

Title	データセンタにおける管理ネットワークの無線化
Author(s)	岩本, 裕真
Citation	
Issue Date	2015-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/12673">http://hdl.handle.net/10119/12673</a>
Rights	
Description	Supervisor: 篠田陽一, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

# データセンタにおける管理ネットワークの無線化

北陸先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科情報科学専攻

岩本 裕真

2015年3月

## 修士論文

# データセンタにおける管理ネットワークの無線化

指導教員 篠田陽一教授

審査委員主査 篠田陽一教授  
審査委員 丹康雄教授  
審査委員 知念賢一特任准教授

北陸先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科情報科学専攻

1210203 岩本 裕真

提出年月: 2015年2月

## 概要

情報処理リソースのホスティングやハウジングを効率よく行なう事業としてデータセンターが利用されている。データセンターは、計算機やネットワーク機器といった多くのICT機器を一括管理することに特化した施設である。この施設は、物理的に堅牢に造られており、災害に対する耐性が完備されている。また、ICT機器の効率的な動作を維持するための空調機器を備えている。これにより、データセンターは高い可用性を持ったサービス提供が可能な施設となっている。このような施設を用いる事で、複数のICT機器を集約し運用を行っている。ICT機器を、集約する事で土地や電気等のといった運用に必要不可欠なコストを削減する事が可能になる。集約する事で一定量の効率化は、可能であるがデータセンターのような多数のICT機器を管理する事は、未だに簡易な問題とは言えない。

データセンターの運用コストを削減するため、機器間を接続するための有線配線に着目した。データセンターのICT機器には、全て有線配線が接続されており機器によって複数の物理配線が必要である。これらを配線するための初期のコストは大きく多くの人件費が必要になる。それに付随して人為的な作業には、ヒューマンエラー(人為的過失)が起こる事は、防ぎきれない。また有線配線の密度が上昇すると空気の流れに影響を与え、ICT機器を適度な温度に保つための空調にも影響を与える。これらの問題は、有線配線を無線化する事で改善できる。

データセンター内のサーバ機器を無線化するには、いくつかの懸念される事項があると予想される。第一に、無線ネットワークは、有線ネットワークと比較して低帯域、高遅延である。第二に、無線アクセスポイントとラック内のノード群の物理的な距離の制約があり、ノード数も多いためアンテナの密集や複数ノードへのチャネル割当て等の問題が起きる。第三にデータセンターは、コンピュータやネットワーク機器を収容するための金属製のラックが存在する。金属製の物体は、電波に影響を与え正しく通信が行なわれない可能性が考えられる。このように密閉ラック内での無線通信は、通信にどのような影響を与えるか分かっていない。

データセンターでは、データセンター内のノードからサービスを提供するためのネットワークと、データセンター内のノードを管理するためのネットワークに分けられている。本論文では、前者をサービスネットワークと定義し、後者を管理ネットワークと定義した。サービスネットワークは、顧客に対してをサービスの提供を行なうので、低遅延かつ高帯域なネットワークが求められる。それに対し管理ネットワークは、サービスネットワークと比較して帯域や遅延に対して厳しい要求がない。そこで本研究では、帯域や遅延に対する要求が厳しくない管理ネットワークに限定して無線化を行った。その際に物理的に通信に影響を与える可能性のある、アクセスポイントの配置を明らかにするため、サーバラック内部にアクセスポイントを設置し、サーバラック内部のサーバとIEEE802.11g規格を用いた通信を行い無線通信のパフォーマンスの測定実験を行った。結果として、単一のノードに対してUDPデータグラムを送信した場合30Mbpsという管理ネットワークで用いら

れるサービスを利用するのに十分な帯域の計測結果を得られた。しかし、複数の相手を指定しUDP データグラムを送信した場合には、正しく受信できない現象が測定結果から得られた。

また、サーバラック外部から受けるノイズによる影響を及ばないようにするためと、複数のラックにアクセスポイントを展開する場合にラック内部に無線通信を収めるために、アルミ箔を用いた簡易的な電波の遮蔽実験を行った。その結果アルミ箔を用いた簡易的な電波遮蔽では、電波を完全に遮蔽する事が難しいため物理層レベルでの電波の分離は、難しいと言える。

これらの計測結果をもとに、サーバ機器を無線ネットワークからアクセスし管理ネットワークで用いられるサービスを用いるための手法として、Unwired Management Access(UMA) を提案・実装を行った。提案手法 UMA は、無線インターフェースと有線インターフェースの変換の機能を有する UMA 箱を実験ノードとアクセスポイントの間に配置する事で管理ネットワークで用いられるサービスを用いることを可能にする。管理ネットワークで用いられるサービスには、ネットワーク層レベルの通信で提供されるサービスのみではなく、データセンタリンク層レベルのサービスを有するサービスが存在するためネットワーク層による通信だけでなくデータリンク層レベルの通信が可能でなければならない。提案手法 UMA は、L2TPv3 を用いる事でデータリンク層レベルのサービスを提供している。これにより、サーバ機器に対して無線ネットワークを介して管理ネットワークで用いられるサービスを利用する事が可能になった。

提案システムを用いることにより、管理ネットワークで用いるための有線配線が無線化できる。データセンタのような多数のノードを有する場合、1 ノードにつき 1 本の有線の削減は、の大幅な有線の削減になる。それによりデータセンタにおける機器管理の繁雑さを解消し、より効率的に管理することが可能となる。

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	関連研究および関連技術	3
2.1	基本的なデータセンタの構成	3
2.1.1	サービスネットワーク	5
2.1.2	管理ネットワーク	5
2.2	データセンタの無線化の有用性	5
2.3	関連研究	6
第3章	データセンタの管理ネットワークへの要求分析	8
3.1	構築・運用コストの削減	8
3.2	管理ネットワークで用いられるサービス	9
3.3	管理ネットワークで要求されるスループット	10
3.4	管理ネットワークに求められる信頼性	10
3.5	要求される遅延特性	11
第4章	サーバラック内ノードの無線化	13
4.1	データセンタを無線化するうえで懸念される事項	13
4.1.1	有線と無線のスループットと遅延の差異	13
4.1.2	ラック素材と形状	14
4.1.3	APとラック内サーバ間の距離	14
第5章	物理層レベルの設計と実験	15
5.1	データセンタにおけるサーバラック内の物理的構成	15
5.2	サーバラック内の無線通信パフォーマンス測定実験	15
5.2.1	実験環境 murubushi	16
5.2.2	実験ノード,AP間距離による無線通信への影響	19
5.2.3	複数実験ノードからの無線通信実験	22
5.2.4	サーバラックの外部電波遮蔽実験	28

<b>第 6 章</b>	<b>データリンク層, ネットワーク層レベルの実装</b>	<b>31</b>
6.1	提案手法 UMA(Unwired Management Access) . . . . .	31
6.1.1	提案手法 UMA のシステムの要件 . . . . .	31
6.1.2	提案手法 UMA の構成 . . . . .	32
6.2	管理ツール群のサービス提供のためのアプローチ . . . . .	33
6.3	L2TP を用いた実験ノードへのアクセス手法 . . . . .	35
<b>第 7 章</b>	<b>評価と考察</b>	<b>38</b>
7.1	提案手法 UMA を用いた管理ネットワークでの管理ツール群の動作確認 . . .	38
7.2	物理構成 . . . . .	38
7.3	無線規格の高速化 . . . . .	41
7.4	データセンタへの提案手法の展開 . . . . .	41
<b>第 8 章</b>	<b>おわりに</b>	<b>42</b>

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究背景

インターネット技術の発展により、ユーザ自身の端末にデータを保持せず、遠隔地に存在するデータに対してインターネットを経由してデータを保存・処理するような場面が増加してきた。そのような技術の発展に伴いインターネット事業者のサービスの例として、データセンターを用いたサービスが登場した。データセンターとは、計算機やネットワークスイッチといったICT機器を設置する事に特化した施設である。物理的に堅牢に設計されており、地震や火事といった災害等に対しても対策がされており、厳重に入室管理が行なわれている。また、サーバやネットワーク機器の温度管理のため空調設備も備えられており24時間機器の状態を管理されている。これによってユーザは、ホスティングやハウジングと言ったようなサービス形態でデータセンターからサービスを提供することができる。

データセンター事業者は、効率的に複数のコンピュータやネットワーク機器を管理するために機器を集約し運用を行う。しかし、機器を集約したことにより、ネットワークへ接続するための有線配線が増加し機器管理が複雑化する。まず、機器に配線するための人件費が増加する。また、有線配線の数が増加する事により、機器適度な温度に保つための空調に影響を与える。そして、空間的なコストが上昇する。これにより、データセンターを管理するためのコストの上昇と人為的な配線ミスによる信頼性低下の原因となる。これらの問題は、有線配線を無線化することで、改善を行う事ができると考えられる。データセンターは、コンピュータやネットワーク機器を収容するためのスチール製のラックが存在する。密閉ラック内での無線通信は、通信にどのような影響を与えるか分かっていない。また、無線化を行うノード群の物理的な距離が近く、ノードの数も膨大であり、アンテナの密集や複数ノードへのチャネル割当て等の問題が起きる。そこで本研究では、データセンター内で無線化を行う際のアンテナの密度、最適なアクセスポイントの配置、最適なチャネルの割り当てを明らかにすることで、データセンターネットワークにおける無線ネットワークの特性を示し有用性を明らかにする。

## 1.2 研究目的

データセンタでは、効率的に複数のコンピュータやネットワーク機器を管理するために機器を集約し運用を行う。しかし、機器を集約したことにより、ネットワークへ接続するための有線配線が増加し機器管理が複雑化する。これにより、データセンタを管理するためのコストの上昇と人為的な配線ミスによる信頼性低下の原因となる。これらの問題は、有線配線を無線化することで、改善を行う事ができると考えられる。データセンタネットワークには、サービス提供を目的とするサービスネットワークと、機器を管理するための管理ネットワークが存在する。サービスネットワークでは、低遅延で高帯域の通信が求められるため無線化することは容易ではない。そこで本研究では、遅延や帯域に対する要求が厳しくない管理ネットワークの無線化を行い、データセンタにおけるネットワーク管理の簡易化と信頼性の向上を目的とする。

## 1.3 本論文の構成

2章では、本研究が対象としているデータセンタの一般的な構成と既存研究に関して紹介する。3章では、データセンタにおける要求について整理しデータセンタのコスト削減に関する条件を述べる。4章では、サーバ機器を無線化する際に懸念される事項について述べる。5章では、物理環境における無線通信への影響を明らかにする。6章では、サーバ機器の有線配線を無線化するための手法に関して述べる。7章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

## 第2章 関連研究および関連技術

本研究では、多数物理ノードが存在するデータセンタを対象にしている。データセンタの物理構成は、提供するサービスによって構成が、異なるが基本的な構成には共通部分がある。本章では、商業・学術等で利用されるデータセンタの基本的な構成について述べる。また、無線化技術をデータセンタに適応させた関連研究について述べる。

### 2.1 基本的なデータセンタの構成

データセンタは、多数のコンピュータ機器を物理的に近い場所に集めサーバラックに收容する。收容されたコンピュータ機器をネットワーク機器を用いることでコンピュータネットワークで束ねる事によりクラスタを構成する。これにより、サーバ間の連携により1つの大きな処理を複数機器にまたがり分散処理することや、巨大なデータを分散して保持すること、そして複数台のコンピュータ機器のRAMを束ねる事により、一つの巨大なRAMを持つ計算機として用いる際に利用される。つまり、複数のコンピュータ機器を一つの大きな計算リソースとして用いる事を可能にしている。このような方法をスケールアウトと言う。例としてクラウド技術として分類されるようなHaaSやIaaSと言われるようなコンピュータネットワークを経由し仮想化されたコンピュータ上のリソースを利用するようなサービスの形がある。クライアントは、インターネット上にあるコンピュータリソースを用いる事で自身の端末のコンピュータリソースを用いる事無くサービスを受けることができる。

