

## 実験にもとづいた無線／有線の二層構造をもつLANの シミュレーション評価

重野 寛、荒井 要、横山 光男、松下 温  
慶應義塾大学

無線／有線の二層構造をもつLANで使用される1.2GHz帯無線回線の室内電波伝搬実験を行い、これらの結果から導いたフェージングチャンネルのモデルを取り入れてシミュレーションによって評価した。その結果、フェージングによってチャンネルの通信品質を悪化し、チャンネルの通信効率は低下する。しかし、上位ネットワークとして10Mbps CSMA/CD ネットワークを、下位ネットワークとして32kbps CSMA パケット無線ネットワーク使用した場合、性能に影響を与えることなしに、各基地局あたりのチャンネル数を減らせることが明らかになった。

### **Radio Propagation Measurements for Channel Modelling and Simulation of a Hybrid LAN with Radio and Wire**

Hiroshi SHIGENO, Kaname ARAI, Teruo YOKOYAMA, Yutaka MATSUSHITA  
Keio University  
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223, Japan

In this paper indoor radio propagation measurements at 1.2GHz are presented in order to develop a fading channel model. The performance of a hybrid LAN with radio and wire is analyzed through computer simulations based on the fading channel model led from the propagation measurements. The simulation shows that Rayleigh fading makes transmission quality worse. However, it is revealed that we can reduce the number of channels assigned to each Base Station without loss of performance under the condition that 10Mbps CSMA/CD network is used as the upper layer, and 32Kbps CSMA packet radio network is used as the lower.

## 1. はじめに

ローカルエリアネットワーク(LAN)の伝送媒体として無線を使用するシステム[1][2](無線LAN)は、IEEE802.11の設立等、国際的にもその実現が強く期待されている。

無線LAN実現のためには実際の電波伝搬状況を知ることが不可欠であるが、一般に、建物の構造は複雑でこれを解析的に求めることは困難であり、実験によって伝搬特性を知る必要がある。

電波伝搬特性の測定は報告[3][5][12]されているが、ビルディングやオフィスといった屋内におけるものはまだ少ない。そこで、我々は先に提案された無線/有線の2層構造をもつLAN[9]で使用される1.2GHz帯電波伝搬実験をおこない、この結果を参考にシステムのシミュレーションをおこなった。

## 2. 無線/有線複合LANシステムの概要

### 2-1 ネットワークの構成[9][11][14]

本システムでは上位ネットワークとして既存の有線LANを、下位ネットワークとして無線通信部分を組み合わせた2層構造をもっている(図1)。

本LANシステムは、適用範囲が既存のLANシステムと同程度なので、上位ネットワークとして、既存の有線LANシステムがそのまま使用できる様に設計する。上位ネットワークには、グループ同報機能を使用できることを条件として、IE

EE802.3~802.6の何れでも利用できるが、ここでは、LAN代表例であるイーサネット[8]と仮定してシステムを構築するものとする。本システムでは、無線端末と通常端末の混在を可能とするために上位ネットワークはあくまで上位ネットワークの規約にしたがって通信するものとしている。

下位ネットワークである無線ネットワーク部分で使用される無線方式は、昭和61年に法制化された「構内データ伝送システム[15]」に基づいている。無線チャンネルには、1.2GHz帯、各32kbps、全2重のチャンネルを21個(42周波数)用意し、その内の1つを通信制御用に、残りをデータ通信用に割り当てる、マルチチャンネルアクセス方式を採用している。また、複数ゾーン構成となっているので、送信出力を低く抑えると同時に、空間的にはなれたゾーンで同じ周波数を同時に使用することにより、周波数資源の有効利用をはかっている。これらのゾーンの通信範囲を重ねあわせて、サービスエリアを確保している。

