

ワイヤレスセルラネットワークにおける下位層プロトコルの影響を考慮した TCP スループットの性能評価

三好 昌弘^{†a)} 菅野 正嗣^{††} 村田 正幸[†]

Performance Evaluation of TCP Throughput with Consideration on Lower Layer Protocols for Wireless Cellular Networks

Masahiro MIYOSHI^{†a)}, Masashi SUGANO^{††}, and Masayuki MURATA[†]

あらまし ワイヤレスセルラネットワークにおいて、データリンク層としてスロット付きアロハ方式を用いた場合に、上位層である TCP のスループットを解析的に導出する方法を提案する。本手法に基づき性能評価を行った結果、データリンク層のレベルでスループットを最大化することが、必ずしも TCP のスループットを向上させるとは限らず、かえって悪影響を与える場合があることを示した。また、無線回線上の通信誤りについても考慮し、誤り訂正手法として FEC を用いた場合に、回線品質に応じて、オーバーヘッドと誤り訂正能力を考慮した適切な符号化を選択することで、TCP スループットを向上させることができることを示した。

キーワード ワイヤレスセルラネットワーク, TCP, スロット付きアロハ方式, ARQ, FEC

1. ま え が き

近年、携帯電話をはじめとする無線端末からワイヤレスセルラネットワークを介してインターネットにアクセスするモバイルインターネット環境が注目されている。このようなモバイルインターネット環境を実現するための技術として、様々な通信方式が提案されてきた。しかし今後、ITU における次世代移動通信システムである IMT-2000 [1] で国際標準化検討されている CDMA 方式が、ワイヤレスセルラネットワークの無線伝送方式として有力視されており、インターネットとの無線データ通信は、CDMA パケット交換方式により TCP セグメントを通信する方式が主流となつてゆくことが予想される。CDMA パケット交換方式を用いたワイヤレスセルラネットワーク上で TCP セグメントを通信する場合、従来 TCP が前提としてき

た有線ネットワークとは、伝送特性が異なることを考慮する必要がある。すなわち、TCP は、本来有線ネットワークを前提として設計されたプロトコルであり、通信回線上での伝送誤りによるパケット損失は考慮していない。しかしながら、無線回線上ではフェージングやシャドローイングの影響で通信誤りによるパケット損失が発生する。また、通信中の端末が移動する際のハンドオフ時にも、コネクションの切換えによってパケットの損失が発生する。

これらのパケット損失が発生すると、TCP はネットワークがふくそう状態にあると判断し、ふくそう制御機構が働いてウィンドウサイズを小さくして伝送レートを低くしてしまう。すなわち、無線回線上で伝送誤りによりパケット損失があった場合には TCP セグメントの再送が必要であるにもかかわらず、ウィンドウサイズを小さくすることによってスループットが劣化してしまうという現象を引き起こす。無線回線上特有のパケット損失による TCP の性能劣化を防止するための研究としては、無線回線上の通信誤りを TCP セグメント単位で観測し、通信誤りの発生を移動局に通知する機能を基地局にもたせる方式 ELN (Explicit Loss Notification)[2] がある。これは、パケット棄却が発生した場合に、通知された移動局にパケットの再

[†] 大阪大学大学院基礎工学研究科情報数理工学専攻, 豊中市
Department of Infomatics and Mathematical Science, Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 1-3
Machikaneyama, Toyonaka-shi, 560-8531 Japan

^{††} 大阪府立看護大学医療技術短期大学部, 羽曳野市
Osaka Prefecture College of Health Sciences, 3-7-30
Habikino, Habikino-shi, 583-8555 Japan

a) E-mail: mmiyoshi@d3.dion.ne.jp

送をさせ、TCP のふくそう制御に影響を及ぼさないようにすることでスループットを向上させる方式である。また TCP のふくそう制御をレート制御型にして、通信誤りによるパケット棄却の影響を受けにくくして、スループットを向上させる方式 W-TCP [3] なども提案されている。

一方、ハンドオフによるパケット損失が TCP に与える影響をおさえる研究として、TCP のコネクションを無線部と有線部で分離して、無線部のハンドオフの影響を有線部から意識させない方式である I-TCP [4] や、基地局に TCP セグメントをキャッシングする機能をもたせ、ハンドオフ時に発生する棄却パケットをキャッシングした基地局から再送する方式である Snoop [5] などが提案されている。これらのワイヤレスセルラネットワークにおける TCP 性能評価に関する研究は、あくまで通信誤りやハンドオフによるパケット損失が TCP の性能に与える影響を対象としたものであり、下位層であるデータリンク層の伝送特性については考慮していない。したがって、モバイルインターネット環境としての性能評価としては不十分である。

端末から基地局向けの通信（アップリンク）では、複数の端末による無線チャネルの競合が発生するため、スロット付きアロハ方式などの多重アクセス方式がデータリンクプロトコルとして用いられる。TCP セグメントはそのような多重アクセス方式の上位層で伝送されることとなる。多重アクセス方式自体に関する評価を行った研究は従来からなされている。例えば、スロット付きアロハ方式に関するネットワーク特性評価に関する研究として、スロット付きアロハ方式で発生するパケット衝突の影響に着目したスループットや遅延評価手法が提案されている [6], [7]。これらはデータリンク層のみに着目して、その性能を評価しているものである。しかしながら、実際には上位層として用いられる TCP に対してどのような影響を与えるか、ということが重要である。

無線回線上的多重アクセス方式を実現するデータリンクプロトコルとしては、調停が不要で実装が容易である、また準アロハ方式に比べて高いスループットが得られるという理由から、スロット付きアロハ方式が衛星通信などで様々な分野で用いられてきた [8]。更に IMT-2000 [1] で実用化が進められている W-CDMA, cdma2000 においてもスロット付きアロハ方式が採用される見込みである [9]。そこで本論文では、多重アクセス方式としてスロット付きアロハ方式を想定し