複数のコンピュータ機器をコンピュータネットワークで接続するための手法は、事業者毎に独自性を持った構成を用いられるが一般的な構成手法が存在する。Mohammad Al-Fares[2]らは、一般的なデータセンタで用いられるトポロジは、2層から3層の階層型の構造を取り、5000～8000のホスト数まで対応していると述べている。一般的なデータセンタのトポロジの階層構造に関して図2.1に示す。これらの階層は、大きく「コアレイヤ」、 「アグリゲーションレイヤ」「エッジレイヤ」と分類する事ができる。コア層では、IPネットワークのトラフィックをレイヤ3スイッチを用いる事でインターネット等を経由した外

部ネットワークと疎通性を持たせる。アグリゲーションレイヤでは、エッジレイヤのスイッチが接続されるための統合ポイントを提供する。レイヤ3におけるルーティングリンクとレイヤ2のイーサネットブロードキャストドメイン間の接続を行っている。エッジレイヤでは、データセンタ内のサーバ機器端末を収容している。アグリゲーションレイヤのネットワークスイッチとラック内に設置されたサーバ機器群を接続する事により、レイヤ2レベルとレイヤ3レベルの疎通を可能にしている。またデータセンタでは、データセンタ内のノードからサービスを提供するためのネットワークと、データセンタ内のノードを管理するためのネットワークのネットワークセグメントが分けられている。本論文では、前者をサービスネットワークと定義し、後者を管理ネットワークと定義する。

### 2.1.1 サービスネットワーク

サービスネットワークは、データセンタ内のノード群によって構成されるサービスを提供するためのネットワークである。一般的にネットワークスイッチを管理ネットワークと物理的に分ける事で物理層レベルで異なったネットワークを構築する。それによって、他のセグメントで起きた障害の影響を受ける事がないような構成になっている。またネットワークスイッチの故障等の物理レベルで分断した構成にすることにより管理ネットワークからアクセスすることで復旧が可能になる。

サービスを提供する事業者は、顧客に対してサービスネットワークを介してサービスの提供を行なうので、低遅延かつ高帯域なネットワークが求められる。また、障害発生時に影響を最小に抑える事が望ましいのでフォールトトレランス性を重視し、障害発生時においてもフェイルオーバー処理を行う事で、高い冗長性と可用性が求められる。

### 2.1.2 管理ネットワーク

管理ネットワークは、データセンタネットワーク内のノード群やそれらを構成するスイッチ群を監視・管理するためのネットワークである。サービスネットワークと物理層レベルで異なったネットワークを構築することにより、サービスネットワークに管理ネットワークのトラフィックが混じらないように構成することにより管理ネットワークで起きた障害をサービスネットワークに影響を与えない構成を用いている。サービスネットワークと比較して帯域や遅延に対して厳しい要求がなく、一部の例外的なシステムを除き基本的に管理ネットワーク内部で大容量のファイル転送を行なわれない。よって本研究では、無線化する対象を管理ネットワークに限定する事で、サービスネットワークの品質を下げずに有線配線を減らす事が可能になる。

## 2.2 データセンタの無線化の有用性

2.1節で述べた内容から例として一般的な階層構造のトポロジーで対応しているホスト数である8000台の物理ノード数が存在する場合の物理配線の本数に関して考える。まず前提条件として、物理ノードには管理用のインターフェースとサービス提供のためのインターフェースが1つずつあり、両方を接続すると考える。また、外部のネットワークとのルーティングを担うためのコアスイッチとそれらのネットワークを分散させるためのディストリビュートスイッチと管理用ネットワークを構成するためのネットワークスイッチ

には、24 のポート数が有るとする。末端の階層に存在する 8000 台のノードがディストリビュートスイッチに対して 1 本ずつ有線配線を接続するには、334 台のディストリビュートスイッチが必要であり 8000 本の有線配線が必要である。同様に管理用ネットワークを構成するためのネットワークスイッチにおいても同様に 334 台の管理用スイッチと 8000 本の有線配線が必要となる。これらの概算は、最低限必要な物理機器と有線配線の本数であり実際に構築する際には、構成によって効率的な配線が出来ない事により機器や有線配線は、増加すると考えられる。

## 2.3 関連研究

Mirror Mirror on the Ceiling:Flexible Wireless Links for Data Centers[1] は、データセンタ内のサーバラックに対し、ビームフォーミング技術を用いて電波に指向性を持たせる事によりラック間の通信に無線通信を用いた実装を行っている。ラック間通信で用いられている通信規格は、IEEE802.11ad[7] を用いており規格上の最大転送速度は、6.8Gbps と無線規格の中でも高帯域な規格を用いている。

しかし、ラック間を無線化することが可能であっても、ラック内のノードに配線が必要であり無線通信で接続する事による有線配線の削減効果は、ノード自身を無線化することに比べ小さい。よって、無線化する事により大きな効果を得られるのは、サーバ機器からラック内に設置されたネットワークスイッチ間の方が大きいと考えられる。また、ビームフォーミング技術を用いる事により電波が指向性を持つ事で、送信機(トランスミッタ)と受信機(レシーバ)間の送受信可能性範囲である LOS(Line of Sight) を考慮に入れ物理配置の設計しなければならなければならないので、物理的な配置に関する制約が厳しく設置のためのコストが大きくなると考えられる。

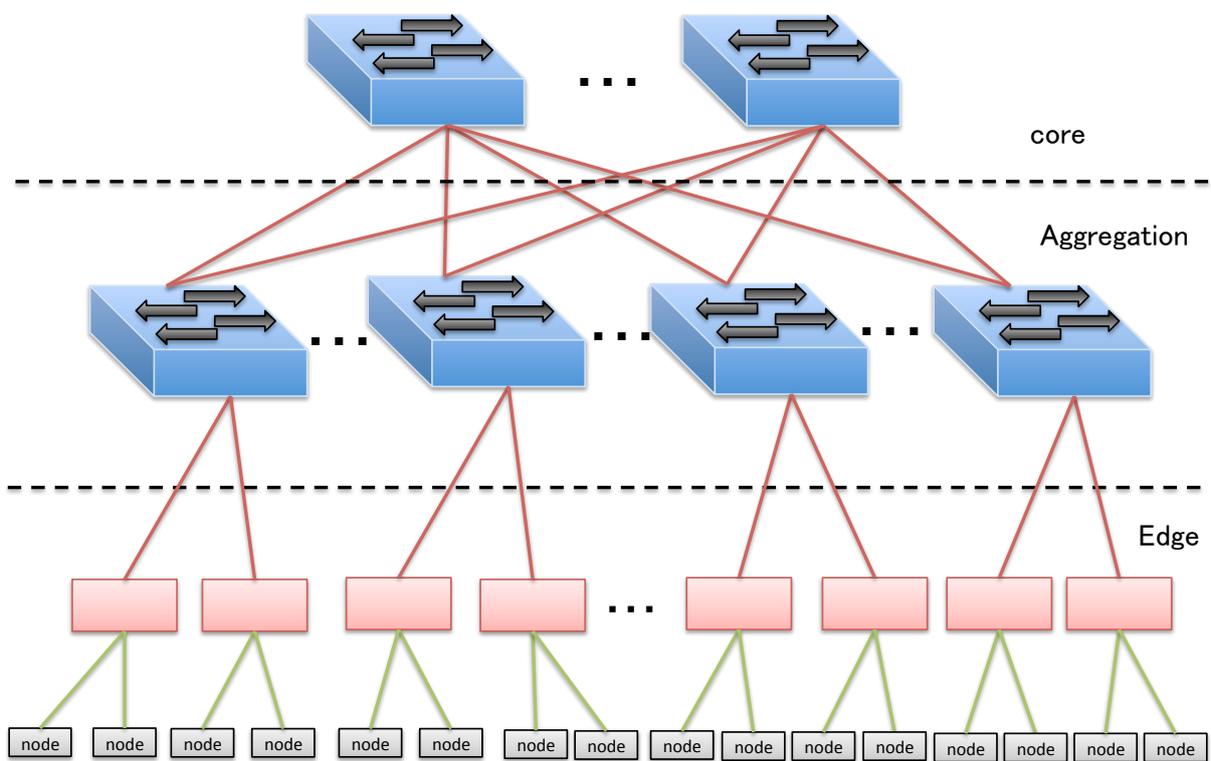


図 2.1: 一般的なデータセンタの構成

## 第3章 データセンタの管理ネットワーク への要求分析

本章では、データセンタで求められる要素に関してまとめる。また 3.2 節では、管理ネットワークで用いられるサービスをまとめる。3.3 節では、監理ネットワークに必要なスループットに関して述べる。また 3.4 節では、管理ネットワークで求められる遅延の特性について述べる。

### 3.1 構築・運用コストの削減

データセンタを構築する際に、データセンタ事業者が人件費を割かなければならない事の一つとして有線配線の配線がある。有線配線の例として、サーバ・スイッチの電源の配線、機器間をイーサネットによる通信を可能にさせるためのツイストペアケーブルが存在する。ツイストペアケーブルの本数は、どのようなポリシーに基づいて構築するかに依存するが、各ノードに管理用ネットワークのために 1 本以上必要とし、サービスネットワークのために 1 本以上必要となる。例として、ラック内に 10 台のノードが存在する場合を考える。各ノードに 1 本の管理用ネットワークのための有線配線を用いる。更にサービスネットワークに必要な有線配線が 1 本用いるとする。すると各ノードに対して 20 本の有線配線が必要となる。また、これらのネットワークを制御するためのネットワークスイッチが存在し有線配線が必要である。またサーバ機器やネットワークスイッチが故障などの原因で機器を交換しなければならないような場合、その機器に接続している配線をやり直さなければならない。これらの有線配線を減らすことができれば運用のためのコストを抑える事が可能だと考えられる。

## 3.2 管理ネットワークで用いられるサービス

ラック内のノードを管理するため管理者端末からいくつかのツールを用いる。これらのツールは、個々に特性の違いがある。本節では、これら管理ネットワークで用いられるツール群に関して述べる。

### TELNET

TELNET は、RFC854 で定義されている通信プロトコルである。ポート番号には、23番ポートが用いられており、遠隔地の端末やサーバ機器を仮想端末を用いて操作する事が可能となる。サーバとクライアント間で暗号化等処理を行わずシンプルな処理を行うので小さなリソースの環境下で動作させる事が可能である。

### Secure Shell(SSH)

SSH は、telnet 同様遠隔地に存在する端末やサーバ機器を操作するために利用されるプロトコルである。telnet では、パスワードやパケットを平文で送信してしまい、セキュリティ上脆弱である。それらの問題を解決するため公開暗号鍵を用いた暗号化を行うことで解決しているのがこのプロトコルである。

### Wake on LAN(WoL)

遠隔に存在するコンピュータの電源を投入させる仕組みである。マジックパケットを用いた制御を行っており、データリンク層レベルでブロードキャスト送信されたパケットを受信する事で電源を投入することが可能になる。

### Intelligent Platform Management Interface(IPMI)

遠隔に存在するコンピュータに対してネットワーク層レベルの通信を用いてハードウェアの状態を監視・管理を行うためのインターフェース規格である。電源の管理やファンや温度、電圧を管理することが可能である。

