

移動体通信システムへの待ち行列理論の応用

高橋 豊

京都大学大学院情報学研究科

〒 606-8501 京都市左京区吉田本町
TEL:075-753-5503 FAX:075-753-3358
E-mail:takahashii.kyoto-u.ac.jp

梗概

携帯電話の急速な普及に代表されるように、無線による携帯・移動体通信は今後の通信インフラの主要な部分を担おうとしている。また新規アプリケーション導入に伴う度々のネットワーク障害でも分かるように、その性能評価の重要性はあらためて指摘するまでもなく、オペレーションズ・リサーチ、中でも特に待ち行列理論の観点からの研究が今後益々重要になると思われる。本稿では、最近の、さらには研究途上の携帯・移動体通信を概観し、そのシステム性能評価に関して、研究課題を考察する。

1 序

待ち行列理論（あるいはトラヒック理論）は、その歴史を1909年のA. K. Erlangの論文まで遡ることができ、OR関連諸分野の中でも長い歴史を誇る分野の1つである。この間、理論的な研究に関しては新しいテーマが枯渇した時期が幾たびも見られたが、幸いにブレイクスルーのきっかけを与える新しい応用分野が出現した。主なものをまとめると次のようになる。

- 1960年代：電話交換網
- 1970年代：パケット交換網
- 1980年代：LAN
- 1990年代：MAN/WAN、ATM、B-ISDN

1969年に4台のコンピュータを繋ぐことからコンピュータ・ネットワークの礎を築き、今日のインターネット興隆に大きな貢献を果たし、自称・他称「インターネットの父」と呼ばれるL. Kleinrockが、通信ネットワークの性能評価における待ち行列理論の重要性を説き、この分野での応用研究が1970年代から活発に行われてきた。彼が1990年代中頃からNomadic Computing[10]を唱え出したこと、あるいは卑近な例では我が国において携帯電話・PHSの加入者が有線電話のそれを越えて6600万を超えようとしており、MCPC（モバイルコンピューティング推進コンソーシアム）の推定では、2004年度には7820万に達すると予測されていることから分かるように、2000年代における応用分野として期待されるものに携帯・移動体通信がある。

Alexander Graham Bellが電話機を1876年に発明し、1890年に最初の電話網が築かれ、有線電話が100年以上の歴史を持つのに対し、移動体電話が「自動車電話」という形で商用化されたのは1979年で

あり、その普及の速さには大きな差がある。家電製品など各家庭で現在広く使用されているものは、世帯普及率が10%を超えると以降は爆発的に浸透することが良く知られているが、我が国で有線電話では76年を要したのに、携帯・自動車電話では15年で到達した。

移動・携帯電話が従来の電話網と違うのは、移動に伴い、使用するリソースが変化すること（これをハンドオフと呼ぶ）であり、しかもサービスが開始されても終端までサービスを受ける保証が無いことである。これ以外にも無線を用いた多くのシステムが情報通信のインフラストラクチャを大きく変えようとしている。その主なものは次の通りである。

- IMT2000(International Mobile Telecommunication 2000)
- 無線 LAN
- 短距離無線通信 (Bluetooth)
- ワイヤレス ATM
- 静止衛星通信
- 非静止衛星通信
- 軽量飛行物体通信

2 移動体電話

2.1 携帯電話の変遷

現在、世界中には11種のセルラー電話が存在するが、その変遷をまとめると次のようになる。

1. 第1世代 (G1) アナログ

FDMA(Frequency Division Multiple Access) が基本的技術である。

2. 第2世代 (G2) デジタル

現在広く使われているシステムであり、回線交換で音声のみならず、9.6kbpsでのデータ送信を提供している。パケット・データ送信をサービスする場合にはG2+あるいはG2.5と呼ばれる。主にTDMA(Time Division Multiple Access)が、一部CDMA(Code Division Multiple Access)が使われている。