て、このスロット付きアロハ方式のパケット衝突で発生する遅延時間が、上位層の TCP ふくそう制御のベースになっている RTT (Round Trip Time) に与える影響を考慮して、ワイヤレスセルラネットワークにおける TCP スループットの性能評価を行う。本論文では、解析的手法によってデータリンク層を評価することで RTT を導出し、TCP に対する影響を明らかにする。その結果、単にデータリンク層の性能を向上させることが TCP の性能を向上させるのではないことを示す。また、下位層にスロット付きアロハ方式を用いた場合における無線回線上的通信誤りが、TCP スループットに与える影響、更に誤り訂正手法として ARQ (Automatic Repeat Request) と FEC (Forward Error Correction) を用いた場合の TCP スループット性能評価に関しても評価を行った。以下、2. で TCP 性能評価の対象とするワイヤレスセルラネットワークのモデルについて解説し、3. では、解析による TCP スループットの導出方法について述べ、シミュレーションによって解析手法の妥当性を検証する。4. では、スロット付きアロハ方式、無線回線上的通信誤りが TCP 層に与える影響について評価及び考察する。最後に 5. で、まとめと今後の研究課題について述べる。

2. 対象とするワイヤレスセルラネットワークモデル

本論文でのネットワークモデルを図 1 に示す。TCP セグメントは、各無線端末を送信元として、有線ネットワーク上に存在する送信先あてに通信されるものとする。対象とするモデルでは、TCP セグメントは連続通信されたとする。なお TCP のバージョンは、現在の実装において主流となっている Reno を対象とする。以下、ネットワークモデルにおけるネットワーク構成、データリンク層、TCP 層について説明する。

[ネットワーク構成]

ワイヤレスセルラネットワークは、

- 無線端末：MT (Mobile Terminal)
- 基地局：BS (Base Station)
- 移動局交換局：MSC (Mobile Switching Center)

から構成され、移動局交換局を経由して有線ネットワーク上に存在する送信先に接続される。ここで、無線端末と基地局間が無線回線、基地局と移動局交換局間是有線回線である。

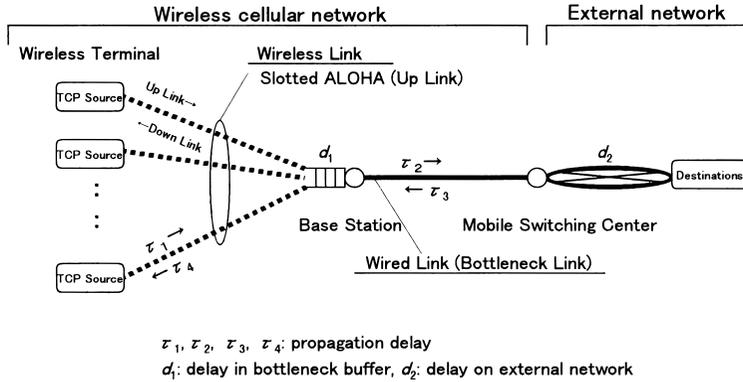


図 1 ワイヤレスセルラネットワークモデル
Fig. 1 The model of wireless cellular networks.

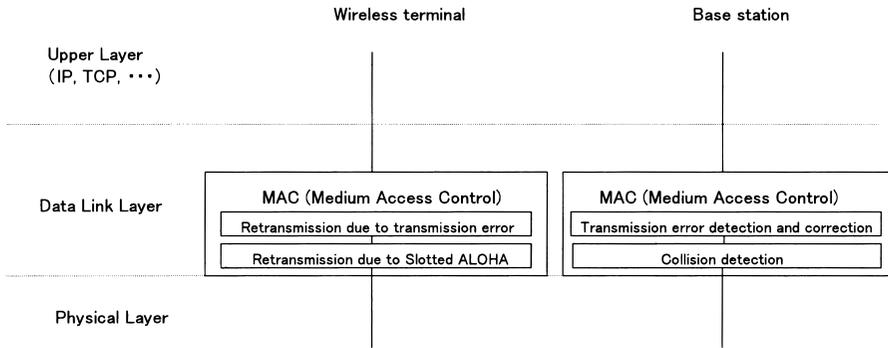


図 2 データリンク層モデル
Fig. 2 Data link layer model.

[データリンク層]

無線端末から基地局にアクセスするアップリンクでは、無線端末間の競合が発生する。本ネットワークモデルではアップリンクの無線データリンク層プロトコルとして、スロット付きアロハ方式を用いることとする。ここで、図 1 のネットワークモデルにおいて、スロット付きアロハ方式が用いられる無線端末と基地局間のアップリンクに相当するデータリンク層モデルを図 2 に示した。

本データリンク層モデルでは、スロット付きアロハ方式及び通信誤りによる再送機能は各無線端末に実装され、通信誤り検出機能は基地局に実装されるものとする。そして、基地局に実装された MAC (Medium Access Control) で誤りが検出されると、ARQ の場合は、無線端末に誤り発生を通知し、無線端末から再送を行う。また FEC の場合は、基地局で誤り訂正処理を行う。

データリンク層内のレイヤリングとしては、文献 [9] に示されている IMT-2000 を対象としたデータリンクモデルを参考に、スロット付きアロハ方式による再送機能の上位に通信誤り検出による再送機能が存在するモデルとした。またスロット構成は、簡単のため図 3 に示したように、1 スロットにつきデータリンク層の 1 パケットのデータが通信され、更にデータリンク層の 1 パケットで TCP 層の 1 セグメントが通信されるものとする。

次にデータリンク層が TCP 層に与える影響として、Stop-and-Wait 方式を想定したスロット付きアロハ方式による再送と、Go-back-N 方式を想定した通信誤り検出による再送が TCP 層に与える影響を考える。TCP は図 4 に示したように、重複 ACK を 3 個以上受信した場合に、パケット棄却が発生したと認識する。スロット付きアロハ方式による再送は、1 パケット送信ごとに ACK の受信を待つ Stop-and-Wait 方式を想

定しているため、ACK のシーケンス番号が置き換わることはない。このため、重複 ACK は発生せず TCP 層でのパケット棄却とはならない。つまりデータリンク層のパケット棄却が TCP 層へ与える影響は、パケット棄却ではなく、棄却パケット再送による伝搬遅延時間として影響すると考える。一方、通信誤り検出による再送は、ACK の受信を待たずに N 個のパケットを送信する Go-back- N 方式を想定しているため、ACK のシーケンス番号が置き換わり、重複 ACK が発生する可能性があるため、TCP 層でのパケット棄却として考える。

なお、データリンク層のその他の部分が与える影響は特に規定せず、TCP 層に与える影響として固定の伝搬遅延時間を規定する。また今回対象としたモデルでは、ダウンリンクの ACK は棄却されないものと仮定したが、ACK が棄却される場合の性能評価については、今後の研究課題とする。

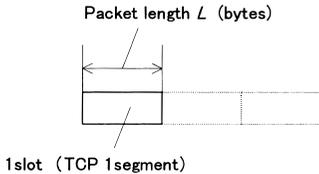


図 3 スロット構成
Fig. 3 Configuration of slot.