### 2-2 無線端末の収容[11][14]

無線端末からの通信可能な範囲に複数の基地局が存在する場合は、その無線端末に最も近いと思われる基地局を決定し、無線端末はその基地局とのみ通信を行う様にするにより、下位ネットワークに論理的に接続される。下位ネットワークへの論理的な接続作業を、無線端末を基地局に収容すると表現することにする。本システムでは無線端末は、電源投入後まず最初に基地局への収容

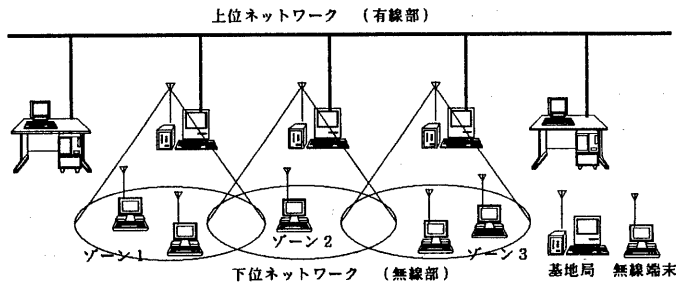


図1 室内無線LANの構成

要求パケットを送出する(図2に収容作業の例を示す)。収容要求パケットには、収容要求パケットであることを示すデータの他に、無線端末の識別番号(ID)が含まれている。無線端末からの収容要求パケットを受け取った基地局は、それぞれその受信強度に応じて待った後、上位ネットワーク上にその無線端末の収容宣言を行う。この収容宣言に最初に成功した基地局を収容基地局とする。収容権を得た基地局のみが無線端末に対して実際に応答を行う。無線端末は一定時間まで基地局からの応答を待ち、一定時間内に応答がない場合は、正しく通信できなかったものとして新たに収容要求パケットを送信し直す。

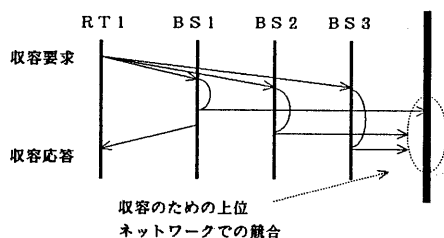


図2 無線端末の収容

無線端末が移動して、自分が現在収容されている基地局の通信可能範囲から出た場合、その端末が通信範囲にあるか否かの判断は、通信可能範囲から出ることによって通信ができなくなり、一定の割合以上で再送が起ることによって判断を行う。この場合、無線端末は再収容要求を出して他の基地局へ収容先を変更する。

再収容要求パケットを受信した基地局は、パケットを送信した端末が、現在収容中の無線端末である場合は、それぞれその受信強度に応じて待った後、さらに一定時間待ってから、上位ネットワーク上にその無線端末の収容宣言を行う。それ以外の基地局は先に述べたのと同じように収容宣言を行う。つまり、現収容基地局の上位ネットワーク上での競合の優先順位を低くすることにより、なるべく同じ基地局に収容されないようにする。

### 2-3 通信要求と通信方法[11][13][14]

無線端末は通信要求が発生すると、通信制御用のチャンネル(上)に、収容先基地局の識別番号を含んだ通信チャンネル割り当て要求パケットを送出する。先に述べたようにこの通信割り当て要求も複数の基地局で受信される可能性があるが、収容先基地局のみがこれに関する処理、応答を行う。収容先基地局は、チャンネル割り当てアルゴリズム(後述)に従い、割り当てるデータチャンネルを決定し、応答を返す。

無線端末は、割り当てられたデータチャンネルを用いてデータを基地局に送信する。上位ネットワークに接続されている端末への通信は問題ないが、無線端末は常に移動する可能性があるため、上位ネットワーク上の基地局や端末は、グループ同報モードによって全ての基地局に対して同時に、宛先無線端末の識別番号とそのデータを1つのパケットとして送信する。宛先無線端末の収容基地局は、パケットの送信元基地局に対して、確認応答を返す。次に、その無線端末に対して、制御チャンネルを通じて割り当てるチャンネルを知らせ、パケットを転送する。

