

# 無線通信ネットワークに関する性能評価

岳 五一

キーワード：トラヒック理論と応用，無線通信ネットワーク，システムの性能解析と評価，通信ネットワークの最適な性能

## 1. はじめに

特集号「21世紀を最適化する女性たち」のオーガナイザー，吉瀬章子先生から思わぬ執筆のご依頼を受けた時，この上なく光栄に感じた。しかし，専門が情報通信ネットワークの性能評価や確率モデルが中心であるため，「最適化」ではない筆者に声をかけて下さった御決断にお応えできるか不安になった。

ここ数年間，共同研究，博士取得希望者や博士研究員の研究指導等を行いつつ，若干の応用分野において最適化手法あるいは方法論を応用した研究をしてきた。その過程で，確率的手法を適用した情報通信ネットワークや確率システムの最適な資源配分と最適な制御，情報通信ネットワークにおけるトラヒック工学設計と最適化，離散事象システムの最適制御に関する研究成果の一部が，論文誌“Optimization”，“Optimization Methods and Software”，“Discrete and Continuous Dynamical Systems”等の最適化とその応用を主に扱う国際学術雑誌に発表された。また，筆者のもとで博士号を取得した上海大学 Qiying Hu 教授との共著書「Markov Decision Processes with Their Applications」が今年の9月に Springer-Verlag より出版される予定である。これは，筆者らがこれまでに提案した各種マルコフ決定過程の性質に関する直接的な証明方法や最適性方程式の導出方法，また通信システム，信号処理のような離散事象システムの最適制御や不確定環境における最適取替えへの適用例等をまとめたものである。

これらの研究の関係で，または情報通信ネットワークの設計および制御のための基礎理論である通信トラ

ヒック理論，トラヒックのモデル化手法と性能評価手法，通信サービス品質に関連する最適な制御法等に関する研究に当たって，最適化手法を研究対象とする諸先生方との交流も度々あり，最適化とその応用に関わる国際会議においても多数の論文を発表してきた。これらを契機に国際的にも著名な最適化の分野の先生方にお目にかかることも多く，最適化の世界に縁を持つようになった。

このような経緯によってか，今回，最適化の分野で優れた研究をしておられる吉瀬章子先生，池上敦子先生をはじめ，特集号の執筆をされる先生方と共に原稿を書かせて頂くことになったかと推察する。そして恐縮ながら，この特集の執筆者の皆様のように最適化に関する，あるいは最適化の応用に関連するテーマとは異なるが，やはり最適化の重要な応用分野の一つである情報通信ネットワーク，特に筆者が主として研究してきた無線通信ネットワークの性能評価の一端を紹介させて頂きたいと思う。

また吉瀬先生から，筆者が chair をしている ICOTA 7 についても紹介してほしいとのご意向であったので，まず少しスペースを割いて紹介させて頂き，皆様の多大なご支援とご鞭撻を頂きたい。来年の2007年12月12-15日に神戸国際会議場で The 7th International Conference on Optimization: Techniques and Applications (ICOTA 7)，日本語名：「第7回最適化の手法と応用に関する国際会議」(<http://www.iict.konan-u.ac.jp/ICOTA7/>) は，実行委員長を京都大学の福島雅夫教授とともに私が務めさせて頂く形で初めて日本で開催される。ICOTA は，Pacific Optimization Research Activity Group (POP) の公式の国際会議シリーズであり，日本および中国・香港を中心とする東アジア・太平洋地域における最適化研究の交流と発展に大きく貢献してきた。

がく ごいち (Wuyi Yue)

甲南大学 理工学部 情報システム工学科  
〒658-8501 神戸市東灘区岡本 8-9-1

今回の ICOTA 7 は従来の ICOTA で取り上げられている最適化の理論的研究テーマに加え、データ分析の最適化方法、産業的システムのモデリングと最適化、情報通信ネットワーク、信号処理の最適化、データマイニング、ニューラルネットワーク等、多種多様な応用分野に関する興味深い内容のセッションを通じ、敬遠されがちな最適化の手法を身近な最適化にと、研究者のみならず、産業界との最新の研究成果と応用例を発表する場としている、それゆえ最適化研究の今後の発展を目指して活発な意見交換が期待される。