### 3.3 管理ネットワークで要求されるスループット

2.1.2 節で述べたように遅延や帯域に対する要求は、厳しくない。なぜならば、データセンタから提供されるサービスは、サービスネットワークで提供されており管理ネットワークは、物理層レベルで分離させることによってネットワークとしての依存関係を持つこと無く構築される。よって、管理ネットワークのスループットは、サービスネットワークの信頼性や可用性に影響を与えない。管理ネットワークで用いられる機器の管理・監視のためのサービスが動作可能なスループットを提供することができれば管理ネットワークで要求されるスループットは、満たされると考えられる。3.2 節で挙げた管理ネットワークで用いられるサービスは、大容量のデータ送信を行なわなければ、遠隔で操作するためのコマンド群を IP パケットとして送信するだけであれば比較的スループットの値が数 Mbyte/秒であっても通信は可能であると考えられる。

### 3.4 管理ネットワークに求められる信頼性

データセンタでは、システムの可用性を高める事を目的として、複数のサーバを統合しクラスタ化することでより高い可用性を得るためのシステムを構築する。このような手法を HA(High Availability) クラスタと呼ぶ。(図 3.1) HA クラスタでは、サーバ機器の接続が有効であることを監視するため、コンピュータやネットワーク機器が定期的に ICMP パケットを送信する。一定時間 ICMP パケットが受信出来なくなると、サーバ機器がシステムダウンしたとみなされフェイルオーバーの処理が行なわれる。HA クラスタの実装の例として Linux-HA プロジェクトが提供する「Heartbeat」がある。機器が一定時間応答がない場合に Heartbeat を用いた管理を行なう場合には、いくつかの段階を追ってシステムの冗長性を確保している。Heartbeat を用いた管理を行なう際には、「keepalive」「deadtime」「warntime」「initdead」の時間を設定する。まず「keepalive」は、監視対象となる機器に対して ICMP パケットを送信する間隔の時間である。「deadtime」は、監視対象のノードから ICMP レスポンスを返さなくなった際に障害と検知するまでの時間である。「warntime」は、監視対象のノードに障害が発生したことを警告するまでの時間である。「initdead」は、監視対象のノードを監視するまでの時間である。管理者は、機器に対してこれらを設定することで管理ネットワークの信頼性を保持している。

### 3.5 要求される遅延特性

3.4節で述べたように、サーバ機器の可用性を高めるための手法としてHA クラスタ技術に関して述べた。HA クラスタ技術では、keepalive で設定されている時間の間隔で ICMP パケットを送信し、deadtime で設定した時間が障害として検知される時間である。このような技術を用いる場合管理ネットワークの遅延が大きいと ICMP エコーに対する応答がサーバが正常に動作しているにもかかわらず、障害が発生していると誤検知してしまう可能性が考えられる。

また遅延が大きすぎると TCP を用いるアプリケーションを利用する場合、TCP セッションが遅延の影響でタイムアウトすることにより正常ではない通信の遮断が起こる場合が考えられる。よってサービスネットワークほどの厳しい遅延に対する要求は、無いが TCP で動作するプロトコルが正常に動作する程度の遅延は、要求されると考えられる。

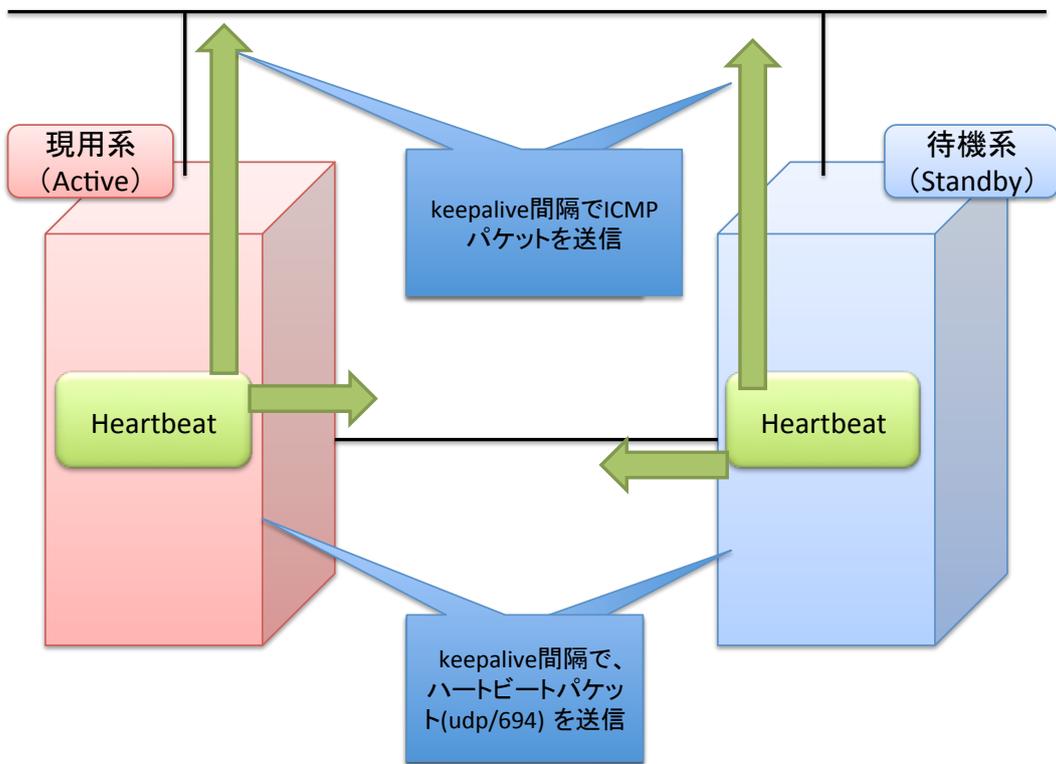


図 3.1: Heartbeat 概要

## 第4章 サーバラック内ノードの無線化

本章では、サーバラック内のノードを無線化するうえで懸念される物理的な事項に対して4.1節で述べる。また、4.2節では、4.1節で述べた懸念事項を考慮した管理ネットワークを無線化するためのシステムの設計を述べる。

### 4.1 データセンタを無線化するうえで懸念される事項

有線で行っていた通信を無線化する際には、いくつかの懸念される事項がある。その事項として、有線のネットワークと無線のネットワークのスループットの差異、対象となるデータセンタで用いられるサーバラックの形状と素材、アクセスポイントと無線化したノード間の距離が挙げられる。本節では、上記で挙げた懸念事項に関して述べる。

#### 4.1.1 有線と無線のスループットと遅延の差異

有線配線を用いた通信は、IEEE802.3でEthernet通信技術として標準化されている。現在一般的に用いられているサーバ機器のイーサネットのネットワークインターフェースに用いられる規格は、1000BASE-T規格の有線配線が主に用いられている。1000BASE-T規格では、1Gbpsのスループットを実現する事が可能であり電気信号を有線配線を用いて伝送するので、パケットの損失が起きにくく、非常に安定した通信を行なう事ができる。それに対し無線通信では、電磁波を媒体に送信機と受信機間の通信を行なう。無線通信は、外乱からのノイズによる影響を受けやすく尚且つ、有線の通信と比較として規格上の低帯域であり高遅延である。これらがデータセンタにおいて有用であるかどうか明確化されていない。

表 4.1: 無線通信規格分類表

Key Standards	Max Rate(bps)	Spectrum(GHz)
802.11	2M	2.4
802.11a	54M	5
802.11b	11M	2.4
802.11g	54M	2.4
802.11n	600M	2.4 or 5.0
802.11ac	6.93G	5
802.11ad	67G	60

#### 4.1.2 ラック素材と形状

サーバラックは、主にステンレスやアルミといった金属製の素材が使われている。これらの素材は、無線通信で用いられる電磁波が反射することにより無線通信へ影響を及ぼす可能性があると考えられる。また、サーバラックの形状には、いくつかの種類がある。側面の壁が取り付けられていない形状であるオープンラックの場合と側面・天井が完全に全体が金属で覆われているクローズドラック場合が存在する。また、クローズドラックの場合、正面の扉に関しても分類分けされる。素材がガラス製であるものや金属板にパンチ穴があいている物等様々な種類が存在する。また、ラックの形状は、EIA 規格によって規定されているがメーカーにより様々であり、無線通信が行なう事が困難なトランシーバとレシーバの配置があるとも考えられる。

#### 4.1.3 AP とラック内サーバ間の距離

ラック内のにアクセスポイントを設置する場合、アクセスポイントとノードの距離は、最も短い所でアクセスポイントの真上に置かれる事が予想される。これによりアクセスポイントとステーションの距離が近い事により強電界による電波干渉が生じると考えられる。強電界が生じると受信側は、正しく電波を受信する事が困難になり、正しく通信が行なわれない現象が生じる。

## 第5章 物理層レベルの設計と実験

3章で述べたように、本研究の提案手法では、データセンタのラック内で無線媒体を用いた通信を目的としている。しかしデータセンタのような周辺電波の環境が明らかにならず、多数の金属製のラックが縦横に並んでいるような、無線通信が想定していない環境での通信の有用性は、実証されていない。これらを明らかにしなければ、データリンク層やネットワーク層レベルで正しく通信しないと考えられる。よって本章では、5.1節でデータセンタにおけるサーバラック内の物理的な構成を述べ、5.1節では、サーバラック内で実験ノードが無線通信を行った際のパフォーマンスの測定の結果について述べる。データセンタのラック内における無線通信の有用性を明らかにし、物理レベルでの設計を行う。

### 5.1 データセンタにおけるサーバラック内の物理的構成

複数のサーバを収容するためデータセンタでは、EIAによって規定されたサイズのサーバ・サーバ用のラックを用いられる。EIA規格のサーバラックでは、幅19インチ(48.26cm)高さ1.75インチ(4.45cm)(1U)の倍数のサイズが用いられる。[6]このようなデータセンタ一般的に用いられるサーバラックが用いられている環境において無線通信が有用である事は、明確化されていない。よって次節では、サーバラック内で無線通信のパフォーマンスの実験の結果について述べる。

### 5.2 サーバラック内の無線通信パフォーマンス測定実験

本節では、データセンタで用いられる物理構成を想定し無線通信のパフォーマンス実験を行った。5.2.1節で実験環境として利用した murubushi の構成に関して述べる。また5.2.2節では、5.2.1で述べる murubushi の環境を用いて、ラック内の実験ノードに対して無線通信のインターフェースを用いた通信を行った際のパフォーマンス実験を行う。開発

用ラック A 内に設置された実験ノード 12 台に対して USB を介して無線インターフェースとして機能する機器を用いる事でノードを無線ネットワークへ接続を行った。

### 5.2.1 実験環境 murubushi

murubushi は、北陸 StarBED センターで提供されている ICT テストベッドの模倣環境である。StarBed では、1000 台を超えるノードとそれらを接続するためのネットワーク機器で成り立っているのに対し、murubushi は、北陸先端科学技術大学院大学の学内に設置されており実験用のラックが 2 台、開発用ラックが 1 台用意されている。[8] 実験用ラック A(図 5.1) には、ノード数 12 台、実験用ラック B(図 5.2) には、8 台のノードが設置されている。

#### データリンク層、ネットワーク層の構成

murubushi のノードは、2 つ以上のネットワークインターフェースを持ち、1 つのネットワークインターフェースを管理ネットワークに接続され、その他のインターフェースは、実験ネットワークに接続されている。murubushi では、管理ネットワークと実験ネットワークを管理するためのネットワークスイッチが物理的に別れており、これによってネットワークセグメントが分けている。これは、実験時に管理ネットワークのトラフィックと実験ネットワークのトラフィックが混じる事を防ぐためである。これにより、計測対象のデータのみを測定する事が可能である。また、実験ノードの管理用ネットワークで用いるためのインターフェースは、MAC アドレスに基づき、実験者がアドレスを設定する必要なく IP アドレスが割りふられている。