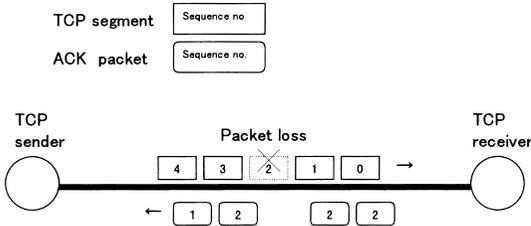


図 4 TCP のパケット棄却の認識方法
Fig. 4 Notification of packet loss in TCP protocol.

[TCP 層]

TCP 層では、TCP ふくそう制御の要因である遅延時間とパケット棄却について考慮する。まず、遅延時間の発生要因として、各リンクでの伝搬遅延時間、ポトルネックバッファでの滞在時間があげられる。本ネットワークモデルでは、各リンクでの伝搬遅延時間、ポトルネックバッファ滞在遅延時間をモデルとして組み込む。またワイヤレスセルラネットワーク内での遅延時間ではないが、TCP ネットワーク特性を考えるうえで、外部のネットワーク滞在遅延時間も遅延時間としてモデルに組み込む。

一方、パケット棄却の発生要因として、アップリンクの無線回線上の通信誤り、ポトルネックリンクである基地局バッファでのオーバフローによるパケット棄却が発生するものとする。そして、これらは独立に発生するものと仮定する。

[トラヒックフロー]

最後に、上記仮定に基づき、下位層にスロット付きアロハ方式を想定した場合の TCP トラヒックフローについて、図 5 を用いて説明する。なお本論文では、無線帯域として、IMT-2000 の伝送速度スペックである 2 Mbps を想定する。また有線帯域は、文献 [10] で述べられているように、IMT-2000 に向けて様々な通信手段で新伝送路網の構築が検討されつつあるが、そのスペック、実現時期など明確になっていないため、本論文では既存のデータ通信固定網である N-ISDN (Narrowband Integrated Services Digital Network) を想定し、N-ISDN をマルチリンクとして使用した場合の帯域である 128kbps として検討を進めることとする。ただし、厳密には $64 \text{ kbps} \times 2 \text{ チャンネル} = 128 \text{ kbps}$ であるが、以下、検討の都合上 125 kbps とした。ここで、今回対象としたモデルでは、無線帯域が有線帯域より大きい場合を想定しているが、有線帯域が無線帯域よりも大きい場合は、無線区間と有線区間の伝送速度差に起因する基地局でのパケット棄却は

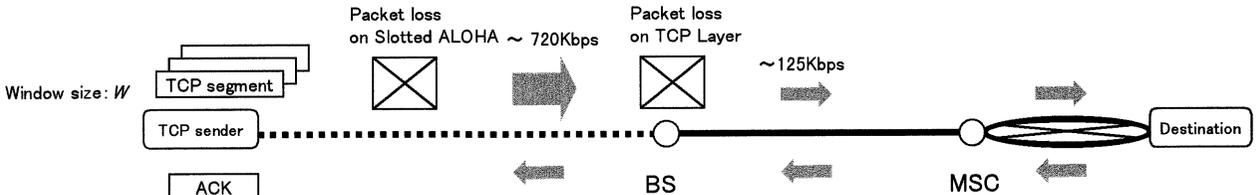


図 5 トラヒックフロー
Fig. 5 Traffic flow.

発生しない。本論文での主題は、無線区間と有線区間の伝送速度差に起因する基地局でのパケット損失が TCP のスループットに与える影響について検討するものであるため、基地局でのパケット棄却が発生せず、TCP のふくそう制御の影響を考慮する必要のない有線帯域が無線帯域よりも大きい場合については、検討の対象外とする。

(1) 初めに、TCP 送信元から無線回線に送出されたパケット (TCP セグメント) はスロット付きアロハ方式による衝突発生のため 2 Mbps (無線帯域) $\times 0.36$ (スロット付きアロハ方式の最大スループット) = 720 kbps 以下にトラヒック量が制限される。

(2) 次に、無線回線上の通信誤りと、ボトルネックリンクである基地局バッファでのオーバフローによるパケット棄却のため、その先の有線帯域 125 kbps 以下にトラヒック量が制限され、TCP 送信先にトラヒックが到着する。

(3) ACK パケットが TCP 送信元に返送されるが、これ以降トラヒックの変動要因は想定していないため、トラヒック量が変動することなく TCP 送信元に ACK が到着する。

(4) ACK を受信した TCP 送信元は、TCP のウィンドウフロー制御に従って、ネットワークの負荷状態に応じたウィンドウサイズ W のパケット (TCP セグメント) を無線回線に送出する。

以上のように上位層に TCP を想定した場合、ネットワークへの流入トラヒックは、TCP のウィンドウフロー制御によりネットワークの負荷状態に応じて調節されるため、ボトルネックバッファで大量のパケット棄却が発生することなく、比較的安定したトラヒックが保たれる。一方、データリンク層として想定したスロット付きアロハ方式からみると、このウィンドウフロー制御により新たに発生したパケットと再送パケットを含んだ実効トラヒックが増減することになる。

3. TCP スループットの導出

本章では、ワイヤレスセルラネットワーク上で TCP スループットを導出する解析手法と、その妥当性を検証するために用いたシミュレーションモデルについて説明する。

3.1 解析による TCP スループットの導出

文献 [11] で、TCP ふくそう制御を解析モデル化して TCP ウィンドウフロー制御が定常状態に達したときのスループット S_{TCP} をラウンドトリップ時間 RTT 、タ

イムアウト時間 T_o 、パケット棄却率 p 、delayed ACK パラメータ b (本論文では、文献 [11] で述べられているように、一般的に用いられる値 $b = 2$ とする) をパラメータとして算出する式 (1)、及びウィンドウサイズ W を算出する式 (2) が提案されている。TCP ふくそう制御はこの式を引用し、2. のワイヤレスセルラネットワークモデルでの RTT, T_o, p を解析により導出し、式 (1)、(2) に代入することで TCP スループットを得る。ここで、式 (1) では直接的なパラメータとしてウィンドウサイズ W で表現されていないが、式 (2) において W は p に依存した式で表現されているため、式 (1) では W という表現ではなく p で表現されていると考えることができる。また文献 [11] では、 $p > 0.01$ において式 (1) と実測データがよく一致している様子が示されており、式 (1) の有効範囲として本論文では $p > 0.01$ として考える。

$$S_{TCP} = \frac{1}{RTT \sqrt{\frac{2bp}{3} + T_o \min \left(1, 3\sqrt{\frac{3bp}{8}} \right) p(1+32p^3)}} \quad (1)$$

$$W = \frac{2+b}{3b} + \sqrt{\frac{8(1-p)}{3bp} + \left(\frac{2+b}{3b}\right)^2} \quad (2)$$