紙数の制限から、本稿では待ち行列理論の応用を中心とした筆者の研究の一部である情報通信ネットワーク設計、サービスの品質（送信遅延の最小化、利用率の最大化）に関連するシステム性能解析と評価、および最適化の応用に関する周波数帯域の最適な配分について概説する。そして、無線情報ネットワークの性能評価に関する研究の一部について述べる。

## 2. 情報通信ネットワーク設計と性能評価

情報通信ネットワークは他のネットワークと同じく、計画、設計、製造、設置、運用の過程を繰り返す。計画の段階では需要予測、トラヒック予測、またサービス品質の規格決定、設計の段階ではネットワーク構成評価、性能評価、パラメタ最適化、運用アルゴリズムの評価、全システムの総合評価を行う必要がある。そして運用の段階ではトラヒック条件に基づいたシステム構成要素の設備数・パラメタの設計、品質とトラヒックの測定、輻輳に対するトラヒック制御が必要となる [1]。

ネットワーク設計問題は、コストや物理的または政策的な制約の下で、利用者が満足する通信サービス品質を提供できるよう通信ネットワークを構築するものである。そして、ネットワーク設計は形状設計と回線設計の二つから成り、形状設計にはグラフ・ネットワーク理論や数理計画法、回線設計には待ち行列理論（トラヒック理論）およびシミュレーションを用いる [2]。後者は待ち行列理論に関係が深いネットワークの性能解析やサービス性能評価である。待ち行列ネットワークの最適化問題（ネットワークパラメタの最適化や開ループ制御問題、完全情報問題等）については文献 [3] を参照されたい。

### 2.1 通信ネットワーク設計問題

通信ネットワークの基本的な構成は、ユーザが用いる端末、交換機、および伝送路から成る。端末を集め

て交換機（または集線装置）へ収容するネットワークをローカルアクセスネットワーク、交換機間を伝送路で結んだネットワークを中継ネットワークと呼ぶ。通信ネットワークの形状設計は、トラヒック、サービス種類、サービス品質、コスト/料金等によって定まる。グラフ・ネットワーク理論のこのような情報通信ネットワーク設計への応用は、ネットワークの最大使用、最短通信経路の選択問題、コスト最小ネットワークのトポロジー構成や回線容量あるいはチャンネル数の決定等が挙げられる。

しかし今日においては移動通信、無線 LAN (WLAN)、光ファイバーによる家庭向けのデータ通信サービス (FTTH)、ケーブルテレビ (CATV) 等の高速アクセスや、既存の固定電話・携帯電話網あるいはコミュニティ FM や防災無線等放送系のネットワークをシームレスに統合してユビキタスネットワークが実現しつつある。このとき、局部のネットワークにおいても端末の地理的分布、電話、データ通信、静止画、動画等の異種トラヒック要求、リソースの種類と容量、トラヒック特性（通信呼の発生過程、サービス時間分布等）、ネットワーク接続の形態、通信呼の接続経路の選択方法、構成要素のコスト関数、サービス品質、等を全て独立変数として考えるとネットワークの最適化を図ることが大変難しくなる。このようなネットワークの形状設計の有効な最適化法に関する専門分野の方々からの新しい研究成果を期待したい。

### 2.2 通信ネットワークの性能評価

情報通信ネットワークのサービス提供側の高い稼働率を実現し、かつ低コストの管理といった利益を一定確保しながら、利用者が満足するトラヒックの通信品質を提供するためには、資源利用要求の発生や資源占有時間に不確実な要素を考慮した定量的な評価が必要である。一般にこのような解析や評価をシステムの性能解析と評価と呼ぶ。システムの性能解析と評価において、トラヒックの特性を捉えたモデリング手法と有力な数学的理論は待ち行列理論 (Queueing Theory) である。特に、サービスの対象として電話の呼のようなトラヒックを扱う回線交換ネットワークに関する研究においては、この数学的理論は通信トラヒック (Traffic) 理論と呼ばれることが多い。これらの量的評価結果に基づくシステム設計や運用、またはシステムのグレードアップが期待される。