表 5.1: 実験ノードのスペック

Actor host	Fujitsu RX100 S6 (x20)
CPU	Xeon X3430 2.2GHz (x1)
MEM	8GB
NIC	1000BASE-T (x4)

表 5.2: 管理用ノードのスペック

Management host	Fujitsu RX200 S6 (x2)
CPU	Xeon E5504 2GHz (x2)
MEM	8GB
NIC	1000BASE-T (x4)

表 5.3: murubushi 内部の管理用スイッチのスペック

Management Network Switch	Dlink DGS-3450(x1)
Network Interface	1000BASE-T (x48)



図 5.1: 実験用ラック A



図 5.2: 実験用ラック B

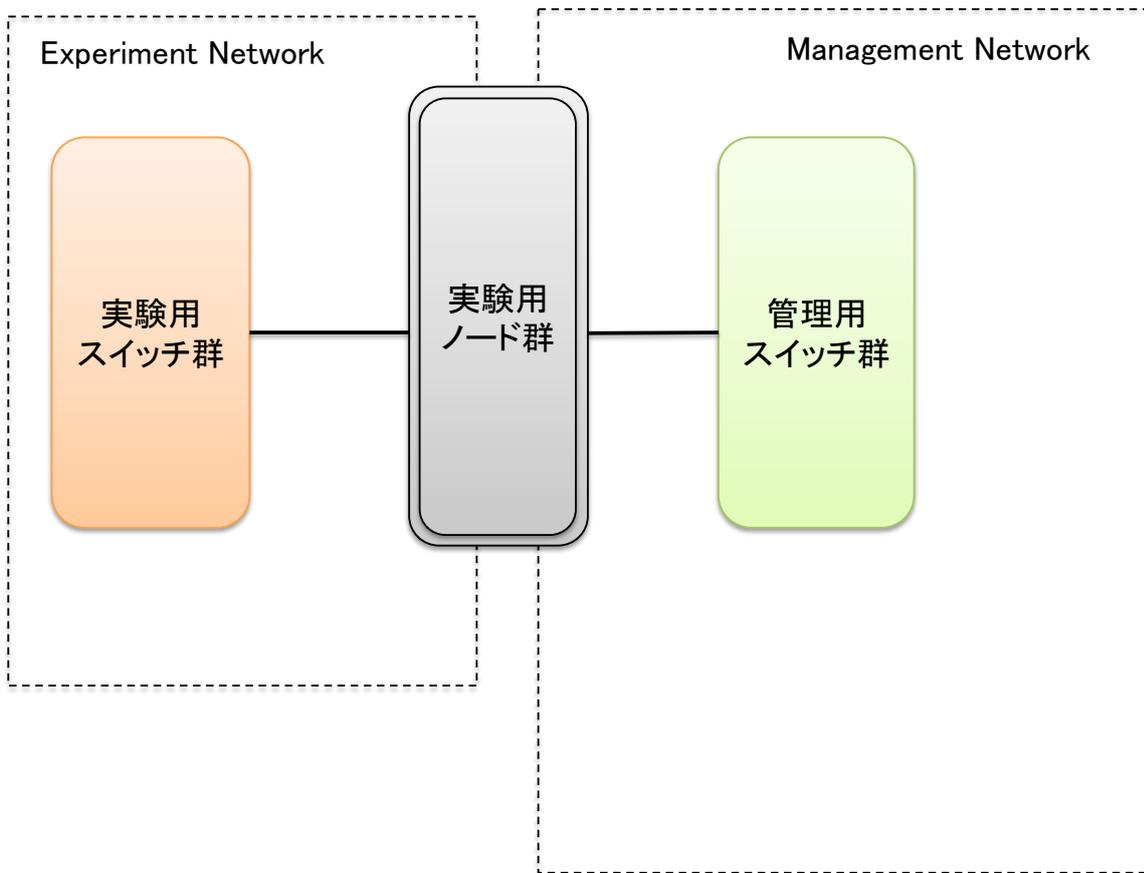


図 5.3: murubushi のデータリンク層レベルの概念図

## 5.2.2 実験ノード,AP 間距離による無線通信への影響

物理層レベルでの無線通信への影響を明らかにするため murubushi 環境の実験ラック内にアクセスポイントを設置し、実験ノードに対して無線通信を行うためのインターフェースを用いて、スループットの測定を行った。アクセスポイントは、Buffalo WZR-600DHP を用い、アクセスポイント内部の OS には DD-WRT v24-sp2 を用いた。無線通信の通信規格には、IEEE802.11g を用いた。これらを表 5.3, 表 5.4 にまとめる。実験ラック内のアクセスポイントの配置は、実験ノードに設置された無線インターフェースに対して同一直線上縦一列に配置した。(図 5.4) 測定手法は、スループット測定ツールである iperf を用いた。計測内容は、54Mbps の UDP トラフィックを 10 秒間送信する試行を 10 回行った。

計測用のノードには実験ラック B 内の実験ノードを用いた。クローズドラックの計測結果を図 5.6、オープンラックの計測結果を図 5.7 に示す。計測結果の考察としてオープンラックのグラフとクローズドラックのグラフの両方でアクセスポイントから物理的な距離が近い点で、急激に帯域幅が下がる事が確認できる。この理由として、アクセスポイントと実験ノード間の距離が近いことによって強電界が生じているのではないかと予想される。また、オープンラックでスループットの値にばらつきがある部分は、外部電波の影響を受け AGC ( Automatic Gain Contoroller ) が機能しきれず、RSSI と関連のある結果がでていないのかと考えられる。またオープンラックとクローズドラックの両方で、低い帯域幅でも 19Mbps の実行帯域が計測されており、容量の大きいファイル転送を行わなければならない十分に管理ネットワークで用いる事ができると考えられる。

表 5.4: 実験ノードのスペック

exp-node	
型番	Fujitsu RX100 S6 (x20)
CPU	Xeon X3430 2.2GHz (x1)
MEM	8GB
NIC	1000BASE-T (x4)
OS	Ubuntu 14.04.1LTS
ドライバ	rt2800USB
無線子機	Logitec LAN-W150NU2HT

表 5.5: アクセスポイントのスペック

AP	
型番	Buffalo WZR-600DHP
準拠規格	IEEE802.11g
周波数帯域	2.4GHz
OS	DD-WRT v24-sp2

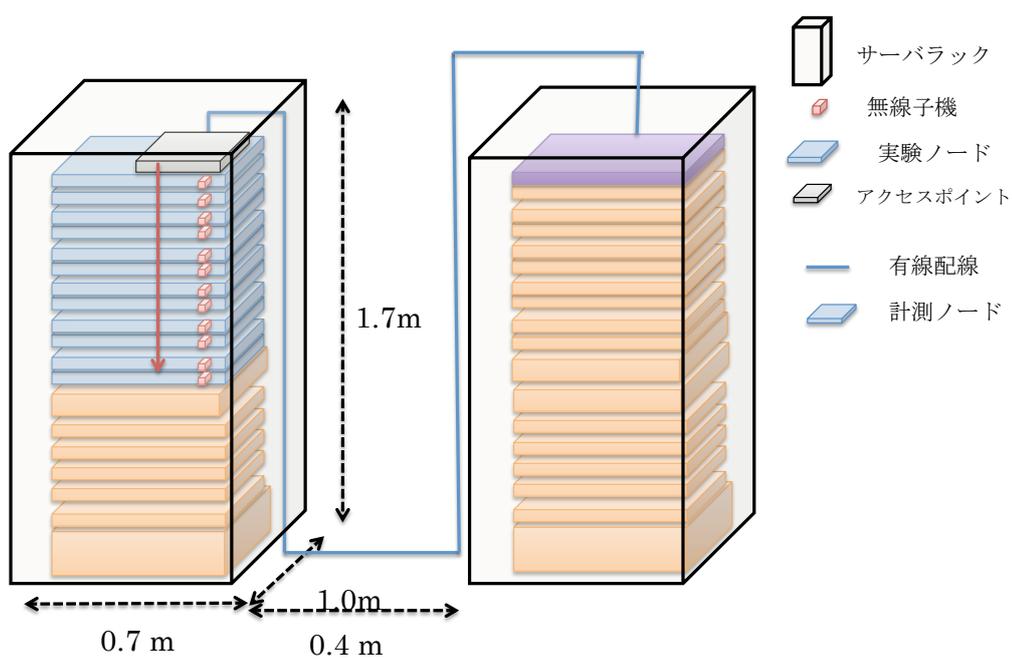


図 5.4: 実験環境 murubushi の実体配線図

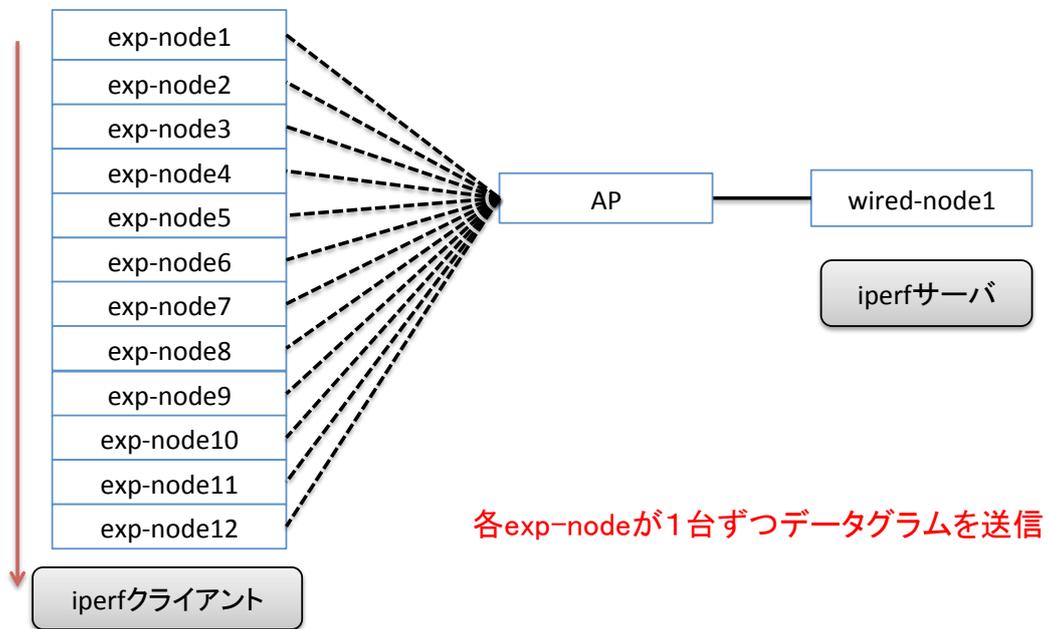


図 5.5: 実験環境 murubushi のラック

### 5.2.3 複数実験ノードからの無線通信実験

5.2.2では、単一の実験ノードが無線ネットワークを経由して通信する場合に関する場合の計測を行った。これに加えコンピュータネットワークにおいて複数のノードから同時にデータを送受信するような状況が考えられる。

よって本節では、実験ノード群のノードから無線ネットワークを経由しデータグラムを計測用ノードに対して送信した際の帯域の計測を行った。(図 5.10) 実験方法は、5.2.2 節同様に帯域測定ツールである iperf を用いて計測を行った。計測の方法は、実験ノード数を1台ずつ増加させていき、実験ノード数で場合分けを行い計測を行った。下記に計測方法の手順を示す。

