~ 40dB の分布を示す。また、SNR の改善についても、サーベイで取得できるノイズ値は周辺からの合計であり、ピーコンを元にした RSSI 算出のように簡単には発生源を特定できないため、未対応である。AP の再設置後に AP の送信出力を弱める予定である点、ユーザが設置している AP はサービスエリア拡大後に停止する予定である点から、ノイズの低下を期待している。SNR は AP 再設置後に再調査する予定である。

なお、クライアントが複数のアンテナを持つ場合は、802.11n の MRC(Maximal Ratio Combining) によって SNR が向上する。MRC は複数本のアンテナによって受信した信号を合成して信号を強化する技術である。ただし、タブレット端末やスマートフォンにはアンテナを 1 本しか持たない SISO(Single Input Single Output) 端末が存在多

く、AP からの下り方向では MRC を期待できない [2]。

表 3 推奨される SNR
 Table 3 Recommended SNR

20MHz	最小 SNR	40MHz	最小 SNR
14.4Mbps	11dB	30Mbps	14dB
28.9Mbps	14dB	60Mbps	17dB
43.3Mbps	16dB	90Mbps	19dB
57.8Mbps	19dB	120Mbps	22dB
86.7Mbps	23dB	180Mbps	26dB
115.6Mbps	27dB	240Mbps	30dB
130Mbps	28dB	270Mbps	31dB
144.4Mbps	29dB	300Mbps	32dB

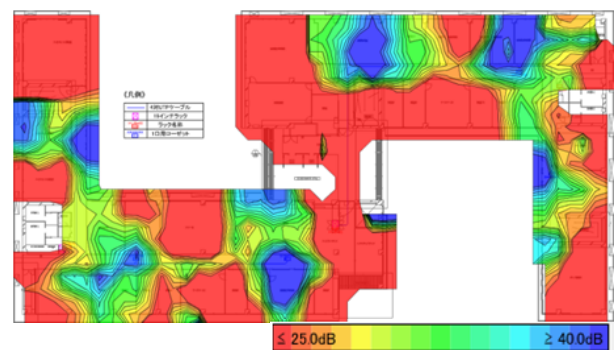


図 9 2.4GHz 帯の SNR
 Fig. 9 SNR on 2.4GHz band

4.7 検討結果

以上の検討から、必要な AP の台数と配置を設計する。まず、電波の減衰が大きい階段と WC エリアによって孤立しているエリアを単独のセルとした。図 10 の緑色部分である。このセルの AP は、他セルへの CCI を防ぐため建物の外側に配置する。それ以外のエリアでは複数のセルを並べるが、最低限の RSSI を満たすためには横方向に 3 台以上を並べる必要がある (図 10 の AP3, 4, 5, および 6, 7, 8)。これらの AP では 4.5 で述べたように、フロア間の

CCIを抑制するため50mW以下で運用する予定であり、セルの端は閾値に近いRRSIになると予想している。このセル設計による無線LANインフラの入れ替え工事を2012年度末に行う予定である。工事後のサーベイ結果については、改めて報告する。

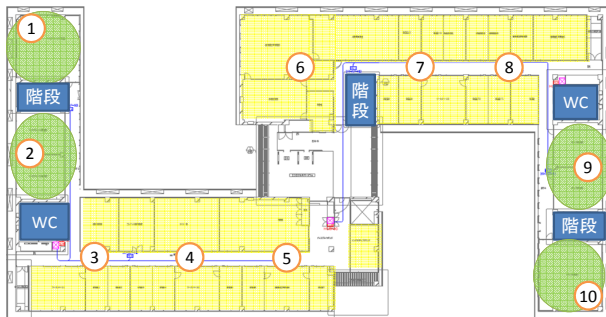


図 10 AP 設置予定図

Fig. 10 AP arrangement plan

- [6] Cisco Systems, Inc.: Managing the mobile device wave: Best Practices, 入手先 <<http://www.cisco.com/web/CA/events/pdfs/CNSF2011-Managing-The-Mobile-Device-Wave-Jim-Florwick.pdf>> (2011).
- [7] Cisco Systems, Inc.: Cisco ClientLink: 802.11n によるデバイスのパフォーマンスの最適化, 入手先 <http://www.cisco.com/web/JP/product/hs/wireless/airo1140/prodlit/white_paper.c11-516389.html> (2012.08.31).
- [8] RUCKUS WIRELESS, Inc.: BeamFlex, 入手先 <<http://www.ruckuswireless.com/technology/beamflex>> (2012.08.31).

5. まとめ

無線LANインフラは数多く導入されているが、多くのインフラは分散してAPを配置した簡易な運用を行なっている。建物全体を提供エリアとする場合はセル設計が複雑になるが、可能な限りコストに最適化してAPを設置する要求がある。本論文では、建物全館を対応とした無線LANインフラの入れ替えにおいて、サイトサーベイツールによるデータを元に、コストに最適化したAPの数量と設置箇所の検討を行った。

建物全体に対応する場合、既存の運用よりも明確な設置基準が必要であり、事例として802.11nの最小センシティブリティをそのまま利用した。また、観測したRSSIからセル間のCCIを推測し、適切な送信電力の予測を行った。孤立エリアを定義し、孤立エリアから他エリアへの電波を抑えることが問題を簡単にすることが分かった。検討したセル設計のもと、APの再設置工事を2012年度末に予定している。その結果は後日報告する。

参考文献

- [1] 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Standards, (2009)
- [2] Matthew Gast: 802.11n: A Survival Guide, O'Reilly Media (2012).
- [3] 東京大学柏キャンパス環境棟-大野秀敏+東京大学大野研究室(計画コンセプト・建築設計ディレクション) 日本設計・大成建設設計共同企業体(設計), 新建築, Vol. 81, No 11, pp.144-153,(2006)
- [4] Ekahau, Inc.: Ekahau Site Survey, 入手先 <<http://www.ekahau.com/products/ekahau-site-survey/overview.html>> (2012.09.03).
- [5] Jerome Henry: CCNP Wireless CUWSS Quick Reference, Cisco Press (2010).