解析にあたって、式 (1) の導出には期待値が用いられているため、ラウンドトリップ時間の期待値 $E[RTT]$ 、タイムアウト時間の期待値 $E[T_o]$ を導出する。更に式 (1) と同様に、トラヒックの発生はポアソン分布に従うものとし、算出する TCP スループットは定常状態の値である。以下、 $E[RTT], E[T_o], p$ の導出方法を示す。

3.1.1 ラウンドトリップ時間の期待値: $E[RTT]$

2. のネットワークモデルでは、ラウンドトリップ時間の期待値 $E[RTT]$ は、ネットワーク上の遅延時間の総和、

$$E[RTT] = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + d_1 + d_2 \quad (3)$$

である。ここで、基地局の性能が十分確保され、基地局バッファ滞在遅延時間 d_1 はほとんど無視できるほど小さく、また有線回線の伝搬遅延時間 τ_2, τ_3 、及びダウンリンク伝搬遅延時間の τ_4 は、アップリンク伝搬遅延時間 τ_1 と外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2 に比べて無視できるほど小さいとすると、式 (3) は

$$E[RTT] \approx \tau_1 + d_2 \quad (4)$$

と近似できる．外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2 は評価パラメータとして与えるので，アップリンク伝搬遅延時間の期待値 $E[\tau_1]$ を解析により導出する．アップリンクのデータリンク層プロトコルであるスロット付きアロハ方式のスループット S_{ALOHA} に関しては，無線端末数 n ，各無線端末でのパケット送信間隔 N を用いて， N が衝突による再送の影響を考慮する必要がないほど十分大きく，トラヒックの発生がポアソン分布に従い，新たに発生したパケットと再送パケットを含んだ実効トラヒック G を表す式 (6) において $N \gg n$ のとき，以下の式 (5)，(6) で表されることが知られている [12]．

$$S_{ALOHA} = G \exp(-G) \quad (5)$$

$$G = \frac{n}{N} \quad (6)$$

ここで，2. [トラヒックフロー] で述べたように各無線端末は，TCP のウィンドウフロー制御に従って，ネットワークの負荷状態に応じたウィンドウサイズ W のパケット (TCP セグメント) を送出するため，実効トラヒック G は式 (7) で表すことができる．

$$G = \frac{nW}{N} \quad (7)$$

ここで， i 回パケット衝突後に，送信成功する場合のアップリンク伝搬遅延時間の期待値 $E[\tau_1]_i$ は， S_{ALOHA} ， N ，及び 1 パケット時間 L_t ，を用いて，

$$E[\tau_1]_i = (i + 1)NL_t(1 - S_{ALOHA})^i S_{ALOHA} \quad (8)$$

と表すことができる．これらの総和を求めることで，アップリンク伝搬遅延時間は，

$$E[\tau_1] = \sum_{i=0}^{\infty} (i + 1)NL_t(1 - S_{ALOHA})^i S_{ALOHA} \quad (9)$$

と求めることができ， $E[RTT]$ は，外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2 を加えて式 (10) で表すことができる．

$$E[RTT] = \sum_{i=0}^{\infty} (i + 1) \times NL_t(1 - S_{ALOHA})^i S_{ALOHA} + d_2 \quad (10)$$

3.1.2 タイムアウト時間の期待値： $E[T_o]$

文献 [13] で，TCP のタイムアウト時間 T_o は式 (10) で表されることが知られている．

$$T_o = rtt_{old} + 4rtt_{var} \quad (11)$$

ここで式 (12) の第 2 項は，パケット衝突回数を i, j として，遅延時間の差分絶対値のすべての組合せを求め，遅延時間の差分絶対値の期待値としている．これは文献 [13] に示されているように，TCP では分散 rtt_{var} はラウンドトリップ時間 rtt と直前のラウンドトリップ時間 rtt_{old} との差分絶対値を用いて算出しているためである．

$$E[T_o] = E[RTT] + 4 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} |E[\tau_1]_i - E[\tau_1]_j| \quad (12)$$

3.1.3 パケット棄却率： p

2. のネットワークモデルで，パケット棄却は，無線回線上の通信誤り，及びボトルネックリンクのパッファで発生するとした．ここで，ネットワーク全体のパケット棄却率 p について考えると，本ネットワーク構成では，図 6 のように無線回線の通信誤りによるパケット棄却率 p_{err} ，基地局パッファでのパケット棄却率 p_{buff} が直列であるので，式 (13) で表すことができる．

$$p = p_{err} + p_{buff} - p_{err}p_{buff} \quad (13)$$

以上の解析結果より，式 (1) にあてはめる

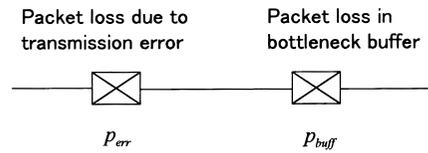


図 6 パケット棄却率 p の導出
Fig. 6 Deriving packet loss rate p .

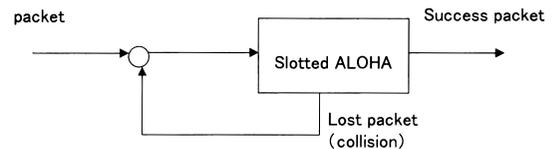


図 7 スロット付きアロハ方式パケットフローのモデル
Fig. 7 The model of slotted ALOHA packet follow.