### 2-4 チャンネル割り当て方法[10][14]

室内無線LANシステムにおいては、壁などの障害物による電波の伝搬距離のばらつきや、反射波の影響、平面上に加えて階上階下にあるゾーンの3次元構成、ゾーン毎のトラフィック密度等を考慮して、システムを運用する前に設計段階で各基地局の最適な固定のチャンネル配置を決定することは困難である。本システムでは、動的チャンネル配置を採用し、チャンネル配置を行うための基地局間位置関係を表す位置情報には、エリア多重度という概念を導入し、位置情報の代用として用いてチャンネルの割り当てを行っている。

データパケットに比べて制御パケットの方がより遠くで受信できる確率が高いことを利用し、制御チャンネル上り回線に送信されている、送信要求パケットのうち、最も新しいN個の誤りのない、正当なパケットの送信先基地局、その受信強度を

履歴として保存しておく(図3 N=5の場合)。この履歴データから、基地局別に受信強度の総和を求めたものが、エリア多重度表(図4)となる。これによってエリア多重度が大きい基地局ほど同じ無線チャンネルを使用した場合、互いに通信の妨害を引き起こし易いといえる。つまり、ゾーンの重なり具合を判断する位置情報の代わりとして、使用できる。

基地局名	受信強度
BS2	4
BS3	2
BS4	1
BS2	4
BS3	3

図3 履歴データ (N=5)

	BS1	BS2	BS3	BS4
BS1	-	8	5	1

図4 エリア多重度の例

基地局が無線端末からの通信要求に対してチャンネルを割り当てる際、“現在最も通信の妨害が起りにくいチャンネルを割り当てる”という原則に従い、最適と思われるチャンネルを選択する。

無線チャンネルを新たに使用する前と開放の際に上位ネットワークのグループ同報機能を用いて、他の基地局にチャンネルの使用状況の更新を知らせる。各基地局は、この更新データをもとにして自分の中にチャンネル使用状況表を作成し、チャンネル割り当て際は、このチャンネル使用状況表とエリア多重度表を基にしてチャンネル割り当てを行う。今、mチャンネルのチャンネル使用状況表がn個あるとする。チャンネルが使用中であるとき $U_{mn} = 1$ 、使用中でないとき $U_{mn} = 0$ で示せば、iチャンネルの使用状況は、

$$\sum_{i=0}^n a_i U_{mi} \quad (1)$$

で表され、この値の最も低いチャンネルを割り当て

チャンネルとする。

### 3. 1. 2GHz帯電波伝搬実験[3][5][13]

無線LAN実現のためには実際の電波伝搬状況について知ることは必要不可欠であるが、屋内無線通信では、部屋の形状やロッカー、机により反射、回折、散乱等を受けるため多重信号伝搬路が存在し、電波伝搬は予測が困難で絶えず変化している。一般に、建物の構造は複雑でこれを解析的に求めることは困難である。本システムで使用する1.2GHz帯電波伝搬特性[3][5][13]を知るために、屋内における電解強度分布、ビット誤り率、通信路切断数を測定した。

#### 3-1 実験の概要

実験の諸元を表1に示す。測定場所として慶應義塾大学理工学部26棟の2階の各部屋と各階の廊下(図5)を使用した。それぞれの部屋には、机や金属製ロッカーがあり、耐震壁と軽量鉄骨間仕切の二種類の壁がある。人の有無は測定者二人の他、たまに人が通過する程度である。

表1 実験諸元

送信周波数	1252.375MHz
送信出力	100mW
伝送速度	9600bps
変調方式	GMSK
受信方式	ダイバーシチ方式
送信アンテナ	マイクロストリップ アンテナ
受信アンテナ	マイクロストリップ アンテナ
電界強度測定	半波長ダイポールアンテナ
ビット誤り率測定	マイクロストリップ アンテナ