我が国ではPDC(Personal Digital Cellular), cdmaOne, PHS(Personal Handyphone System)、アメリカではIS-95、ヨーロッパではGSM(Global System for Mobile Communication), DECT(Digital Enhanced Cordless Telephone)などが代表的である。例えばPDCは3回線を多重化するTDMA方式である。

3. 第3世代 (G3)

狭帯域 (N-ISDN) での統合型サービスを提供。次世代のシステムであり、IMT-2000はこれに属する。我が国においては2001年5月から、欧米においては2002年以降にサービスが開始される予定である。主にCDMAが使われようとしている。

4. 第4世代 (G4)

広帯域 (B-ISDN) での統合型サービス。2010年を目標に標準化が計られようとしている次世代のシステムである。

以上、アナログのFDMAからデジタルのTDMAへ、さらにはCDMAへと技術的変遷を遂げている。

2.2 無線ネットワークの構成

無線ネットワークは大別して次の3つからなる。

- アクセス網
BTS(Base Transceiver Station) と MS(Mobile Station) からなるネットワーク
TDMA, CDMA などの無線アクセスプロトコルで接続
一群の BTS は集中局 (Concentrator) を介して中継網に接続される。
- 中継網 広域網 (WAN) であり、通常は ATM 網のような高速有線網であるが、衛星リンクあるいは無線網の場合もあり得る。
- サービス網
移動体の位置管理、ファックス、音声メールなどのシステム管理・特殊サービスを行う。

無線ネットワークにおいては、有線網に比較し、周波数の割り当てによる非常に限られたリソースとより大きなビット誤り率のために、QoS の評価は有線網以上に重要である。特にビットの誤り率に関しては、前後のビットで相関が生じ、しかも時間に関しても変動し得るために従来のモデル化では対応できない場合があり、今後の研究が必要である。

さらに携帯電話においては、ますますパケット通信が比重を増すが、これにおいては多くの MS が通信回線を共有 (多元接続) するために MAC(Media Access Control) プロトコルが不可欠である。これまでに LAN 向けに種々の MAC プロトコルが提案されてきたが、その多くは主に固定接続を想定していた。今後は携帯電話のみならず、PAN(Personal Area Network)、HN(Home Network) などにおける移動体を中心に据えたプロトコル開発およびその性能解析がより一層活発になると期待される。

3 携帯電話のモデル化

i モードを始めとするパケット交換サービスも始まったが、多くは回線交換で運用されており、方式の変遷は有線電話と同じであるが、端末の移動に伴い中継局が変わる (ハンドオフと呼ぶ) ために、通話中であろうと、移動した先の中継局のサービスエリア (セルと呼ぶ) で回線が空いていなければ呼切断が発生する。一旦会話が始まった呼のサービスが中断するので、利用者にとってはダイヤルをしたときに回線に空きがないことによる呼損に比べ、サービス品質が大きく減じることになる。これを避けるために、一部の回線をハンドオフのために空けておく (回線留保、図 1 参照)、あるいは音声会話ではなく、非実時間的なデータ通信をしている回線に割り込みをかけ、この回線を使う方式 (割り込み優先権、図 2 参照) などが提案され、この解析も盛んに行われている。前者の場合にはトラヒックの状況に応じた留保すべき回線数、後者ではデータ送信の待ち時間の評価が重要になる。

3.1 携帯電話網の設計

G2 までは、通信可能圏内を如何に拡大するかが主眼であり、セルの配置、周波数割り当て、アンテナの設計などが中心的に議論された。従って設計は次の 4 ステップを経て行われた。

- セル基本配置
周波数の有効活用を図るためには BTS を中心とする円で表現されるセルが重なる面積を少なくすることが望まれる。さらにお互いに重なる面積を持つ隣接セルでの混信を避けるためには、これらに異なる周波数を割り当てる必要がある。この種類が最少であると周波数の再利用 (同じ周波数帯