$E[RTT], E[T_o], p$ は、それぞれ式 (10), (12), (13) で表すことができ、2. のワイヤレスセルラネットワークモデルにおける TCP スループット S_{TCP} は、下記をパラメータとして解析的に求めることができる。

- 無線端末数 n
- 1 パケット時間 L_t
- 各無線端末でのパケット送信間隔 N
- 外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2
- 無線回線の通信誤りによるパケット棄却率 p_{err}
- 基地局バッファでのパケット棄却率 p_{buff}

3.2 シミュレーションによる検証

シミュレーションは、ネットワークの特性評価研究で用いられている ns2 [14] を使用した。今回の検討では、図 7 のパケットフローに基づいたスロット付きアロハ方式による伝搬遅延時間算出ライブラリーを作成し、ns2 にリンクしてシミュレーションを行った。ここで、パケットの発生は図 8 に示したように、ある無線端末 A に着目した場合に、前回のパケットの発生から RTT 時間経過後にウィンドウサイズ W 個のパケットが発生するとした。つまり、トラヒックの発生を分布関数で表すのではなく、1 パケットごとにその動きをシミュレートしている。また図 9 に示したように棄却パケットの再送も、1 パケットごとにその動きをシミュレートしている。なお本論文では、トラヒック量の調整は TCP のふくそう制御に委ね、データリンク層レベルで指数バックオフ再送などのトラヒック量の調整は行わないものとし、再送間隔 t (スロット) については、 $1 \leq t \leq 2N$ ($t = 1, 2, \dots, 2N, N$ はパケット送信間隔) からランダムに選択することとした。つまりパケットの再送間隔の平均値が N となる一様分布として与えた。

ここで、ラウンドトリップ時間 RTT とパケット送信間隔 N がどのような関係にあるのかを説明する。ラウンドトリップ時間 RTT は、式 (4) で示したように、アップリンク伝搬遅延時間 τ_1 と外部ネットワーク滞在遅延時間 d_2 の和として表すことができる。このアップリンク伝搬遅延時間 τ_1 は、図 9 に示した再送間隔 t ($1 \leq t \leq 2N$ ($t = 1, 2, \dots, 2N, N$ はパケット送信間隔)) で各無線端末がランダムにパケットを送信した場合に、パケットの衝突が回避されて通信が成功するまでの時間である。このように、パケット送信間隔 N はアップリンク伝搬遅延時間 τ_1 を介してラウンドトリップ時間 RTT と関係している。

解析、シミュレーションの比較結果を図 10, 図 11

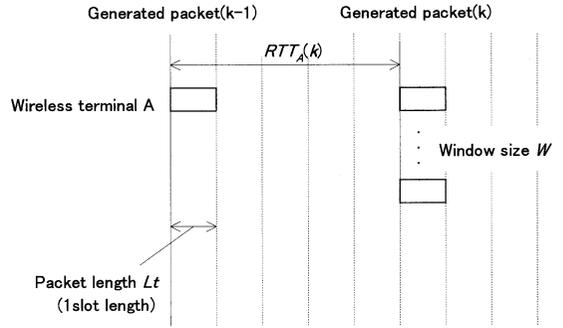


図 8 パケットの発生モデル
Fig. 8 The model of generating packet.

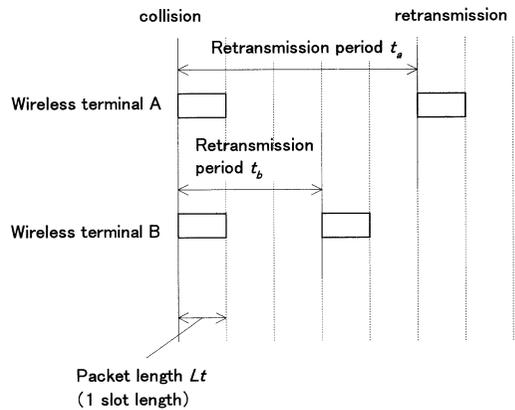


図 9 棄却パケットの再送モデル
Fig. 9 The model of retransmission for the packet loss.

に示す。比較は、無線回線の通信誤りによるパケット棄却率 p_{err} と、基地局バッファでのパケット棄却率 p_{buff} を合わせたネットワーク全体のパケット棄却率 p に対する 1 コネクション当りの TCP スループットについて行った。ここで評価パラメータとして設定した値を表 1 に示す。

比較評価は、まず p_{err} を変化させてシミュレーションを行い、そのときに観測される p_{buff} とともに式 (13) によりパケット棄却率 p を算出し、この p に対する TCP スループット (シミュレーション値) を求めた。次に、解析においてもシミュレーションと同様の (p_{err}, p_{buff}) の組合せを与え、式 (13) によりパケット棄却率 p を算出し、この p に対する TCP スループット (解析値) を求めた。なお表 2, 表 3 に図 10, 図 11 を算出する際に用いた p, p_{err}, p_{buff} の具体的な設定値を示した。ここで各値は、図 10, 図 11 の

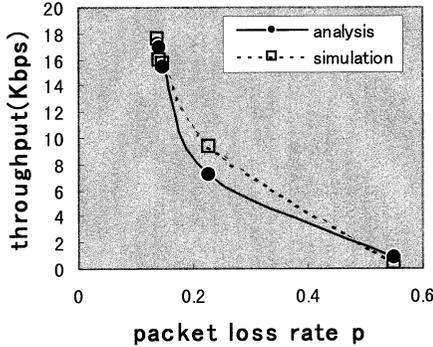


図 10 TCP スループット比較 (無線端末数 5)
Fig. 10 TCP throughput comparison (the number of wireless terminals is 5).

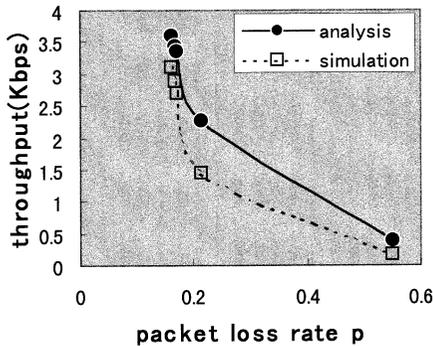


図 11 TCP スループット比較 (無線端末数 30)
Fig. 11 TCP throughput comparison (the number of wireless terminals is 30).

各値を左から順に見たとき (p の小さい順) に、表 2、表 3 の各値が上から順に相当している。図 10、図 11 では、解析、シミュレーション値とも、1 コネクション当りの TCP スループットに無線端末数を乗じた使用帯域に換算すると、最大でもボトルネックリンクの有線帯域 128 kbps 以下の約 90 kbps を示し、またパケット棄却率 p が 0.5 と非常に大きな値のときは、TCP のタイムアウト制御のため、送出される TCP セグメントが制限されて、スループットは 0 kbps に近い状態を示している。

更に無線端末数 n とパケット送信間隔 N を変更し、実効トラフィック G を変化させたときの特性差を図 10、図 11 から読み取ると、図 10 では解析値のほうがシミュレーション値より小さな値を示しており、図 10 に比べて G がより大きい図 11 では、逆に解析値は大きな値を示している。本論文の解析では、TCP

表 1 評価パラメータ (解析, シミュレーション比較)
Table 1 Evaluation parameter (comparison of analysis and simulation).