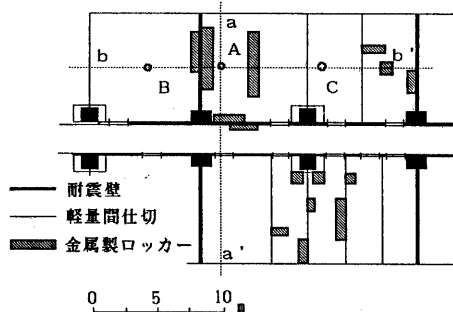


図5 部屋の配置

### 3-2 電界強度分布測定とビット誤り率測定

送信アンテナは高さ約3mに、受信アンテナの高さは約1.2mで、向きは常に送信器側に向くようにした。

(1) 平面分布 送信アンテナを図5のA、Cに置いて、全域を90~100cm間隔で受信電界強度の測定をした。

(2) 線上分布 送信アンテナをA、Bに置き、それぞれ図8の2つの線a-a'、b-b'上を10cm毎に電界強度の測定をした。

電界強度測定結果にもとづき、電界強度がおおよそ60、70、80、90dB $\mu$ V/mの位置でビット誤り率を測定した。ここでは受信アンテナを床から約1.6mの位置に設置した。データ伝送方法は、1パケットに目印(開始、終了、I D番号)と1000ビットのデータを入れ、無線通信路が切断された回数も計測できるようにして、10<sup>6</sup>ビット送信した。

### 3-3 実験結果および検討

電界強度測定結果を図6、7に示す。

電界強度分布は10dBごとに示してあるが、送信器からの距離が離れるに従って受信強度が弱くなることに加え、二種類の壁による無線電波の透過損の違いがわかる。軽量鉄骨間仕切の透過損はほとんど無いのに対して耐震壁による透過損はおおよそ8dBである。また、ドアによる約1dBの減衰も確認された。金属製ロッカーの影響も見逃すこと

ができず、特に送信器側からみてロッカーの影になる部分の受信強度は落ち込んでいるのが確認できる。さらに、図6の×印で示された場所には、測定中人が存在しておりこの部分で電波が遮られている様子がうかがえる。また、別の測定から、階が変わる(床を透過すると)と約20dBの減衰がみられた。

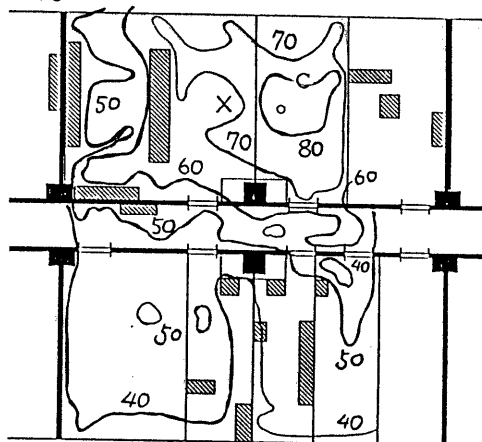
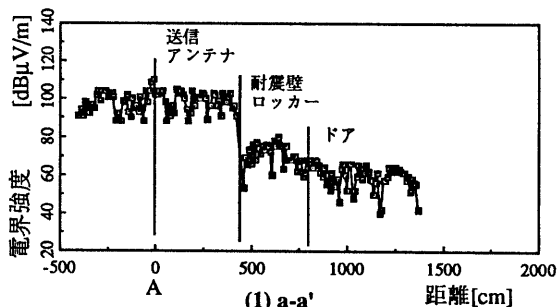
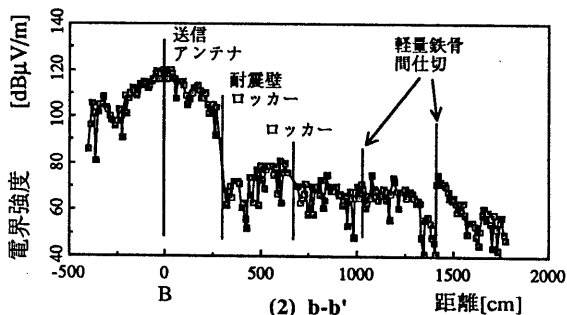