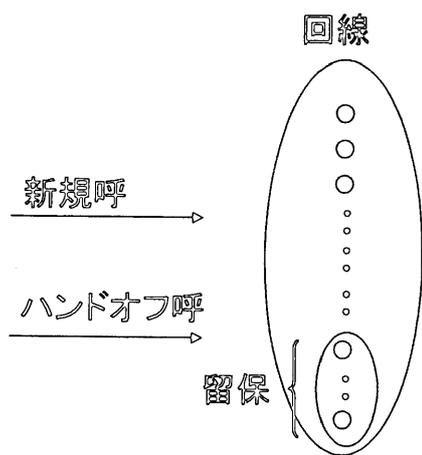


図 1: 回線留保持ち行列モデル

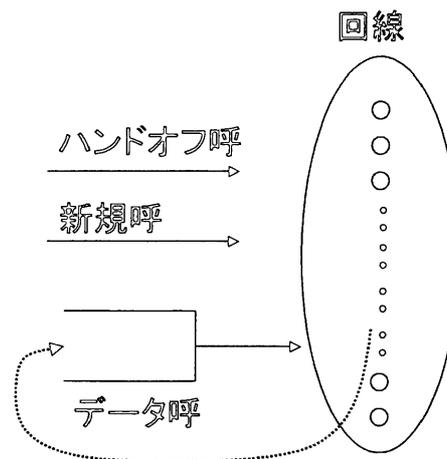


図 2: 回線割り込み待ち行列モデル

を干渉のないセルで同時に使用すること) 効率が上がる。これらを総合して、数学的には図3のような正六角形で平面を分割する方法が良く知られている。実際の設計においては地理的制約などのために、このような設計ができない場合もある。セルの半径は小さい程、周波数の再利用のため、1回線あたりのBTSの数が少なくなり、新規呼の呼損確率は小さくなる。一方ハンドオーバーがより頻繁に発生し、通話中の呼が途中で中断される不完了率が大きくなる。後者の確率は前者に比較し、利用者への不快感に大きな影響を与える。

- 伝播解析 (Propagation Analysis)
電波の伝播状況を実地検証し、無線到達圏を明確化
- 周波数割当 (Frequency Allocation)
各セル間の干渉を考慮し、周波数を割当
- 性能解析 (Radio Network Analysis)
QoS 評価量を求め、性能解析

上のことから分かるように、利用者からのトラフィック量はシステム的设计に僅かしか反映されない。今後のマルチメディア・トラフィックへの柔軟な対応、さらには CDMA の特徴を適切に捉えるためにはトラフィック状況を反映した設計が重要になる [?]

3.2 利用者トラフィックの空間的屬性の記述

空間的に広く分布する利用者トラフィックを数学的に簡明に記述するのは大きな課題である。トラフィックの強度のみならず、その空間的な広がり表現するための基本的な考え方には、次のものがある。

デマンド・ノード 利用者トラフィックを量的・空間的屬性を離散化して表現するために、最近提案され、ITUでも検討されつつある考え方で、空間的に散逸する大量のトラフィック・データをクラスタリングし、各クラスター内の呼量をそのクラスターの代表点に集中させて表現するものである。クラスタリングの細

かさが変わると代表点の数も変わることになる。これにより、中継局の配置が、施設配置問題として定式化が可能になる。

空間的確率過程 (Spatial stochastic processes) 設計に際しては過去のデータを使用するのが望ましいが、それが不可能な場合がほとんどである。この場合には確率過程モデルが使われる。通常は空間ポアソン分布が用いられるが、空間相型分布、空間 BMAP など提案されている。空間ポアソン分布は次式で与えられる。ある領域（面積を S 、トラフィック強度を λ ）において発生する呼の数を N とするならば