無線帯域 B_f	2 Mbps
有線帯域 B_w	125 Kbps
無線端末数 n	5 nodes, 30 nodes
パケット長 L	100 bytes
パケット送信間隔 N	35 packets (5 node), 70 packets (30 node)
外部ネットワーク滞在遅延時間 d_e	100 ms

表 2 パケット棄却率設定値 (無線端末数 5)
Table 2 Setting value of packet loss rate (the number of wireless terminals is 5).

p	p_{err}	p_{buff}
0.138	0.054	0.089
0.140	0.098	0.047
0.148	0.113	0.039
0.226	0.213	0.017
0.55	0.55	0

表 3 パケット棄却率設定値 (無線端末数 30)
Table 3 Setting value of packet loss rate (the number of wireless terminals is 30).

p	p_{err}	p_{buff}
0.163	0.054	0.115
0.167	0.098	0.077
0.171	0.113	0.065
0.213	0.213	0.0
0.55	0.55	0.0

のスループット S_{TCP} を導出する式 (1) と、スロット付きアロハ方式のスループット S_{ALOHA} を導出する式 (5) において近似を用いており、式 (1) では、文献 [11] で述べられているように TCP のスロースタート制御 (ウィンドウサイズをあるしきい値まで指数的に増加する制御) をモデルとして組み込んでいないため、 S_{TCP} の値は実測データより値が小さくなる。また式 (5) では、実効トラフィック $G < 1$ の場合は、 G が小さいほど、 S_{ALOHA} の値は実測データより値が小さくなる。ここで S_{ALOHA} が小さくなると、式 (10) のラウンドトリップ時間 RTT 、及び式 (11) のタイムアウト時間 T_o が大きくなり、最終的に式 (1) の S_{TCP} は小さくなる。

すなわち、解析により得られた S_{TCP} は実測値に比べて、式 (1) の近似により小さい値となるが、式 (5) の近似により実効トラフィック G によっては、逆に大きくなる。このため、図 10 では解析値のほうがシミュレーション値より小さな値を示し、図 10 に比べて G がより大きい図 11 では、解析値がシミュレーション値よりも大きな値を示しているものと考えられる。全体的には、パケット棄却率に対する TCP スループットの劣化傾向はほぼ一致しており、傾向を評価する場合には、解析モデルを用いることができることが示さ

れている。

4. 数値例と考察

ここでは、3. で示した解析手法を用いて、アップリンクにおけるデータリンク層として採用したスロット付きアロハ方式、及び、無線回線上の通信誤りがTCPスループットに与える影響について考察する。

ここでネットワーク全体のパケット棄却率 p は、式(13)に示したように、 $p_{buff} \gg p_{err}$ のときは、 p_{buff} が支配的となり、逆に $p_{err} \gg p_{buff}$ のときには p_{err} が支配的となる。本章で評価検討する場合には、簡単のため p_{buff} または p_{err} どちらかが十分大きい場合について考えるものとする。すなわち、各評価において p_{buff} または p_{err} どちらか一方を 0 として評価を行った。

4.1 データリンク層が TCP スループットに与える影響

パケット送信間隔 N に対するスロット付きアロハ方式のスループット S_{ALOHA} と TCP スループット S_{TCP} の変化を図 12, 図 13 に示す。ここで 3. の解析モデルを用いるにあたって、まずネットワーク上で観測される送信間隔 N を変化させたときのパケット棄却率 p の値をシミュレーションを用いて求めた。そ

の結果が図 14 である。次に図 14 に示された N と p の値、及び 3. の解析モデルを用いて図 12, 図 13 の結果を算出した。ここで、図 12~ 図 14 の算出時に用いたパラメータは、表 4 に示す値を用いた。

図 12 より、 N が 100 前後の場合に、データリンク層のスループットである S_{ALOHA} は最大となることがわかる。ところが TCP 層で見ると、そのような N の値では、スループットは最大とはなっていないことが図 13 よりわかる。この原因は、図 14 からわかるように、データリンク層のスループットが最大になるような N の値のときは、流入するトラフィック量が多くなりすぎることによって、基地局バッファにおいてパケット棄却が発生してしまうためである。そのため、いくらデータリンク層のスループットが大きくても、パケット棄却による TCP のスループット低下を引き起こしている。このことからわかるように、データリンク層のパラメータを決める際にも、単にデータリンク層に着目するだけでは最適な値を決定することはできず、更にその上位層である TCP に与える影響を考慮したうえで決めることが必要である。

なお本結果は、無線帯域が有線帯域より大きく有線回線がボトルネックリンクとなり、図 14 に示したように基地局バッファで TCP セグメントが棄却されることで、TCP のスループット低下を引き起こす場合

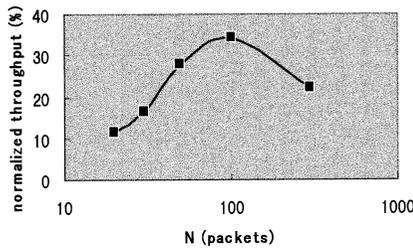


図 12 スロット付きアロハ方式スループット S_{ALOHA}
Fig.12 Slotted ALOHA throughput S_{ALOHA} .

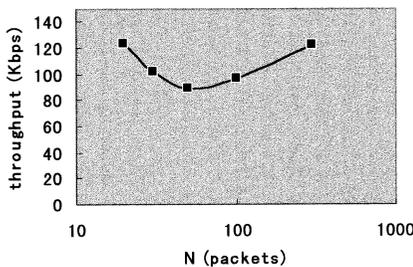


図 13 TCP スループット S_{TCP}
Fig.13 TCP throughput S_{TCP} .

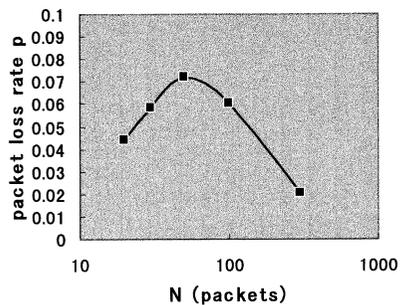


図 14 基地局バッファでのパケット棄却率
Fig.14 Packet loss rate in the BS buffer.