図6 電界強度の分布



(1) a-a'



(2) b-b'

図7 電界強度の減衰

電界強度とビット誤り率の相関関係測定結果(表3)からもわかるように電界強度が下がるにつれビット誤り率も多くなり、我々が目標としている $10^{-4}$ BER以下を保つためには、電界強度がおおよそ60dB $\mu$ V/m以上無くてはならないことがいえる。それを考慮にいれると、送信器と受信器の距離は15~20m以内であることが必要である。

また、ビット誤りとは別に通信開始時あるいは通信中にフレームの同期がとれなくなる回線切断回数も測定した。これは、パケットを送り始めに、送受信機間の同期がとれない場合やパケットを送信している最中に通信が途切れ、以後の同期がうまくとれなくなることによるものと思われる。

表3 電界強度とビット誤り率の関係

電界強度 (dB $\mu$ V/m)	ビット誤り率	通信路切断回数 (100パケット中)
60	$10^{-3.0}$	5.57
70	$10^{-4.7}$	1.48
80	$10^{-6.0}$	0
90	$10^{-8.0}$ 以下	0

#### 4. シミュレーションによるシステム評価

##### 4-1 シミュレーションモデル[3][5][6][7]

シミュレーションは、離散的モデルによる、イベント処理型の記述によって行った。シミュレーションで使用される基本的な値(表4)については1.2GHz帯による構内データ伝送システムの規格[15]に準じている。

フェージング等による場所的信頼性を考慮しない場合の距離と出力と受信入力レベルの関係は、室内では、次のように表される。

$$10\log Pr = -19.584 - 41.273\log(d) + 10\log(Pt)$$

d : 距離[m], Pt : 送信出力[mW],  
Pr : 受信入力レベル[mW] (2)

一方、受信レベルとビット誤り率の関係は、

$$\log(BER) = -\log Pr - 12 \quad (3)$$

これらの2式より

$$\log(BER) = 4.127\log(d) - 10.041 - \log(Pt) \quad (4)$$

が得られる。

受信電界強度と受信入力レベルの関係は

$$10\log Pr = 20\log E + 20\log(\lambda/\pi) - 98 - 10\log Z$$

Z : 内部インピーダンス [ $\Omega$ ] (5)

となり、PtがE<sup>2</sup>に比例することから、フェージングを考慮して、式(4)で $\sqrt{Pt}$ をレイリー分布にしたがって変動させる。

実験より、送受信機間が1階離れるごとに受信電界強度が20dB減少することがわかったので、送受信機間の階数の差をfとすれば、(4)式は

$$\log(BER) = 4.127\log(d) - 10.041 - \log(Pt) + 2\log(f) \quad (6)$$

となり、これをシミュレーションに用いた。

シミュレーションは提案した室内無線LANの通信方式のうち、通信は端末局から基地局に向けて行われるもののみであるとした。

表4 シミュレーションの主なパラメータ

距離とビット誤り率の関係式	$\log(BER) = 4.127\log(d) - 10.041 - \log(Pt) + 2\log(f)$
時間の単位	1 bitの通信に要す時間
伝播遅延時間	16 kbit
データチャネル	32 kbps 複信20ch(40波)
パケット長	制御用512bit データ用2kbit
メッセージ長	16 kbit(8パケット)
データパケット長	2 kbit
呼の発生	ポアソン到着と仮定 呼が発生した時点でその端末が通信中であった場合は、その呼は捨てられる
端末と基地局の数	無線端末: 100 基地局: 20(4×5)

シミュレーションの空間は、30m×30m、1階あたりの高さ約3m、5階建てのオフィスビル(図8)を考えた。各階の4隅に基地局(BS)が取り付けられている。無線端末(RT)はデフォルト値が100個で、