$$\text{Prob}[N = n] = \frac{\lambda S}{n!} e^{-\lambda S}$$

3.3 資源分割型から資源共有型へ

現行第2世代携帯電話は TDMA を基本的技術としているのに対し、UMTS(Universal Mobile Telecommunication System) の目標のもと標準化が最終段階に入ろうとしている IMT-2000 では CDMA(Code Division Multiple Access) が使われている。第2世代が従来の有線電話網と同じように、周波数帯あるいは時間スロットからなるシステムリソースを分割し、他の呼との競合を排した割り当てを行っているのに対し、第3世代においては利用可能なリソース全体を使って、各呼が送信を行う。従ってシステム負荷が軽度なときにはリソースをより効率良く使用可能である。一方相互干渉は不可避であるため、他の呼が発生する送信が自然雑音の如く軽微な影響しか及ぼさないように、拡散符号化を用いて工夫を凝らしている。このことは通信品質・秘匿性の向上をもたらすのみならず、システム設計に際しても大きな長所になっている。第2世代システムにおいては、呼の相互干渉を排除することが前提になっているため、各セルへの周波数の割り当てが重要な設計問題になっていた。この際には干渉を起こさないセルでは同じ周波数が使用（周波数の再利用）可能であるため、これを考慮する必要がある。従って与えられた周波数帯を効率良く割り当て、同時に通信可能な回線数を最大にするのが設計の重要な目標になる。これに対して第3世代の携帯電話においては、干渉を排除するのではなく、トラフィック・ソースが要求する通信品質を確保できる範囲内に干渉を抑えながらリソースを有効に活用する設計が可能であり、また設計後もトラフィックの軽重、要求品質の多様化に応じた BTS の追加および送信の動的な制御が可能であり、今後のマルチメディア・アプリケーションに柔軟に対応できる利点を有している。例えば提供可能な回線数も一定ではなく、要求する通信品質の1つである SIR(Signal-to-Interference Ratio) に応じて回線容量が変わるためソフト・キャパシティーと呼ばれる。従って CDMA の場合には呼損確率の代わりに、SIR が目標値を下回る劣化確率(Outage probability) が性能評価量として用いられるようとしている。この確率を評価するには例えば次式が良く知られている [8]。 x を端末から BS までの距離、 k を同時送信呼数とすると

$$p(x, k) = Q \left(\frac{S_{\max} - l(x) - m_s(k)}{\sqrt{\sigma_s^2(k) + \sigma_{sh}^2}} \right)$$

上式で S_{\max} は端末の最大送信電力、 $l(x)$ は距離 x 伝播後の信号損失、 $m_s(k)$ と $\sigma_s(k)$ は BTS で受信した MS からの信号電力の平均と標準偏差、 σ_{sh} は log-normal shadowing の標準偏差。 shadowing とは伝送路に沿った建物などによる信号への影響を表し、デシベルで表現したときに正規分布に従うとモデル化することを log-normal shadowing という。

CDMA は F/TDMA に比較し、各セル毎に周波数帯の再利用が可能であり、周波数の割り当てに関する設計問題が必要ではなく、システム設計において大いに負荷が軽減される。

今後は呼損確率、通話品質などの利用者の観点からの評価量を最良にする設計・運用が重要になる。これまで数理計画・組み合わせ最適化からのアプローチが中心であったが、これからは待ち行列理論/トラフィック理論の観点からの研究が重要性を増すと思われる。

また CDMA の出力制御がマルチメディア通信にも適用されたならば、通信路の回線速度は最も厳しいビット誤り率 (BER) 制約を持つトラヒックで制限を受けることになる。CDMA においては拡散符号方式を用いるために厳しい BER 制約を守るためには同時送信可能なパケット数が少なくなる。例えば音声パケットでは、 10^{-3} であるのに対して、データパケットでは 10^{-9} であり、従って BER 制約を満足させながらこれらを同時に送信するならば、一番厳しい BER 制約に従わざるを得ず、その結果同時送信されるパケット数が減少し、回線が無駄に使用することになる。