情報通信ネットワークの性能解析と評価は、情報通信ネットワークにおける共有資源に対する利用要求が

確率的に発生するという仮定の下で、共有資源に対する競合問題を数学モデル化して解析すると共に定量的にシステムの評価をすることを目的としている。

情報通信ネットワークの性能評価量としては、一般にチャンネル使用率、スループット、パケット伝送遅延、呼損、エンド・トゥ・エンドでパケットの遅延や棄却率の平均に関する評価量がある。一方、多段のような複雑なネットワークの設計等においては、下位にあるネットワークの出力過程が、上位のネットワークの入力過程と密接に関連している場合や遅れ時間の最大値に上限がある場合は（音声、動画送信等）、平均だけでなく、トラヒックの確率的特徴が観察できる高次元メント（分散、変動係数）が挙げられる。

通信ネットワークは1890年にサービスを開始した電話交換網から、パケット交換網、非同期通信網（ATM交換網）、そしてインターネットのように推移しており、通信トラヒック理論はそれらのいずれかのネットワークの性能解析と評価、システムの最適な設計に対して多大な貢献をしてきた。日本においてもこれらの研究分野において世界的な業績を挙げ、常に研究開発の最先端に位置する優れた研究者は少なくない。これら著名な日本人研究者による待ち行列理論（トラヒック理論）とその応用、性能評価の基礎と応用、ネットワーク設計等に関する優れた解説書や専門教科書、翻訳、さらに学術論文は多数ある。これらの和文書籍は日本OR学会待ち行列研究部会のホームページ[4]や[5]-[9]を参照されたい。

複数の異種のネットワークが混在し、複雑巨大化する分散処理環境における多種多様な情報を統合して扱うマルチメディア情報ネットワークにおいては、伝送される多様な種類のトラヒック、それに対応し異なる性質を持つ通信サービスと要求される通信サービス品質（Quality of Services, QoS）、チャンネル使用率を高める多様なプロトコルを有するため、従来、別々に扱ってきた通信ネットワークの性能解析と評価手法が適用できなくなるケースが頻出する。

このような新システムの設計と開発や新しいニーズに応じるシステムを再構築するためには、マルチメディアトラヒックがもつ確率的性質を正確に把握し（異トラヒック間の依存性）、システムモデルの構築と、そのシステムモデルに対する数学的な新しい解析手法、それらを効率的に評価するための新しいツールやアルゴリズムの研究と開発が求められ、また通信サービス品質を満足するネットワークの制御方式が求められる。

さらに今後、主となるコンピューティング環境（分散処理環境）が広く不均質に分散しているシステムに対し、負荷情報をもとに自律的にプロセスを割り当てて確率を求め、システム資源能力に応じた負荷分散を最も効率的に行うための動的負荷分散制御方式の開発とその性能評価も期待される。

### 2.3 トラヒックエンジニアリング設計と最適化

一方で、情報ネットワークサービスプロバイダの間で様々なサービス競争がなされているが、ニーズとニーズに見合った情報ネットワークサービス供給に関する定量的評価および最適な戦略マネジメントが重要となる。

筆者らはトラヒックエンジニアリング設計とコストモデルの構築を行い、マルチメディア通信ネットワークにおける周波数帯域配分に対する確率モデルの最適化を提案した[10]。ここでマルチメディア通信ネットワーク全体（プロバイダの所有通信容量）を1つのサービスシステムに見なして、サービスを受けるユーザーから費用（Revenue）を受け取って、同時に使用する通信容量に対するコスト（Cost）を払う。目的関数はサービスシステムの利潤（Revenue-Cost）の最大である。拘束条件としてはユーザーの需要の確率分布、トラヒック特性、ネットワーク接続の形態等に関する構成要素のコスト等である。

ユーザーの需要はランダムであるため、サービスシステムが獲得する利潤も需要の分布関数に依存して不確定となる。したがって、この利潤は期待するレベル、例えば平均利潤に達成するとは限らない。このようなシステムの獲得する利潤が期待するレベルに達しない部分の分散をリスクと考える。したがって、定量的な評価において、利潤に関する平均-分散アプローチを用いて、リスクを一定の範囲内に抑えたとき、最大利潤を得るような周波数帯域配分の最適化が図れる[10]。