1. 2 台の exp-node から 54Mbps のデータグラムを wired-node1 に対して送信
2. 3 台の exp-node から 54Mbps のデータグラムを wired-node1 に対して送信
3. 4 台の exp-node から 54Mbps のデータグラムを wired-node1 に対して送信
4. 5 台の exp-node から 54Mbps のデータグラムを wired-node1 に対して送信
5. 6 台の exp-node から 54Mbps のデータグラムを wired-node1 に対して送信
6. 7 台の exp-node から 54Mbps のデータグラムを wired-node1 に対して送信
7. 8 台の exp-node から 54Mbps のデータグラムを wired-node1 に対して送信
8. 9 台の exp-node から 54Mbps のデータグラムを wired-node1 に対して送信
9. 10 台の exp-node から 54Mbps のデータグラムを wired-node1 に対して送信
10. 11 台の exp-node から 54Mbps のデータグラムを wired-node1 に対して送信
11. 12 台の exp-node から 54Mbps のデータグラムを wired-node1 に対して送信

各台数のデータグラムを 10 秒間送信し続ける試行を 10 回行った。

この手順で計測した結果を図 5.1.1 に示す。図 5.11 は、上記で示した実験方法からノード数の数を横軸に取り、各ノードの実行帯域を足し合わせた値が縦軸である。実験結果として単一の実験ノードによる実行帯域と比較して 2 台目から大きく減少した事が分かる。また 4 台目以上同時に接続した際には、各ノードの実行帯域が 1Mbps を下回る結果が得られた。同時接続するノード数が増加するとパケット損失が発生し正しく UDP データグラムが送信できていない。この理由として、複数の実験ノードから IEEE802.11g 規格の最大通信帯域の値のデータグラムを送信しており、アクセスポイントが処理しきれずデータグラムを損失していると考えられる。