このような状況ではマルチメディア・パケットの送信スケジューリングが重要となる。同時に送信するパケットは BER 制約のバラツキが少ないように、しかも実時間性の高いパケットほどタイムアウトが短いことを考慮したスケジューリングを行う必要がある。これを待ち行列モデルとして捉えるならば、パケットの特徴に応じて優先権の異なるクラスを設けることになる。スループットを最大化あるいは送信の遅れを最小化するためのクラス数および優先権の与え方が、重要な研究テーマになり得る [1]。さらにはネットワークの輻輳度に応じて優先権を動的に付け替えることも考えられる。以上の記述においては中継局から各端末への送信を想定し、送信待ちであるパケットが一元管理されている場合を説明したが、逆方向である端末から中継局への送信に関してはパケット送信に際し、予めスロットの予約を行う場合には同じような問題に帰着できる。

その他の話題としては例えば次のようなものがある。

ハーフレートとフルレート 現在の電話における話題としてはハーフレートとフルレートに関するものがある。トラヒックが増加すると呼損確率が大きくなるが、これを改善する安価な方法が呼当たりの回線速度を下げるものである。例えば TDMA の場合にはスロットを 2 分割し、より多くの呼を接続する。細分する前をフルレートと呼ぶのに対し、細分後をハーフレートと呼ぶ。当然回線速度あるいは音質はフルレートの方が良くなる。呼によってはハーフレートでは送信できない場合もあり、ハーフレートの呼が飛び飛びにフレーム内に存在すれば、回線全体で 1 スロット以上の余裕があってもフルレートの呼を接続できないことが起こり得る。このような無駄を防ぐために再割当 (repack) と呼び、ハーフレートの呼が連続するようにスロットの配置を替えることが行われる。これは手続き的にはハンドオフと同じであり、余り頻繁に行うことを避けたい。一方でフルレートの呼損も低くしたいという要望もある。回線容量に占めるハーフレートの割合をどの程度に抑えるか、さらにはどのようなスロットの割当を行うかは、まだ研究の余地がありそうである。

multiple priority calls 音声とデータ、さらにはこれらの中で新規呼とハンドオフ呼を優先権で区別し、合計 4 種の優先権を持つ、割り込み優先型の待ち行列モデルを上記述べたが、さらに細かく優先権を設定し、HOL (Head-of-the-Line) priority, push-out, partial buffer sharing などを付随させたモデルが種々提案され解かれようとしている。

4 衛星通信

携帯電話では、数 km～数十 km をカバーエリアとする中継局をパッチワークのように配置してサービス提供地域 (いわゆる圏内) を拡張するが、海・湖・山・砂漠など人口が希薄な所は経済的にも、物理的にも困難が伴う。これを一気に解決しようというのが衛星通信である。かつては高度約 36,000km 上空を飛行する静止衛星が主体であったが、信号が地上から衛星を往復するに要する伝播遅延が 0.23 秒であり、電話には適さないことと、衛星打ち上げコストの低下のために、静止衛星よりも低軌道を飛行する周回衛星を介した通信サービスが普及しつつある。静止衛星通信では理論的には 3 機の衛星で世界中にサービス提供が可能であるが、軌道が下がると 1 機がカバーする範囲が狭まり、より多くの衛星が必要になる。

高度がゼロに近づくと伝播遅延が気にならない通話品質になるが、周回軌道を保持するために必要な燃料も増加し、衛星の寿命が短くなる。これらを大きく分けると2層のバンアレン帯を境に3つに分類される。

- 静止衛星 (GEO, Geo-stationary Earth Orbit):高度約 36,000km
- 中高度衛星 (MEO, Medium Earth Orbit):高度約 10,000~20,000km
- 低高度衛星 (LEO, Low Earth Orbit):高度約 500~2,000km

インマルサットを始めとする静止衛星もインターネットにおいて今後の有望視されるプッシュ型サービスあるいはストリーミング型サービスなどには重要な通信手段を提供するが、電話・遠隔会議などの実時間性が要求されるものにはLEO、MEOが大きく貢献することが期待されている。