各階あたり20個がランダムに配置されている。無線端末は1秒あたり1/200の確率で移動する。

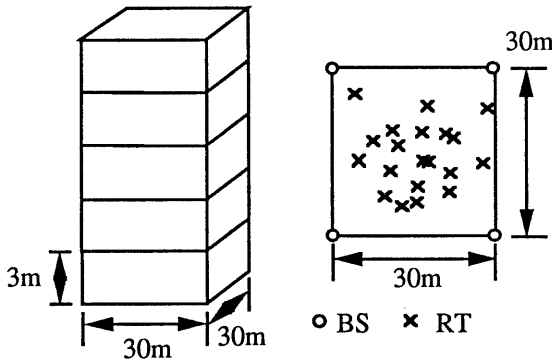


図8 シミュレーション空間

#### 4-2 シミュレーション結果

図9にフェージングを考慮した場合としない場合をチャンネル利用率について比較したグラフである。ここでトラフィックは1パケットの送信時間内に送出される平均パケット数にパケット長を乗じたものを1チャンネルの伝送容量で正規化したものである。チャンネル利用率は、1つのチャンネルが通信の失敗無く同時に何か所で利用されているかの平均値である。有線LANのスループットに相当するものであるが、無線LANでは周波数の空間的再利用が可能のため、有線と異なりチャンネル利用率の値は1を越えることができる。

トラフィックが増えるにつれて、チャンネル利用率は、フェージングによる低下している。この時、収容成功率、通信成功率も低下する(図10)。

データチャンネルは各基地局で20チャンネルが使用可能であるが、これを減らした場合のデータチャンネル利用率を図11に示す。

また、これらの結果から、各基地局4チャンネル程度まで減らしても、実用上問題ないが、これより減らすと、チャンネル利用率がかなり低下することがわかる。

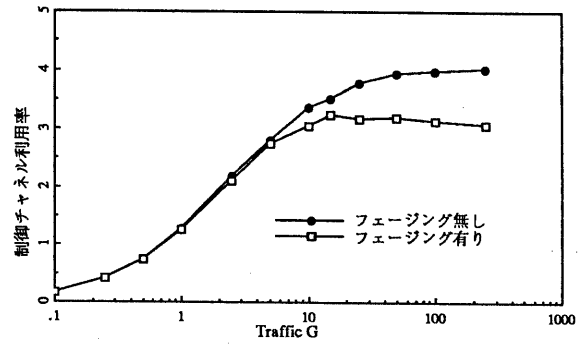


図9 制御チャンネル利用率におけるフェージングの影響

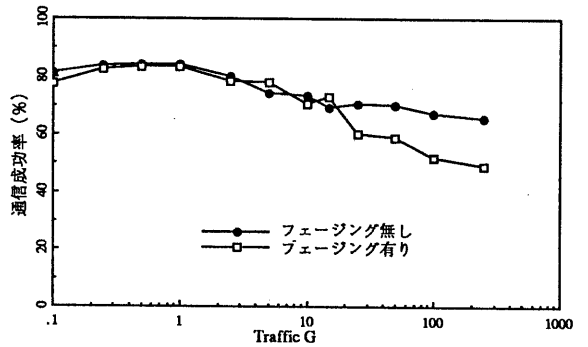


図10 通信成功率におけるフェージングの影響

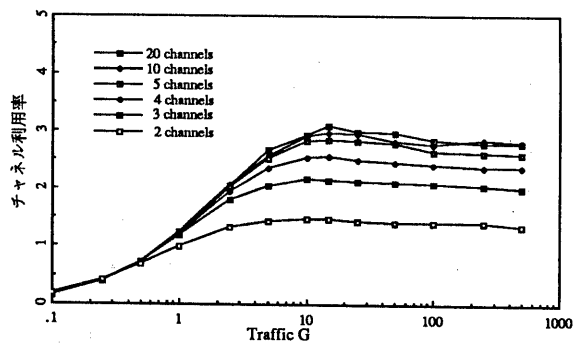


図11 各基地局で使用できるデータチャンネル数の影響

## 5. 結論

実験により、1.2GHz帯における屋内の電波伝搬状況が明らかにされた。特に、2種類の壁に対する電波の透過損が異なること、金属製のオフィス家具や人の有無が伝搬に影響すること、異なる階に対しては受信電界強度が1階当たり約20dB $\mu$ V/mの割合で減衰することは重要である。これらのことは、無線LANが使用される状況(場所、家具の配置、人の多少等)によって期待される性能を発揮できないことも有り得ることを示唆している。