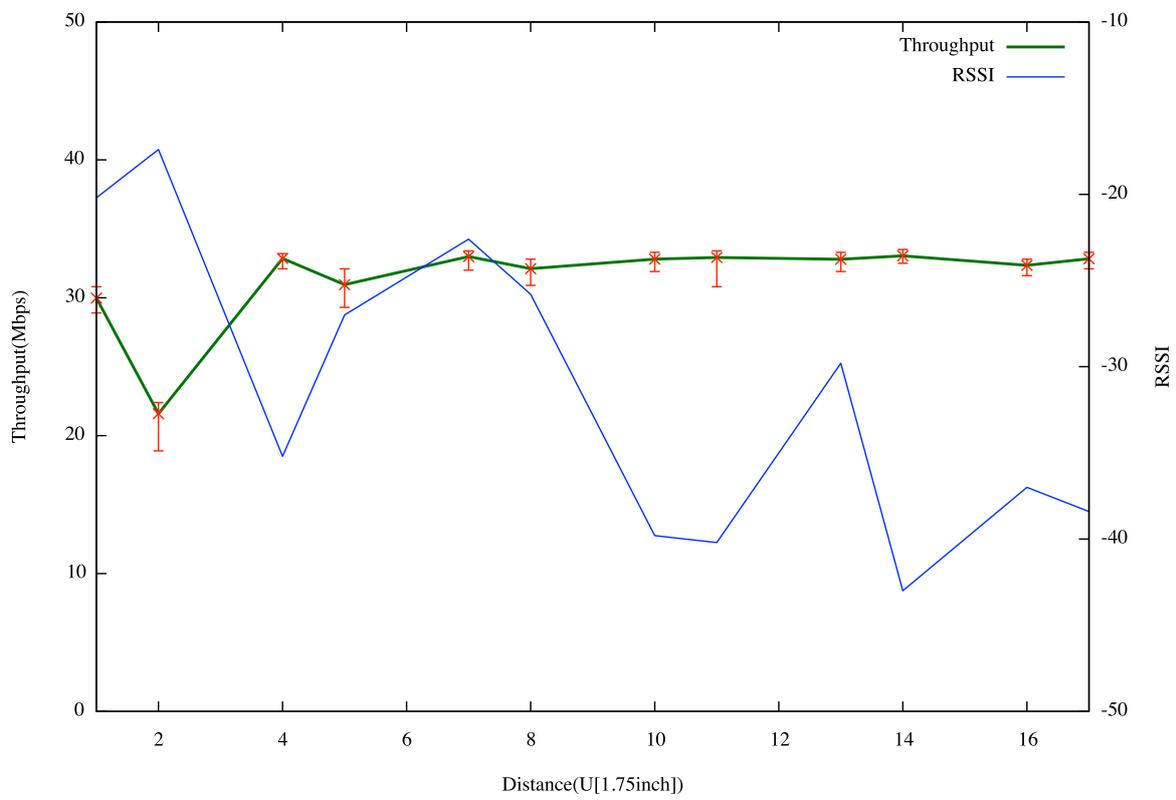


図 5.6: クローズドラックの計測結果

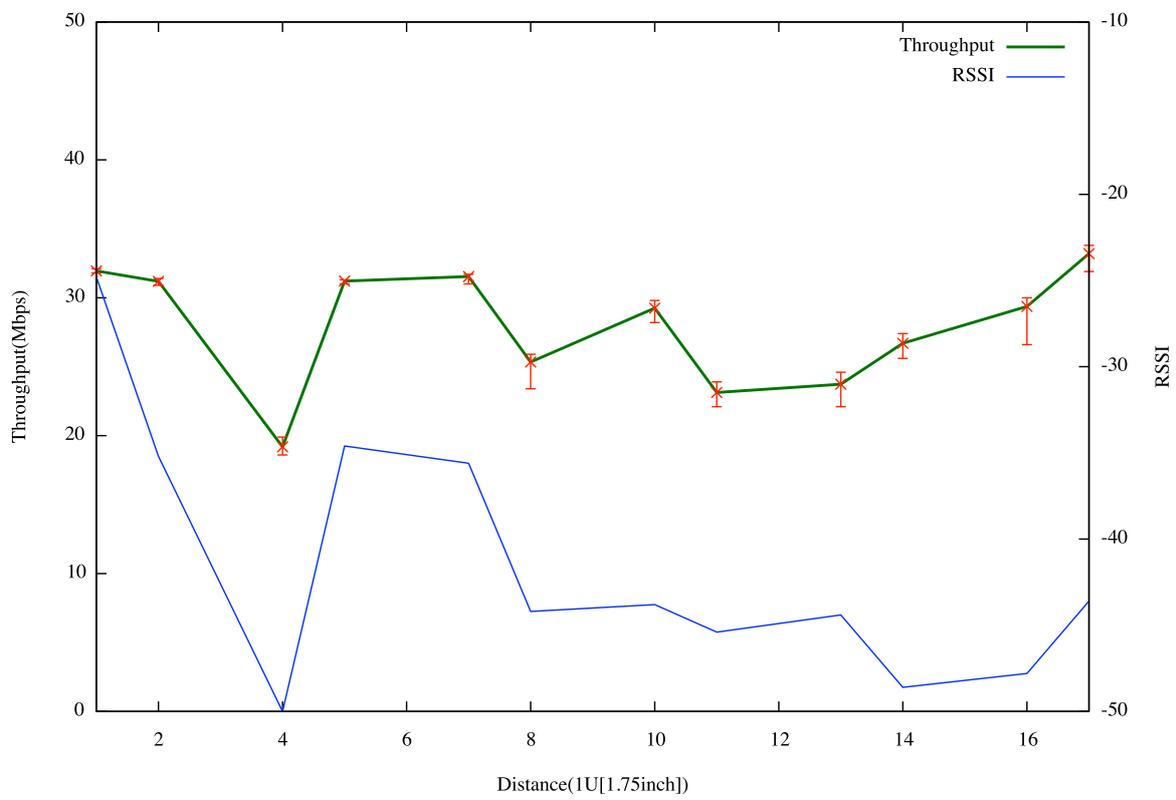


図 5.7: オープンラックの計測結果



図 5.8: オープンラック

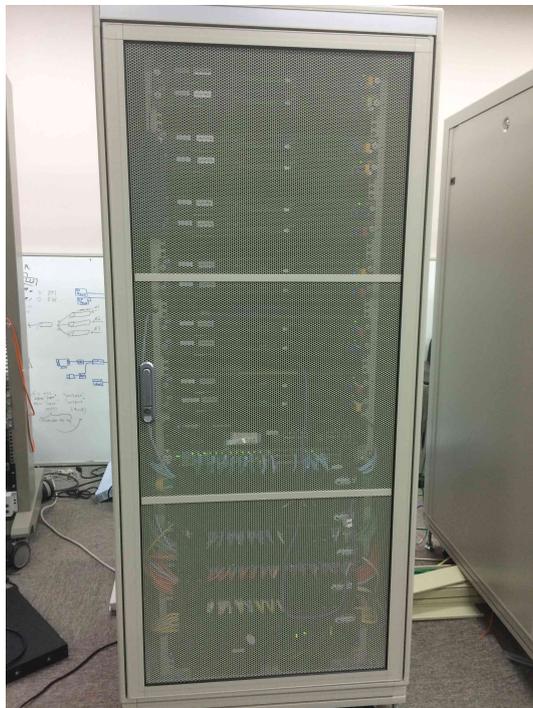


図 5.9: クローズドラック

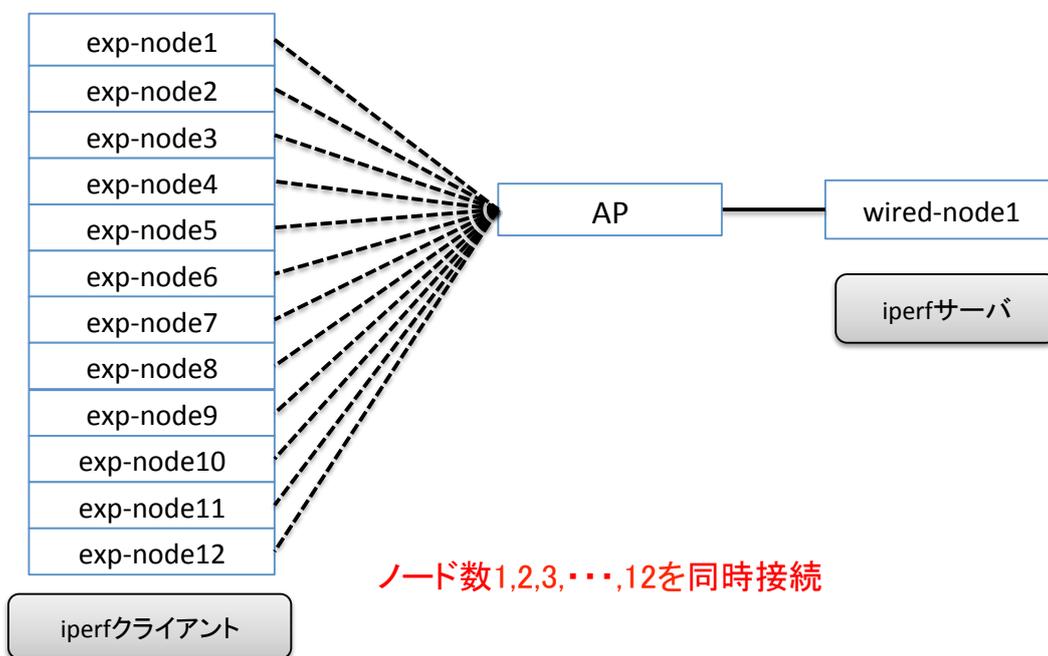


図 5.10: 複数台接続

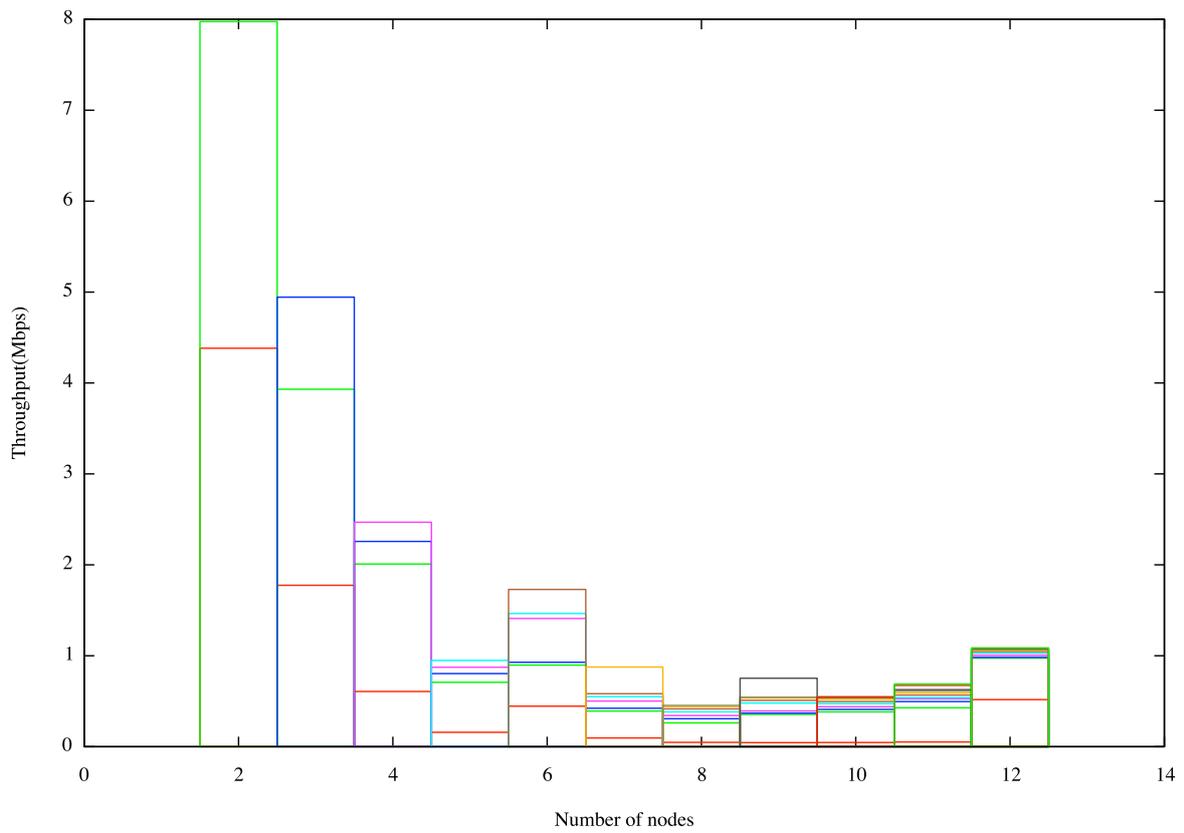


図 5.11: 複数ノードの同時接続による帯域測定結果

## 5.2.4 サーバラックの外部電波遮蔽実験

5.2.2では、サーバラックの正面、背面、側面の壁取り付け付けたクローズドラックの場合と、正面、背面、側面の壁取り外した場合したオープンラックの場合の2通りの実験を行った。オープンラックとクローズドラックの両方において、30Mbps/secに近い帯域値を計測結果が得られた。これは、管理ネットワークで用いるには十分な実行帯域だと考えられる。データセンタのような多数のラックが並ぶ環境において無線化を行なうには、どのようにアクセスポイントを配置するかという事を考えなければならない。ラック間の距離は、しかし、クローズドラックの場合においても、外部電波完全に遮蔽しラック毎にアクセスポイントを設置し物理層レベルでネットワークを分離する方法は、可能ではないという結論に至った。よって本節では、外部電波を遮蔽するため、アルミ箔を用いてラックを覆う事で電磁波を遮蔽することで、物理的にネットワークを分離する手法に関する有用性に関して実験を行った。無線通信のパフォーマンス測定に関しては、5.2.2節と同様の測定手法を用いて行った。計測結果を図5.14に示す。

結果として、クローズドラックの測定結果同様に実行帯域が30Mbpsに近い計測結果が得られた。またクローズドラックの計測結果と比較して帯域の値にゆらぎが少なく、より安定した結果が計測されたと考えられる。これは、アルミ箔を覆うことにより、外部電波による影響を遮蔽したためクローズドラックで測定した際よりもノイズの少ない環境下で測定を行なうことが出来たからである。しかし、アルミ箔を用いた簡易的な電波の遮蔽では、ラック外から無線ネットワークにアソシエーションすることが可能である事が確認出来た。そのため、物理層レベルで無線ネットワークの分離を行なうことは、難しいと考えられる。原因として、アルミ箔を完全に覆っても僅かな隙間から電波は、漏出すると考えられる。



図 5.12: アルミ箔による電波遮蔽ラック画像 1



図 5.13: アルミ箔による電波遮蔽ラック画像 2

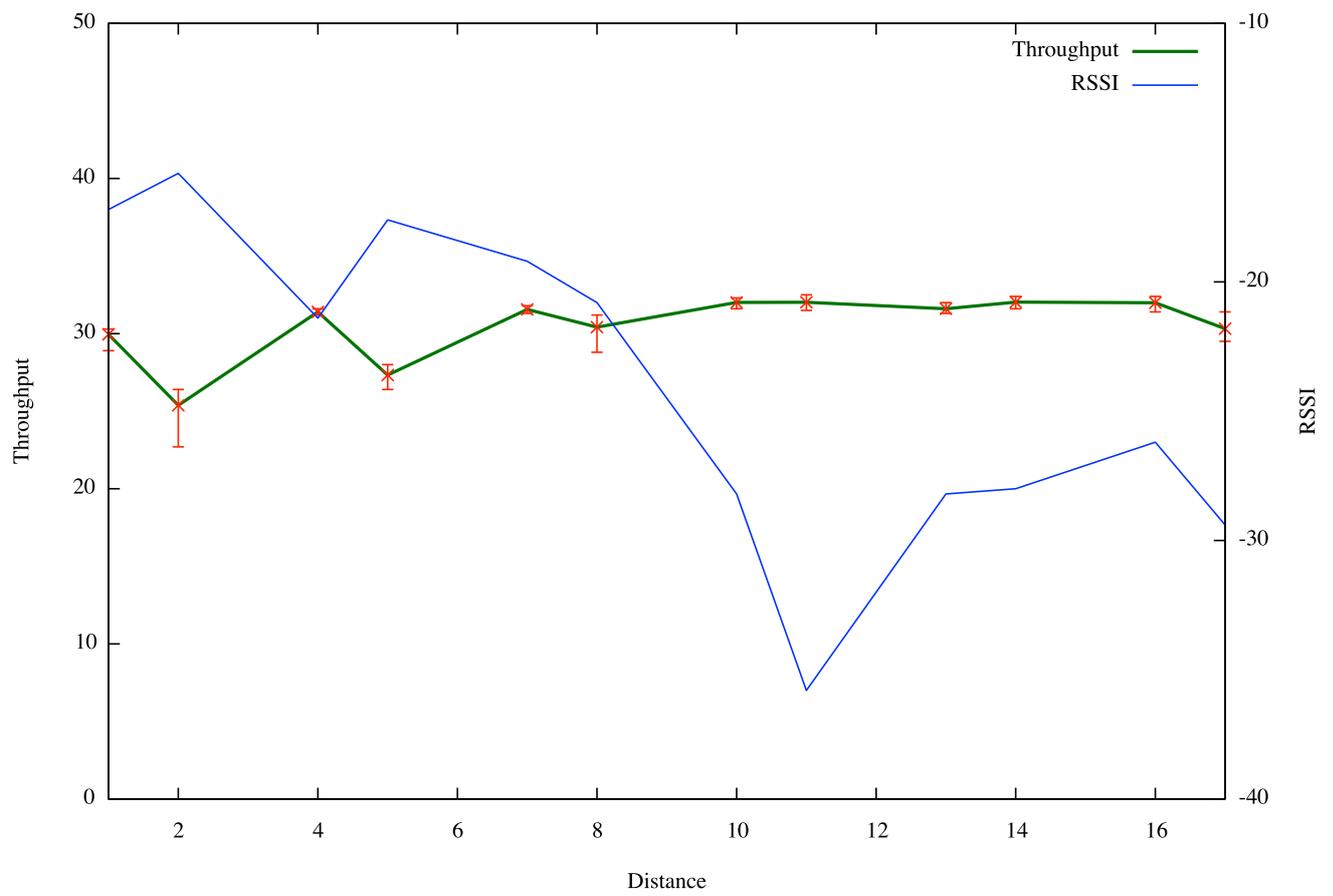


図 5.14: 電波遮蔽実験結果グラフ

## 第6章 データリンク層, ネットワーク層 レベルの実装

5章まででは、物理層レベルでラック内で無線通信を行った際のアクセスポイントと実験ノードの疎通性に関して述べた。6章では、データリンク層、ネットワーク層レベルの実装に関して述べる。まず6.1節では、無線通信を用いた実験ノードへのアクセスの手法である提案手法UMAについて述べる。次に6.2節でUMA箱の実装に関して述べる。

### 6.1 提案手法UMA(Unwired Management Access)

本研究では、3.2節で述べたデータセンタの管理ネットワークで用いられるサービスを無線通信を用いた環境においても利用する事を可能にする事を目的としている。これらを実現するため、概念実証として提案手法UMAについて述べる。提案手法UMAは、無線インターフェースと有線インターフェースの変換を行なうための端末を実験ノードとアクセスポイントの間に配置する。本研究では、有線-無線間の変換を行なう端末をUMA箱と定義する。UMA箱が管理者端末から実験ノードに対して管理ネットワークの疎通を担う事で、ラック内の実験ノードに対して無線での通信を可能にする。

#### 6.1.1 提案手法UMAのシステムの要件

本研究では、データセンタ内のサーバ群を対象にしている。データセンタ内のサーバ機器は、サービスを常に提供しなければならない事が多い。サービスネットワークで提供されているサービスが障害によって停止しネットワークの疎通性が無くなってしまいうような場合において、管理者は管理ネットワークからアクセスすることで、サービスの復旧を行なう。障害によるサービスの停止は、予測不可能であり常時管理ネットワークへのアクセスすることが可能である必要がある。また3.2節で述べたように管理ネットワークで用いられるサービスが複数存在する。SSHやTELNET,IPMIといったサービスは、ネッ

トワーク層レベルで機能する。これらのサービスを利用する際には、IP による通信が必要となる。また WoL のようなデータリンク層レベルで機能するサービスを利用するためには、同一のネットワークセグメント上でなければサービスを提供することが出来ない。よって提案手法 UMA では、データリンク層レベルで通信が可能であり、IP による通信が必要となる。

### 6.1.2 提案手法 UMA の構成

提案手法 UMA では、実験ノード Ethernet ポートに接続された UTP ケーブルを UMA 箱と接続される。UMA 箱は、アクセスポイントとアソシエーションを行うことで無線ネットワークに接続される。UMA 箱は、有線インターフェースと無線インターフェースの変換を行う事により、ノードに対して管理者端末が用いる管理ネットワークで用いられるサービスを無線ネットワークを介して用いる事が可能になる。