代表的なものには次がある。

Iridium LEO、6つの異なる低高度(780km)軌道上を各11機の衛星が周回(周期約100分)。各衛星が直径約4400kmの円状の地域をカバーし、合計66機で地球を覆う(その他に6機が予備)。各衛星は48セルをカバーし、各セルの面積は120000平方マイル(=307200平方km)で、1衛星で3840本の回線を提供し、回線速度は4800bit/sで、通信方式はTDMA/CDMA。1997年5月5日にデルタIIロケットで最初の5機の衛星を打上げ、1日約100万ドルのコストが必要とのこと。

Iridiumの名前が示すように、当初その元素番号である77機必要であると試算されていたが、最終的には11機が削減され、大きな投資節約が図られた。この点で待ち行列理論が貢献した。しかしサービスを開始するまでに打ち上げの失敗が相次ぎ、サービス開始に必要な衛星が軌道上に揃うまでに3年以上かかり、初期の投資の回収に時間がかかりすぎたのと、遠距離通信に衛星間ホップを用い、これの制御の複雑さなどのために、1998年11月1日よりサービス開始したものの、1999年8月にICOとともにアメリカ連邦破産法Chapter11の適用を申請し、2000年3月に事業を廃止した。ところがアメリカ国防総省の支援を受け、復活することが2001年3月28日に発表されたところである[11]。

その他の衛星通信システムには例えばGlobalstar, Teledesic, Odysseyなどが知られている。

軽量飛行体を使うものには、例えば次がある。

無人飛行船方式 機械技術研究所の成層圏空中基地。高度約20kmの成層圏下層に太陽光発電装置搭載あるいはマイクロ波送電による飛行船を地上と相対的に静止した上空に浮かべる[?]

5 無線LAN

WLANに関しては2つの主要な標準化があり、次のようにまとめられる。

5.1 IEEE802.11

最大伝送速度は11Mbpsであり、MACプロトコルとして、CSMA/CA(Collision Avoidance)を使い、従来のEthernetがCSMA/CDを無線向けに改良している。Ethernetの性能解析に関しては多くの論文が発表されたが、それらが再び脚光を浴びようとしている。今後は無線特有の隠れ端末問題(信号の衝突が発生しても、当事者は気がつかないこと)をモデル化した解析が必要である[7]。

5.2 HIPERLAN

HIPERLAN(High PEformance Radio Local Area Networks)はETSI(European Telecommunications Standards Institute) RES-10 Groupで標準化が諮られており、さらに改良したものはHIPERLAN IIと呼ばれ、回線速度は6~54Mbpsを目指している。

HIPERLANでは多くのMT(Mobile Terminals)がAP(Access Point)と呼ばれる中心局の管理のもとで送受信を行う。MTは送信する前にAPへリクエストを送り、コネクションを開設する。コネクション毎にMTからAPへ、APからMPへ指定された時間に送信を行う。時間軸は2msに相当するMACフレームに切られており、これはさらに4つのサブフレームに分割されている。1番目のサブフレームでは、これに引き続くサブフレーム内で送信可能なMTの識別子およびその指定時刻を放送する。2番目のサブフレーム(DL Frame)ではAPからMTへの送信を行い、3番目(UL Frame)ではMTからAPあるいは他のMTへの送信を行う。最後(RA Frame)は送信のリクエストをランダムアクセスで送るためのサブフレームである。フレームの長さが一定であるときに、DL, UL, RAの比率をどのようにするか性能評価が必要である。RAを長くするとリクエストが素早くAPへ送られるが、それに答えて送信サービスを提供するDL,ULの長さが減じ、送信待ちが長くなる。さらにはDL,ULの比率もトラヒックの特徴により良否が変わる。音声为主体であれば、比率は1で良いだろうが、Webを始めとするインターネットへのアクセスであるならば、APからMTへのトラヒックは長時間依存性を持ち、DLの割合を高くする必要がある。有線ネットワークでのインターネット・トラヒックに関する種々の研究を生かした、無線LANでのリソースの割り当てに関して待ち行列の観点からの研究が待たれる。