データ通信については、ビット誤り率のほかに、送受信機間で同期がとれない場合のあることが明らかになった。

また、これに基づくシミュレーションから、フェージングによる通信回線品質の劣化により、通信効率は低下するものの、本システムを用いた場合各基地局で使用できるチャンネル数を5チャンネル程度まで減らしても影響がないことがわかった。

## 参考文献

- [1] A. S. Acampora and J. H. Winters, "A Wireless Network for Wide-Band Indoor Communications", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. SAC-5, No. 5, 1987
- [2] A. S. Acampora and J. H. Winters, "System Applications for Wireless Indoor Communications", IEEE Communications Magazine, vol. 25, No. 8, pp.11-20, August, 1987
- [3] 電波システム開発センター構内データ伝送システム開発部会, "構内データ伝送システム研究開発報告書", RCR TR-8, 1986
- [4] T. C. Hou and V. O. K. Li, "Performance analysis of multihop packet radio networks with capture", IEEE Int. Conf. on Com., Chicago, Vol. 41, No. 2, 1985
- [5] 岩間 司, 関沢 信也, 猿渡 岱爾, 山本 和央, 有泉 芳男, "1.2GHz帯における構内伝搬特性", 電子通信学会技術研究報告, AP86-134, pp. 45-50, 1987-01
- [6] L. Kleinrock and F. A. Tobagi, "Packet Switching in Radio Channels: Part I- Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics", IEEE Trans. on Comm., Vol. COM-23, No. 12, 1975
- [7] F. A. Tobagi and L. Kleinrock, "Packet Switching in Radio Channels : Part II-The Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-Access and the Busy-Tone Solution", IEEE Trans. on Comm., Vol. COM-23, No. 12, 1975
- [8] R. M. Metcalfe and D. R. Boggs, "Ethernet, Distributed Packet Switching for Local Computer Networks", Communications of the ACM, vol. 19, No. 7, pp. 395-404, July, 1976
- [9] 重野 寛, 吉田 徳文, 大平 千里, 横山 光男, 松下 温, "有線と無線の2層構造を持つLAN", 第40回情報処理学会全国大会, pp. 1407-1408, 1990
- [10] 大平 千里, 関根 毅, 吉田 徳文, 横山 光男, 松下 温, "室内パケット無線LANにおけるダイナミックチャンネル割当法", 第40回情報処理学会全国大会, pp. 1409-1410, 1990
- [11] 大平 千里, 重野 寛, 横山 光男, 松下 温, "既存のLANへの無線データ通信システムの收容方法, 情報処理学会 マルチメディア通信と分散処理研究会 CS45-9, 1990
- [12] 山本 和央, 小川 圭祐, 有泉 芳男, 秦 常雄, "低振幅高能率直接変調方式による1.2GHz帯構内データ伝送システムの試作評価", 電子通信学会技術研究報告, CS86-132, pp. 43-48, 1987-01
- [13] C. Ohira, T. Yokoyama, H. Shigeno, Y. Matsushita, "A Hybrid Indoor Radio Network Based on the Wire and Wireless Layered Architecture", Proc. of 5th JWCC, pp. 65-74, 1990
- [14] H. Shigeno, C. Ohira, T. Yokoyama, Y. Matsushita, "Dynamic Channel Assignment in a Hybrid Indoor Data Network with Radio and Wire", Proc. of 15th LCN, pp. 366-370, 1990
- [15] 昭和61年5月27日付官報(号外67号)