しかし、平均利潤より高い部分はシステムにとっては一種の有利な結果であり、リスクとして取り上げるのは適切でない。そこでさらに、Conditional Value-at-Risk (CVaR) アプローチを適用して平均利潤より低い部分の分散のみリスクと考え、数値結果によりシステム性能に関する損失レート制約とリスク嫌性の影響を示し、周波数帯域配分に関するネットワーク利得不足によるリスクを総合的に考慮したネットワークの周波数帯域配分の最適容量を導出した[11]。

### 3. 無線情報通信ネットワーク

次世代の通信の基盤には、光ファイバによる広帯域化通信網、および“いつでも、どこでも、誰とでも”の標語に表される移動通信（パーソナル通信）との2つの柱が求められている。したがって、情報通信ネットワークは、特定地点において高速インターネット接続サービスを受ける固定系ネットワークと、移動しながらインターネット接続が可能な移動系ネットワークに大別できる。

これまで携帯電話を中心とした移動通信ネットワークは、単なる音声電話からモバイルインターネットサービスの提供等、多機能化が進んできた。今後、次世代移動通信で想定される大きな技術の流れは、高速伝送化とIP化の進展である。

無線情報通信ネットワークシステムは大きく下記の三つに分類できる。(a)キロオダの広範囲をカバーする大規模な基地局による移動通信システム（セルラー移動通信ネットワーク）、(b)100 m オダの限られた範囲において超高速伝送を行う無線アクセスシステム（無線LANシステム）と(c)Bluetooth, Ultra Wide Band等10 m オダの近距離をつなぐ無線ホームリンクや近距離アドホックネットワーク（近距離無線システム）である。特に、第3・4世代セルラー移動通信システムに代表される公衆ネットワークと無線LAN等に代表されるコンシューマネットワーク（ホーム・構内・アドホックネットワーク）をシームレス接続できるよう機能を融合した、柔軟性、拡張性に富んだシステムの構築が期待される。

これまでに、国内外の研究者および技術者は無線通信システム、無線LAN、セルラー方式無線移動通信システムに対して待ち行列理論およびコンピュータシミュレーション技法等を用いてシステムの性能解析や性能評価に適用できる解析法を導出し、情報工学的見地からシステムの最適化やシステム性能を改善するための有効なアクセス方法や制御方法を多く提案してきた[12]。ここで、筆者らの研究結果の一部を下記に概観する。

#### 3.1 セルラー移動通信ネットワーク

移動無線通信媒体では使用できる周波数帯域が限られており、無線通信ネットワークの性能解析と評価における最大の課題の一つは有限の周波数資源を如何に効率良く利用し、かつ高品質のサービスを提供できるシステム設計がつかれるかという点である。

セルラー移動通信ネットワークは回線交換型の電話交換網と同じ「即時型サービス」であり、発生した呼はチャンネルを確保できないとき呼損となる。このような待ちが許されない即時系システムの重要な性能評価量は接続できない呼損率である。トラヒックの種類、周波数の割り当て方式、セルの規模、ユーザの移動性、異なる分布のトラヒックの混合等はこの呼損率の導出を複雑にしてしまう。

##### (i) 周波数の再利用

セルラー移動通信ネットワークにおいては、サービスエリア全体を複数のセルに分け、同一周波数（チャンネル）を繰り返し再利用して効率化を図る。しかし、この場合、隣接セル間で同じチャンネルを使用すると干渉してしまうため、周波数を再利用する基地局間を一定距離以上隔てる必要がある。特にトラヒック密度の高いサービスエリアにおいては周波数資源を効率良く利用する主な技術開発はセルサイズの小型化と基地局のセクタ化による周波数再利用の向上である。さらに多重アクセスの効率化と帯域の有効利用が求められる。このとき、セルのチャンネル割り当て方式の開発と制御、端末の移動性を考慮したハンドオフの発生率等がシステムの性能評価量である新しい呼（新規呼）の呼損率およびハンドオフの強制切断確率に与える影響が注目される。