表 4 評価パラメータ (S_{TCP} , S_{ALOHA} 比較)
Table 4 Evaluation parameter (comparison of S_{TCP} and S_{ALOHA}).

無線帯域 B_r	2 Mbps
有線帯域 B_s	125 Kbps
無線端末数 n	30 nodes
パケット長 L	100 bytes
基地局バッファサイズ	50 packets
無線回線の通信誤りによるパケット棄却率 p_{err}	0
外部ネットワーク滞在遅延時間 d_e	0 ms

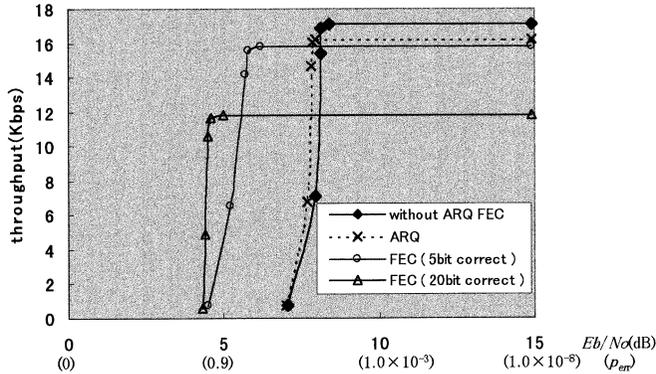


図 15 誤り訂正方式の比較
Fig. 15 Comparison of error correcting method.

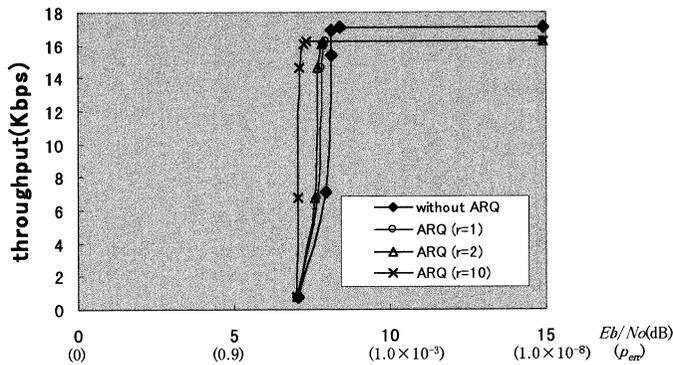


図 16 ARQ 再送回数に対する TCP スループットの変化
Fig. 16 TCP throughput appearance by ARQ retransmission numbers.

の結果である。

逆に、有線帯域が無線帯域より大きい場合には、2. の [トラフィックフロー] で述べたように、基地局でのパケット棄却が発生せず、TCP のふくそう制御が働かないため、本結果は当てはまらない。

4.2 無線回線上の通信誤りによる影響

スロット付きアロハ方式を用いた場合における、無線回線上の通信誤りに対する TCP スループットを図 15 に示す。ここで図 15 は、3. の解析モデルで、無線回線の通信誤りによるパケット棄却率 p_{err} を変化させて算出している。また誤り訂正手法としては、ARQ と FEC について検討する。ここで ARQ は、Go back N 再送方式について検討する。ARQ の再送回数は 1 回、通信時のオーバーヘッドは PIAFS (PHS Internet Access Forum Standard) プロトコル [15] のフレームフォーマットに占めるオーバーヘッドの割合を参考

表 5 評価パラメータ (通信誤り)

Table 5 Evaluation parameter (communication error on the radio link).

無線帯域 B_f	2 Mbps
有線帯域 B_s	125 Kbps
無線端末数 n	5 nodes
パケット長 L	100 bytes
各無線端末でのパケット送信間隔 N	35 packets (図15, 図16算出時)0
基地局バッファでのパケット棄却率 p_{buff}	0
外部ネットワーク滞在遅延時間 d_e	0 ms

に 5% とした。一方、FEC は、Reed Solomon 符号を用いた方式について検討する。ここで、FEC (5 bit correct) は Reed Solomon (127, 117) を、また FEC (20 bit correct) は Reed Solomon (127, 87) を使用する。そのほか、図 15、図 16 算出時に用いた評価パラメータに関しては、表 5 に示した。なお、回線品質 E_b/N_0 に対する p_{err} の算出方法は付録に記した。

図 15 に示すように、 E_b/N_0 が 8 dB より小さく、無

線回線上の通信誤りが頻繁に発生するようになると、TCP スループットは急激に低下していることがわかる。このため、ARQ や FEC といった誤り訂正手法を導入することで、スループットの低下を防止することが考えられてきた。まず、スループットが低下し始める値に着目すると、ARQ を導入しても通信誤りが頻繁に発生する回線品質 8 dB 以下では、ARQ の再送フレーム自体も通信誤りにより棄却されるため、あまり効果がないことがわかる。一方、FEC を導入すると、5 ビット誤り訂正能力の FEC でも、スループットが低下する点は約 6 dB まで改善されている。更に誤り訂正能力を高め、20 bit とすると、更に開始点を小さくすることができる。しかしながら、FEC のオーバーヘッドが大きくなることにより、スループット自体は低くなってしまふ。したがって、回線品質に応じて適切な誤り訂正方式を用いる必要がある。

図 16 ではデータリンク層の再送回数を変化させたときに、性能にどのような影響を与えるかを示した。その結果、再送回数を増やしてもあまり効果がないことがわかる。これは、再送回数を増やしても、通信誤りが頻繁に発生する回線品質では、上述したように ARQ の再送フレーム自体が、通信誤りにより棄却されてしまうためである。

本節では誤り訂正手法が TCP の性能に与える影響について検討した。TCP のスループットは式 (1) で示されているように、パケット棄却率 p 、ラウンドトリップ時間 RTT、タイムアウト時間 T_o をパラメータとして求めることができる。今回の検討では、誤り訂正手法を用いることによる遅延時間は、伝搬遅延時間 1 ms に含まれ、TCP のスループットに与える影響は無視できるほど小さいと仮定して検討を行った。このため、パケット棄却率 p をより小さくすることができる FEC を用いることが、TCP スループットの向上につながっている。

5. む す び

本論文では、スロット付きアロハ方式のパケット衝突で発生する遅延時間が、上位層の TCP ふくそう制御のベースになっている RTT (Round Trip Time) に与える影響を考慮して、ワイヤレスセルラネットワークにおける TCP スループットの性能評価を行った。その結果、単にデータリンク層の性能を向上させることが TCP の性能を向上させるのではなく、すなわち単に各レイヤに関して単独に性能向上を考える