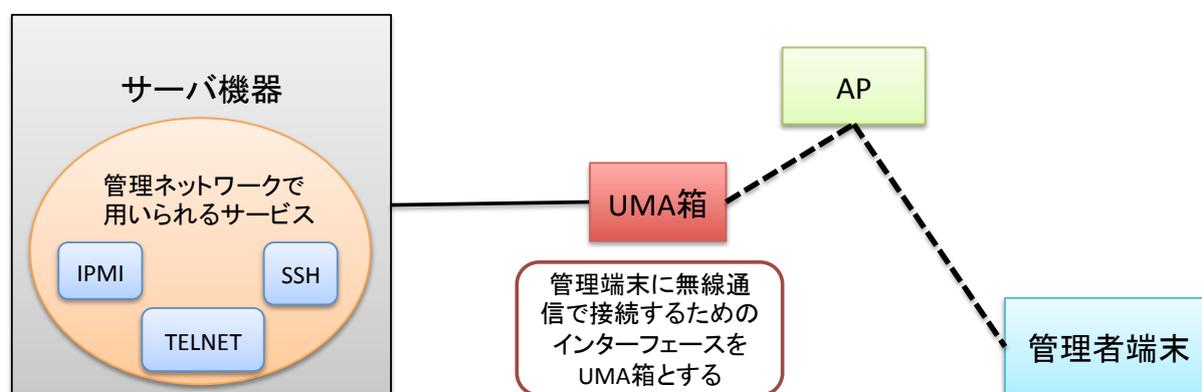


図 6.1: UMA の構成

## 6.2 管理ツール群のサービス提供のためのアプローチ

6.1.1 節で述べた用に提案手法 UMA では、有線ネットワークと無線ネットワークを交換するための UMA 箱を介して、サーバ機器に対して管理ネットワークのサービス群を用いるためには、6.1.1 節で述べたように、UMA 箱がデータリンク層レベルの情報とネットワーク層レベルでの情報を提供しなければならない。サーバ機器に対してそれらのサービスを提供するための手法は、いくつか考えられる。本章では、考えられる手法とそれらの特性について述べる。

### Bridge 接続

Bridge 接続とは、受信したパケットをメモリ上に保存した後に、アドレステーブルに保存された MAC アドレステーブルを参照し転送を行なう。この機能をもちいて、無線-有線間を MAC アドレスによる対応付けを行なうことで UMA 箱内の無線インターフェースと有線インターフェースを Bridge 接続することで、アクセスポイントの L2 セグメントを実験ノードに対して提供する事を可能にする。この手法を用いる場合、アクセスポイントにアソシエーションされた MAC アドレスと異なったアドレスと通信することになり、アクセスポイント側で転送データを落としてしまう。

### L2 レベル NAT

データリンク層レベルでイーサフレームのフィルタリング機構を用いる事でインターフェースと MAC アドレスの対応付けを行い実装する手法である。ソフトウェアの例として Linux の ebttables がある。レイヤ 2 レベルでフレームを転送するルールを作成することで、実験ノードに対してレイヤ 2 の情報を提供する。ebttables を用いてルールの作成をしフレーム転送は、可能であるがアクセスポイント側でアソシエーションを行ってきた MAC アドレスと異なる MAC アドレスと通信することになり、アクセスポイント側で転送データを落とってしまう。

### WDS

AP から出た無線 LAN の信号を WDS クライアントがリピータとして動作することによりレイヤ 2 レベルの情報を共有することができる。レイヤ 2 レベルでは、802.11 フレームヘッダに含まれるアドレス 4 と呼ばれる 6 バイトの情報を用いる事でレイヤ 2 のアクセスポイント間の通信を行っている。主にアクセスポイント間を接続するために用いられる。

## VXLAN

VXLAN は、ルータ間で VTEP ( VXLAN Tunnel End Point ) と呼ばれるトンネルを確立することで仮想マシン間をレイヤ 2 ネットワークをレイヤ 3 ネットワークを用いてオーバーレイし、UDP による接続を行う。物理ネットワーク上で VTEP により構成された論理ネットワークを「VXLAN セグメント」といい VXLAN セグメントに所属する仮想マシン間だけがお互いに通信を可能にする。

## L2TP

L2TP は、トンネリングプロトコルの一つである。RFC2661 で標準化されており、PPTP と L2F のトンネリングプロトコルの仕様を統合したプロトコルである。発信元の VPN 機器である PAC(PPTP Access Concentrator) が受信側の VPN 機器である PNS(PPTP Network Server) との間でセッション及びトンネルを確立する。それによって、データリンク層レベルの情報をネットワーク層レベルのデータにカプセル化を行う事で送受信を行うことでデータリンク層の情報のやりとりを行う。(図 6.2)

これらの手法は、ネットワーク層にカプセル化を行う事によるオーバーレイ手法とデータリンク層をオーバーレイせずに共有する手法の 2 つに分類する事ができる。これらの分類を図 6.3 に表す。

### 6.3 L2TP を用いた実験ノードへのアクセス手法

6.2 節では、提案手法 UMA における無線 - 有線間の変換を行うための構成技術に関して述べた。それらの特性をふまえ本研究では、概念実証のため L2TP を用いた。UMA 箱の実装には、小型 PC 端末である Raspberry Pi を用いた。Raspberry Pi のスペックを表 6.1 に示す。また Raspberry Pi を無線通信させるための方法として、5 章で用いた USB 接続可能な無線子機である Logitech LAN-W150NU2HT を用いた。管理者が、実験ノードに対してアクセスするためには、6.1.1 節で述べたようにいくつか保証しなければならない要求がある。管理者端末と実験ノード間においてデータリンク層レベルの情報を共有する事が前提となる。L2TP を用いた実体配線図を 6.3 に示す。L2TP トンネルを構築するためには、L2TP Access Contrator(LAC) と L2TP Network Server(LNS) との間 VPN トンネルを構築する。それによって、トンネルセッションを確立する事で双方向通信が可能になる。そのため無線通信を経由した L2TP サーバを両端に設置する事で L2TP のサービスを確立する。そして L2TP サーバの配下に管理者端末と実験ノードを設置した。

L2TP トンネル内で実験ノードと管理者の端末間でデータリンク層レベルの情報を共有するため両端の L2TP サーバ内のイーサネットインターフェースと L2TP インターフェースをブリッジインターフェースとして用いる事によりデータリンク層の通信を担保している。(図 6.5)

表 6.1: raspberry pi のスペック

型番	Raspberry Pi Model-B
CPU	ARM1176JZF-S 700MHz
メモリ	256MB
OS	RASBIAN
USB	USB2.0 × 2PORT
NIC	10/100Mbps