##### (a) チャンネル割り当て方式に関する研究

チャンネル割り当て方式には固定チャンネル割当法、ダイナミックチャンネル割当法、ハイブリッドチャンネル割当法の3通りに大別される。固定チャンネル割当法では各基地局に対して割り当て周波数をはじめから固定しておき、呼が生じたときにその基地局に割り当てられたチャンネルの中から一つ空きチャンネルを割り当てる。ダイナミックチャンネル割当法はサービスエリア内のチャンネル割当てを中央制御で一括して行う方法で、呼の生起に応じて準備されている全チャンネルの中から適切なチャンネルを生起呼に対して動的に割り当てる。ハイブリッドチャンネル割当法では各基地局に対して割り当て周波数の一部を各基地局に固定しておき、一部を中央制御局に置く。各基地局の固定チャンネルがすべて使われるときに到着した新規呼に中央制御局から他のセルと干渉のないよう空チャンネルを一つ割り当てる。

固定チャンネル割当法では、アーランB-公式  $M/M/c$  呼損式を用いて呼損率を求めることができる。しかし、チャンネル利用効率を図るダイナミックチャンネル割当法やハイブリッドチャンネル割当法を用いるセル

ラー移動通信ネットワークにおいては、あるセルで発生した新規呼の接続要求にそのセルの隣接セルの干渉を考慮して空きチャンネルを割り当てなければならないため、従来のアーラン呼損式が適用できなくなる。

さらにハイブリッドチャンネル割当法では、ハイブリッドチャンネルへの各セルからの溢れ呼量はポアソン分布で扱えなくなるため、筆者らが新しい解析の手法を提案した[13]。一つの手法は注目しているセルと干渉セル群の各セルからそれぞれIPP (Interrupted Poisson Process) で特徴づけた溢れ呼量を単一のIPPに合成し、それをダイナミックチャンネルへの入力とするG/M/m/m呼損系モデルとして考え、呼損率の算出式を与える。もう一つは、単一のセルからの溢れ呼がダイナミックチャンネルへ到着する直前におけるダイナミックチャンネル使用数の平衡状態確率分布を求めることから呼損率を導出する。数値計算によって呼量や、呼の接続率の変動がそれぞれのチャンネル割当法に与える影響を明らかにした。

(b) 最適なチャンネル配置問題

セルラー移動通信ネットワークにおいては、ユーザ数の増加に伴うセルへのチャンネル配置の際に、限られた数のチャンネルに対してセル間の同一周波数干渉や隣接周波数干渉の再計算を行い、サービスエリア全体の干渉が最小となる効率よいチャンネルの再配置を行う必要がある。このようなチャンネル配置問題には最適化手法が適用できる。これは全サービスエリア上の各セルでのトラヒック量に見合った要求チャンネル数を満たし、しかも隣接した基地局(セル)で同じチャンネルを使用しないという条件のもとで、高速かつ最小限のチャンネル配置を行う組合せ最適化問題である。

これまでにニューラルネットワークを利用した手法や、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた手法等様々な手法が提案されていた。しかし、使用するチャンネル数が少数であれば全探索空間の探索は可能であるが、チャンネル数と基地局数が増えるとその組み合わせの数も指数関数的に増大し、実用上では困難である。そこで筆者らは、チャンネル割当ての際に生じるセル間距離による干渉と、隣接周波数による干渉の2種類の干渉を考慮に入れ、前者には再帰探索アルゴリズムによる高速のチャンネル割当法を提案してその有効性を示した。さらに後者の隣接周波数による干渉を最小にするチャンネルの再配置は、巡回セールスマン問題に帰着できることから、解の探索には最適化手法の1つであるGAを用いた[14]。

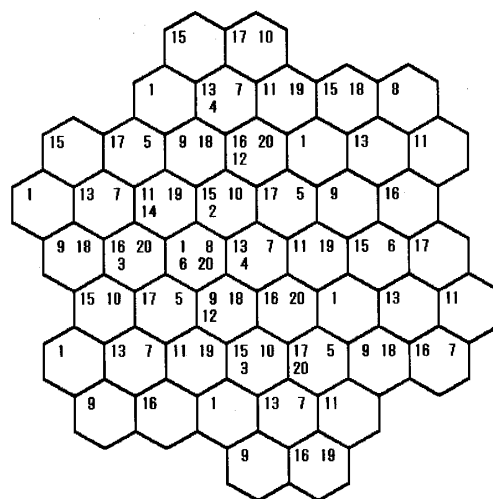


図1 最適なチャンネル配置の1つ(干渉度合い=36)