のではなく、全体としてバランスのとれたシステム構成を行うことが必要であることが明らかになった。一方、下位層にスロット付きアロハ方式を用いた場合における無線回線上の通信誤りが、TCP スループットに与える影響、更に誤り訂正手法として ARQ と FEC を用いた場合の TCP スループット性能評価についても評価を行った。その結果、回線品質に応じて通信時のオーバーヘッドと誤り訂正能力を考慮した適切なパラメータを選択することで、TCP スループットが向上することを示した。

今回対象としたモデルでは、ACK は棄却されないものと仮定したが、ACK が棄却される場合、更にボトルネックが基地局バッファ以外に存在する場合の性能評価については、今後の研究課題とする。

文 献

- [1] <http://www.itu.int/imt/>
- [2] H. Balakrishnan and R.H. Katz, "Explicit Loss Notification and Wireless Web Performance," Proc. IEEE GLOBECOM'98 Internet Mini-Conference, Nov. 1998.
- [3] P. Sinha, N. Venkitaraman, R. Sivakumar, and V. Bharghavan, "WTCP: A Reliable Transport Protocol for Wireless Wide-Area Networks," Proc. ACM MOBICOM'99, pp.231-241, Aug. 1999.
- [4] A. Bakre and B.R. Badrinath, "I-TCP: A Indirect TCP for Mobile Hosts," Proc. 15th International Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS), May 1995.
- [5] H. Balakrishnan, S. Seshan, and R.H. Katz, "Improving Reliable Transport and Handoff Performance in Cellular Wireless Networks," Wireless Networks, vol.1, no.4, Dec. 1995.
- [6] R.D.J. van Nee, R.N. van Wolfswinkel, and R. Prasad, "Slotted ALOHA and code division multiple access techniques for land-mobile satellite personal communications," IEEE J. Select., Areas Commun., vol.13, no.2, pp.382-388, Feb. 1995.
- [7] Z. Liu and M. El Zarki, "Performance analysis of DS-CDMA with slotted ALOHA random access for packet PCNs," Wireless Networks, vol.1, no.1, pp.1-16, 1995.
- [8] R. Prasad, CDMA 移動体通信システム, 倉本 實 監修, 安達文幸 訳, 科学技術出版社, 1997.
- [9] R. Prasad and T. Ojanpera, "An Overview of CDMA Evolution toward Wideband CDMA," IEEE Commun. Surveys, vol.1, no.1, Fourth Quarter 1998.
- [10] 橋本 明, 山後純一, 山岸運夫, "DoCoMo における伝送網構築への取り組み," NTT DoCoMo テクニカルジャーナル, vol.7, no.4, pp.6-12, 2000.
- [11] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling TCP Throughput: A Simple Model and

its Empirical Validation,” Proc. ACM SIGCOMM’98, Sept. 1998.

[12] 小川 明, 山里敬也, CDMA 方式と次世代移動体通信システム, トリケップス社, 1996.

[13] W.R. Stevens, “TCP/IP Illustrated,” vol.1, in The Protocols, Addison-Wesley, 1994.

[14] <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

[15] <http://www.mitf.arib.or.jp>

[16] 佐藤拓郎, CDMA 技術の基礎から応用まで, リアライズ社, 1997.

付 録

回線品質 E_b/N_0 に対するパケット誤り率 p_{err} の算出方法

本論文では, 物理層の変調方式として IMT-2000 の CDMA 方式で用いられることが予想される QPSK 変調を対象とする. QPSK 変調の場合, ビット誤り率 p_b は以下の誤差関数を用いた式で表すことができる. 算出方法については文献 [16] を参照されたい.

$$p_b = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (\text{A}\cdot 1)$$

ビット誤り率 p_b とパケット誤り率 p_{err} の関係は

- 誤り訂正を用いない場合, 1 フレーム当りの bit 長を l とすると, 以下の式で表すことができる.

$$p_{err} = 1 - (1 - p_b)^l \quad (\text{A}\cdot 2)$$

- ARQ を用いた場合, 1 フレーム当りの bit 長を l , 再送回数を r とすると, 以下の式で表すことができる.

$$p_{err} = \{1 - (1 - p_b)^l\}^{r+1} \quad (\text{A}\cdot 3)$$

- FEC を用いた場合, 1 フレーム当りの bit 長を l , 訂正可能 bit 数を c とすると, 以下の 2 項分布の式で表すことができる.

$$p_{err} = 1 - \sum_{i=0}^c \binom{l}{i} p_b^i (1 - p_b)^{l-i} \quad (\text{A}\cdot 4)$$

式 (A・1) ~ (A・4) の関係より, 誤り訂正なしの場合, ARQ, FEC 使用した場合の回線品質 E_b/N_0 に対するパケット誤り率 p_{err} を算出できる.

(記号)

E_b : 1 bit 当りのエネルギー

N_0 : 雑音エネルギー

p_{err} : パケット誤り率

p_b : ビット誤り率

r : ARQ 再送回数

c : FEC 誤り訂正可能 bit 数

l : 1 フレーム当りの bit 長

(平成 13 年 6 月 4 日受付, 10 月 10 日再受付)



三好 昌弘 (正員)

昭 63 神戸大・工・電気電子卒・同年 (株) デンソー入社・車載 LAN, ITS ネットワークに関する研究開発に従事.



菅野 正嗣 (正員)

昭 61 阪大・基礎工・情報卒・昭 63 同大大学院博士前期課程了・同年三田工業(株) (現, 京セラミタ(株)) 入社・平 8 より大阪府立看護大・医療技術短大・助教授・通信ネットワークの設計・性能評価, 無線通信システムに関する研究に従事・工博・平 3 本会論文賞受賞・IEEE, ACM 各会員.



村田 正幸 (正員)

昭 57 阪大・基礎工・情報卒・昭 59 同大大学院修士課程了・同年日本アイ・ピー・エム(株) 入社・同社東京基礎研究所を経て, 昭 62 阪大大型計算機センター助手, 平 1 同大・基礎工・助手, 平 3 同講師, 平 4 同助教授, 平 11 同教授, 平 12 同大サイバーメディアセンター教授・この間, 待ち行列理論, システム性能評価, 広帯域通信網などの研究に従事・工博・IEEE, ACM 各会員.