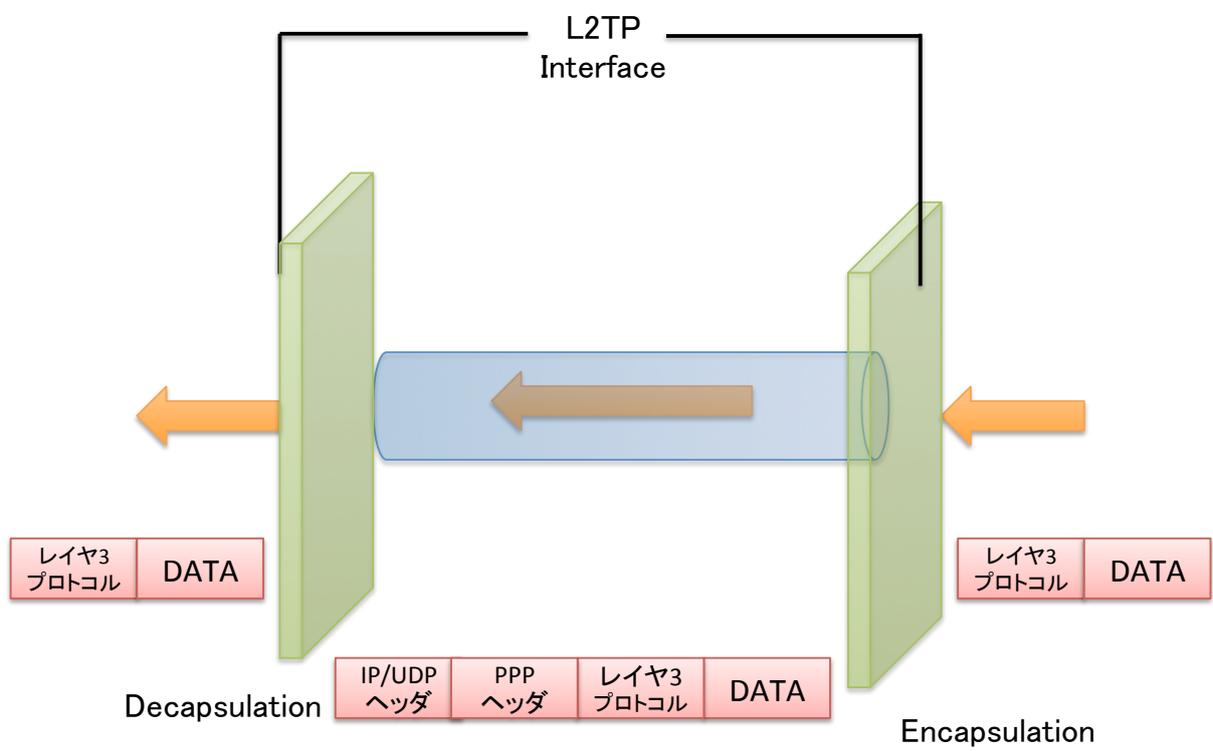


図 6.2: L2TP の概要図

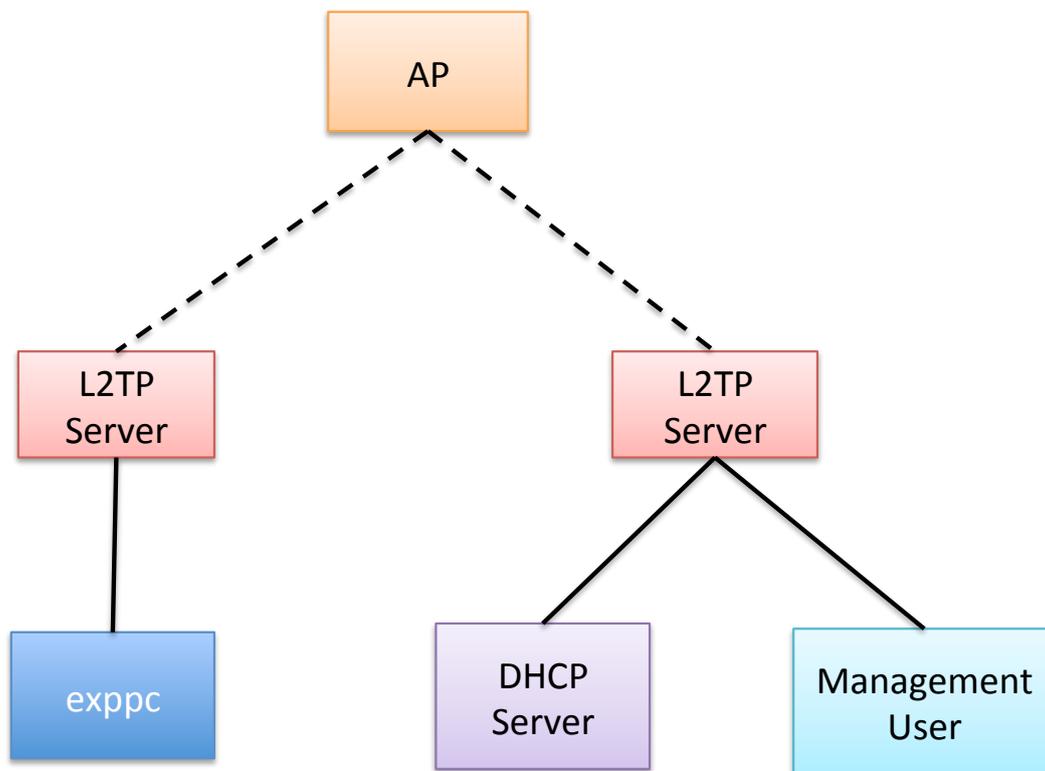


図 6.3: 提案手法 UMA において L2TP を用いた際の実体配線図

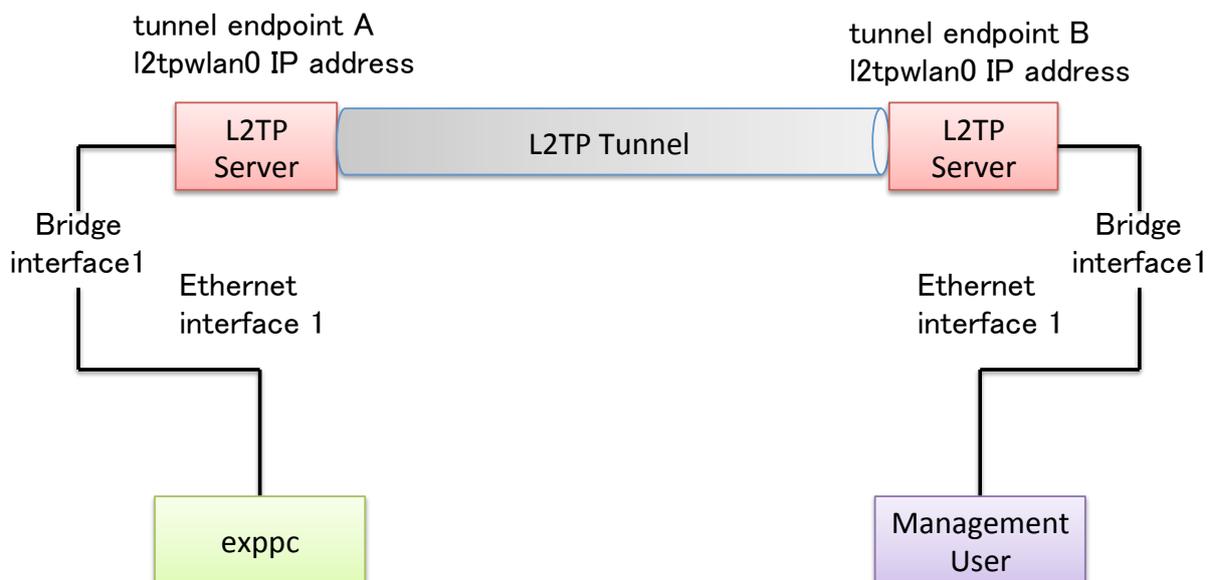


図 6.4: L2TP による UMA の設計

## 第7章 評価と考察

### 7.1 提案手法 UMA を用いた管理ネットワークでの管理ツール群の動作確認

提案システム UMA の有用性を示すため 3.2 節で定義した管理ネットワークで用いられるサービス群が正常に動作するかの確認を行った。まず、リモートホストを操作するためのプロトコルである TELNET や SSH の疎通性の確認を行った。これら両方とも正常にコマンド実行することが出来た。IPMI に関しては、計測用ノードから実験ノードに対して ipmitools を用いて実験ノードの電源投入が可能であることを確認した。WoL の動作確認には、計測用ノードから ethrtools コマンドを用いる事で WoL で用いられるマジックパケットを送信し、実験ノード側で tcpdump コマンドを用いる事でパケットキャプチャを行なう事で確認を行った。

結果として L2TP を用いた提案手法の概念実装を用いることで、無線通信上で管理ネットワークで用いられるサービス群を利用する事が可能となった。

### 7.2 物理構成

本研究の提案手法手法である UMA では、各ラックにアクセスポイントを設置することで管理ネットワークの無線化を行った。よって管理ネットワークを構成するためのスイッチを設置する代わりにアクセスポイントを設置することで、ラック内の配線に起因するコストを削減することが出来た。しかし、各ラックにアクセスポイントを設置するには、ラックの数だけアクセスポイントを設置する必要がある。無線ネットワークは、電波が届く範囲であれば配置による制約にとらわれず通信を行う事が可能になる。そのため一つのアクセスポイントで複数のラック内のサーバ機器に対して無線通信が可能になれば大幅なアクセスポイントの数を削減することができると考えられる。そのため、隣り合ったラック間のチャンネル分割の検証を行い、データセンタのような電波的なノイズが多い環境で

ノード同士が通信可能な状態を明確化しなければならないと考えている。

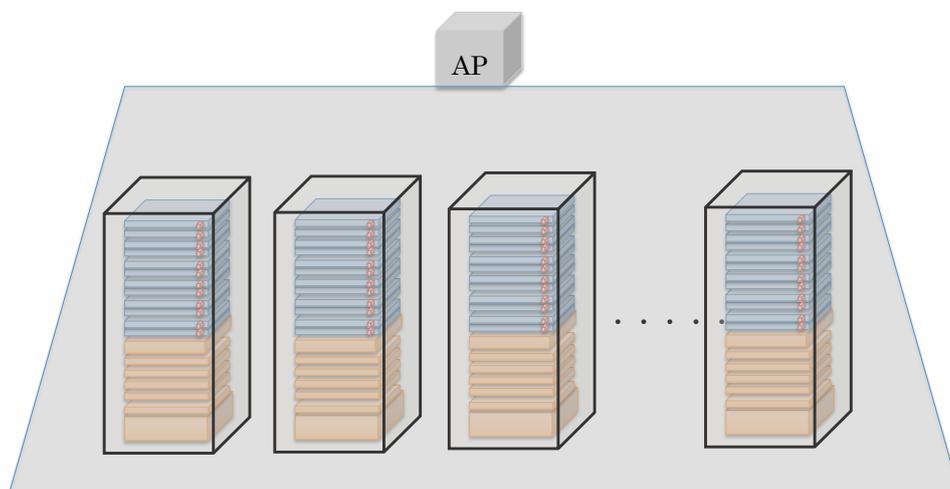


図 7.1: 1つのアクセスポイントで複数のラック内ノードに無線ネットワークを提供

### 7.3 無線規格の高速化

今回の実験では、無線通信の規格を IEEE802.11g を用いた。IEEE802.11g 規格のスループットは、理論上 54Mbps が限界値である。この帯域値は、有線配線のネットワークと比較して、非常に低帯域でありデータセンタネットワーク全体を無線化することは、非常に困難だと考えられた。よって本研究では、無線化するネットワークを管理ネットワークに限定することでデータセンタにおける要求を満たした。しかし、4.1 節で述べたように近年の無線規格は、スループットが向上しており IEEE802.11ac や IEEE802.11ad 規格を用いた通信を用いれば高帯域な通信が可能である。それにより管理ネットワークのみに限定することなく、サービスネットワークにも適応できるのではないかと考えられる。

### 7.4 データセンタへの提案手法の展開

本研究では、サーバ機器外部に無線、有線の間を変換するための UMA 箱を小型の PC 端末である Raspberry Pi を用いる事により概念実証を行った。実際のデータセンタ運用の現場で全てのサーバ機器に UMA 箱を設置することは、有線の配線と比較して簡易的であると考えられるが、データセンタのような数千台規模のノードに対して設置するには、多くの人件費が必要となると考えられる。このような問題を解決するには、UMA 箱の機能をサーバ機器に持たせる事で設置のための人件費を削減することが可能となり、より大きなデータセンタのコスト削減になると考えられる。

## 第8章 おわりに

本研究では、データセンタにおいて有線配線を削減することで運用コストを削減する事を目的として、サーバラック内のノードの管理ネットワークの有線配線を IEEE802.11 規格の無線技術を用いた無線化手法の提案・実装を行った。有線配線を無線化する際に懸念される事項として物理層レベルでの無線通信のパフォーマンスの測定を行った。また、外部電波の影響を確認するためアルミ箔を用いた電磁波の遮蔽実験を行った。その上で物理層レベルの設計を行った。データリンク層ネットワーク層提案手法のシステムを明確化した。提案手法 UMA では、有線と無線のインターフェースの変換を行う UMA 箱の実装を行った。概念実証実験として L2TP を用いた実装を行った。L2TP を用いる事でデータリンク層の情報を管理者端末とノード間で共有する事ができる。提案手法を用いる事により、管理ネットワークで用いられていた有線配線を削減することができ、データセンタの管理コストを削減することが可能となる。

# 謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方から多大なご助言やご助力をいただきました。それらの方々のご協力がなければ、本研究は成り立ちませんでした。心から厚くお礼申し上げます。本研究を進めるにあたり、指導教員である篠田陽一教授には様々な助言、適切にご指導賜りました。心から深く感謝致します。また、助言を頂いた副指導教員である丹康雄教授、副テーマ指導教員である緒方和博教授に感謝致します。本研究室の知念賢一特任准教授、宇多仁助教、井上朋哉特任助教には研究に関して活発な議論や多大なご指導を賜りました。心から感謝致します。NICTの宮地利幸博士、高野祐輝博士、安田慎吾博士、太田悟史氏、三浦良介氏には研究に関して様々な助言、適切にご指導賜りました。心から感謝致します。ブロードバンドタワー Cloud&SDN 研究所 所長西野大氏には、研究に関して多くの助言を頂きました。心から感謝します。篠田研究室の明石邦夫氏、Muhammad Imran Tariq 氏、鍛治祐希氏、大野夏希氏、田部英樹氏、村上正太郎氏、向井康貴氏、岩橋紘司氏、加藤邦章氏、成田佳介氏、園田真人氏、八木辰弥氏、可児友邦氏には研究以外でも普段の生活の面で支えていただきました。ここに心から感謝致します。最後にこれまで生活で支えてくれた家族へ心から感謝します。

## 参考文献

- [1] Zhou, Xia and Zhang, Zengbin and Zhu, Yibo and Li, Yubo and Kumar, Saipriya and Vahdat, Amin and Zhao, Ben Y. and Zheng, Haitao, Mirror Mirror on the Ceiling: Flexible Wireless Links for Data Centers, SIGCOM '12, No. 12, pp443–454, 2012.
- [2] Mohammad Al-Fares, Alexander Loukissas, and Amin Vahdat. 2008. A scalable, commodity data center network architecture. In Proceedings of the ACM SIGCOMM 2008 conference on Data communication (SIGCOMM '08). ACM, New York, NY, USA, 63-74. DOI=10.1145/1402958.1402967 <http://doi.acm.org/10.1145/1402958.1402967>
- [3] Daniel Halperin, Srikanth Kandula, Jitendra Padhye, Paramvir Bahl, and David Wetherall. 2011. Augmenting data center networks with multi-gigabit wireless links. SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 41, 4 (August 2011), 38-49. DOI=10.1145/2043164.2018442 <http://doi.acm.org/10.1145/2043164.2018442>
- [4] RFC7348, M. Mahalingam and D. Dutt and K. Duda and P. Agarwal and L. Kreeger and T. Sridhar and M. Bursell and C. Wright, Virtual eXtensible Local Area Network (VXLAN): A Framework for Overlaying Virtualized Layer 2 Networks over Layer 3 Networks, August, 2014
- [5] RFC854, J. Postel and J.K. Reynolds, Telnet Protocol Specification, RFC854 May, 1983
- [6] Electronic Industries Association Standard, ANSI/EIA-310-D-1992, <http://www.eia.org/>
- [7] IEEE802.11 WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS, The Working Group for WLAN Standards, <http://www.ieee802.org/11/>
- [8] murubushi <http://www.jaist.ac.jp/~k-chinen/pj/murubushi/>