CSMAプロトコルの改良は上記以外にも種々提案されているが、中でも有望視されているのが次のものである。

FS-CSMA(FIFO by Sets CSMA) 時間軸を等間隔に分け、同じ区間に送信するパケットが複数個発生した場合にはCSMAで競合解消をするものである。この方式では競合するパケット数を少なくするとともに、同じ時間区間に発生したパケットに関してはFIFOが保証されないが時間区間を単位としたときにはFIFOが確保され、より高いQoSが保証される。区間長を短く取れば、FIFO性が高まるが、オーバーヘッドが大きくなるのに対し、長く取ればランダム性が増し、トラヒックが高くなると競合解消時間が長くなる。この方式の性能解析、さらにはそれに基づく区間長の最適化が望まれる。

5.3 Bluetooth

PDA(Personal Digital Assistants)、デジタルカメラ、ノート・パソコン、携帯電話などの携帯情報機器を繋ぐ通信手段として無線によるad hocネットワークが今後重要になると思われる。その中でもBluetoothが目下有望視され、研究が行われている。これは短距離通信に向く低価格な無線通信技術であり、2.45GHzのISM帯を使用し、接続可能距離は最大10m、将来的には30mを視野に入れている。1999年7月に仕様の第1版が発表された。

通信方式は基本的にポーリングである。任意の端末がマスターと呼ばれる中心局になり、最大8端末からなるad hocなネットワーク(picocell)内の他端末(スレーブ)を順番にポーリングすることになり、ポーリング・モデルで記述が可能である(図3参照)。ポーリング・モデルとは待ち行列理論の中で精力的に研究された分野であり、複数の待ち行列に並び客を単一サーバが、決められたスケジューリング規則で順番にサービスを行うモデルである。Bluetoothでは、音声を始めとするsynchronous trafficとIPデータトラヒックのようなasynchronous trafficの両方を送信可能である。

スケジューリング規則としては、one-limited、exhaustive round robin、fair exhaustive pollingなど種々提案されている[?][?]。

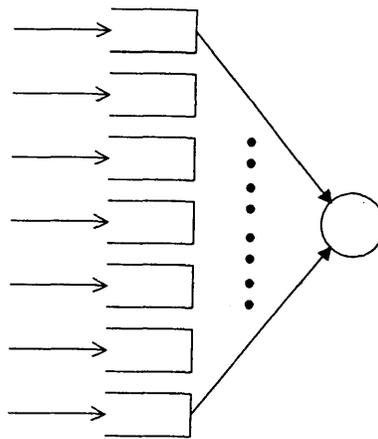


図 3: ポーリング・モデル

6 Wireless ATM (WATM)

WATM の標準化は 1996 年に ATM フォーラムのワイアレス部会で開始された。ATM の標準化は光ファイバーを通信回線に使用することを前提に始められ、ビット誤り率を 10^{-12} 以下と想定していた。一方ワイアレス環境下においては最大 10^{-2} にまでなることがあり、これを無線アクセス層 (Radio Access Layer) を追加することで解決しようとしている。さらに BTS の移動に伴う利用者の位置管理も必要である。

ワイアレスネットワークにおいては、ハンドオフと経路変更があり、ATM 網の connection-oriented な通信には向かない。さらに ATM は高品質な回線を想定しており、セル損失・誤りに関しては end-to-end で回復することになっているが、無線通信においてはビット誤り率が高くなり、回復が遅くなる。さらにインターネット環境で WATM を用いると、TCP のフロー制御はタイムアウトを基準に行っているため、誤りが発生する度に制御がかかり、円滑な送信が困難になる。これらを解決するために種々提案がなされているが、その性能解析が今後の課題である。例えば次のものがある。

データリンク層 WATM においては相対的に大きいのみならず相関のある誤り発生が性能に大きな影響を与え、再送制御 (ARQ(Automatic Repeat Request)) が大きな課題である。代表的な ARQ としては、GBN(Go-Back-N) と SR(Selective Repeat) がある。これに関連して送信単位である PDU(Protocol Data Unit) のブロック長を適切に選択することは性能を大きく左右する。送信効率からは長い方が良く、再送量を少なくするには短い方が良い。従って状況により多様に変化し、相関も見られるビット誤り率を観察しながら、高い伝送効率を保つためのパラメータの決定は OR 的課題の一つである。ここで検討の対象となるものはブロック長、ウィンドーサイズであり、これらを静的・動的に決定する必要がある。

衛星用 MAC プロトコル 静止軌道上 (GEO) の衛星に交換処理能力を搭載し、多元接続する方式が多く提案されている。往復伝播遅延が大きいためパケット毎にランダムアクセスを行うと送信遅延が大きくなるために実用的ではなく、最初のパケットをランダムアクセスで送信に成功すると自動的に周期的な送信機会が得られる予約を併用した方式が種々あるが、衛星を介してインターネット接続する機会が増え

ることを期待し、さらにはバースト的なインターネットトラフィックの特徴も勘案して、この研究が再び活発になると思われる。

7 結び

利用者端末のモビリティに柔軟に対応し、シームレスな通信環境を構築するには、無線による移動体通信は不可欠であり、基盤技術に関する研究開発のみならず、限られた資源である無線周波数帯を有効に活用するためのモデル化と性能解析は重要な研究課題である。有線ネットワーク以上に待ち行列理論の貢献が期待される。

参考文献

- [1] I.F. Akyildiz, H. Uzunalioglu and M. Bender, "Handover management in low earth orbit satellite networks," *Mobile Networks and Applications*, vol.4, pp.301-310(1999).
- [2] I.F. Akyildiz, D.A. Levine and I. Joe, "A slotted CDMA protocol with BER scheduling for wireless multimedia networks," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol.7, pp.146-158(1999).
- [3] E. Ayanoglu, K.Y. Eng and M.J. Karol, "Wireless ATM: limits, challenges and proposals," *IEEE Personal Communications*, vol.3, pp.18-34(1996).
- [4] D. Grillo, "Personal communications and traffic engineering in ITU-T: The developing E.750-series of recommendations," *IEEE Personal Communications*, vol.4, pp.16-28(1997).
- [5] N. Johansson, U. Korner and P. Johansson, "Performance evaluation of scheduling algorithms for Bluetooth," *Broadband Communications* (Eds. D.H.K. Tsang and P.J. Kuhn), Kluwer, Massachusetts, pp.139-150(1999).
- [6] N. Johansson, M. Kihl and U. Korner, "TCP/IP over the bluetooth wireless ad-hoc network," *Networking 2000* (Eds. G. Pujolle, H. Perros, S. Fdida, U. Korner and I. Stavrakakis), *Lecture Notes in Computer Science 1815*, Springer, pp. 799-810(2000).
- [7] W.M. Moh, D. Yao and K. Makki, "Analyzing the hidden-terminal effects and multimedia support for wireless LAN," *Computer Communications*, vol.23, pp.998-1013(2000).
- [8] P. Tran-Gia, K. Leibnitz and K. Tutschku, "Teletraffic issues in mobile communication network planning," *Telecommunication Systems*, vol. 15, pp.3-20(2000).
- [9] D. Vazquez-Cortizo and J. Garcia, "A collision resolution algorithm for ad-hoc wireless LAN," *Broadband Communications* (Eds. P. Kuhn and R. Ulrich), Kluwer, Massachusetts, pp.119-130(1998).
- [10] <http://fmg-www.cs.ucla.edu/travler98/welcome.html>
- [11] http://www.iridium.com/corp/iri_corp-news.asp?newsid=15
- [12] <http://www.mpt.go.jp/pressrelease/japanese/denki/990910j602.html#1>