干渉度合いの最も小さなチャンネル配置が最適解となる。図1は、干渉度合いが最も小さな値(ここでは36)となった最適なチャンネル配置の1つの例である。各セルにある番号はチャンネルの番号で、チャンネルの数はあらかじめシステムが要求した配置のチャンネル数である。

(ii) ハンドオフに関する研究

セルの小型化により、通話中のユーザは隣接するセルへ、また隣接するセルから移動してくるケースが発生する。隣接するセルに空きチャンネルのないときに通話は強制的に切断され、通信サービスの品質が低下する。筆者らはハンドオフの強制切断確率を少なくするために予め一定のチャンネル数をハンドオフ呼に保留する方法や、ハンドオフ呼に新規呼より高い優先度を与える方法等を検討してきた。

例として図2のようなシステムを対象にハンドオフ呼に優先権を与え、端末の移動性を考慮したハンドオフ呼の発生率等がシステムの重要な性能評価量の新規呼の呼損率や、ハンドオフ呼の送信遅延および強制切断確率が通信サービスの品質に与える影響を厳密な解析によって数値的に示した[15]。さらに、高次モーメントを導出する算出式を与え、遅延と呼量の変動係数

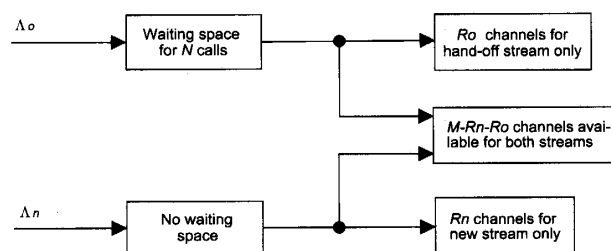


図2 ハンドオフシステムモデル

の数値結果を示した。

図2にある $\Lambda_n$ と $\Lambda_0$ は新規呼またはハンドオフ呼の呼量である。他にセル内の滞在時間やユーザの移動速度、保留チャンネル数、通信中チャンネル切換え方式、異種トラヒックを同時に扱うシステムを対象とする性能解析も行ってきた。異なる通信方式間でのシームレスなバーティカルハンドオーバーを実現するためのモデリングと解析は今後の課題である。

### 3.2 多元接続方式

無線チャンネルを複数のユーザで共有する無線情報通信ネットワークでは、チャンネルへの多元接続によるアクセスの制御と複数の情報を同時に転送する多重伝送の機能が必要となる。

#### (i) 固定多元接続方式

代表的な固定多元接続方式には、周波数を分割し複数のチャンネルを構成する周波数分割多元接続方式(FDMA)、1つの周波数を短時間ずつ交代で複数のユーザで共有する時分割多元接続方式(TDMA)、複数のユーザの送信信号にそれぞれ異なる符号を乗算し、すべての送信信号を合成して1つの周波数を使って送る符号分割多元接続方式(CDMA)がある。CDMA方式は既存のFDMA方式やTDMA方式よりも通信品質や通信速度等の面で優れているとされている。さらにCDMA方式は、隣接セルに同一の周波数が配置可能であること、非同期で多重化が可能であること、統計多重効果が得られることから次世代携帯電話での使用に注目が集まっている。

#### (ii) ランダムアクセス多元接続方式

複雑な制御を要しないデータ通信に使われるランダムアクセス多元接続方式にはALOHA, Slotted ALOHA, CSMA/CD, CSMA/CA等がある。ランダムアクセス多元接続方式は、一本の通信チャンネルを多数のユーザで共有するランダムなアクセスによる競合型のアクセス方式であるため、二つ以上の同時送信があれば、チャンネル上で衝突が起こり送信失敗に終わる。このときランダムな時間において再送信する。

CDMA方式の容量をさらに高めるため筆者らは、従来のユーザごとに異なる拡散符号を用いるCDMA方式に異なる拡散符号に複数のユーザが使用可能なランダムアクセス方式を適用して、即時性が要求される音声トラヒックにデータトラヒックより高い優先権を与え、さらに音声トラヒックによるシステム内の資源の独占を避けるために音声トラヒックが使用できる拡散符号数を制限するアドミッション制御を導入するこ

とにより、音声とデータトラヒックを統合的に扱う多元トラヒックのパケット通信方式を提案した[16]。ここでは、マルコフ連鎖理論に基づいて、システムの振舞を解析し、システムの性能評価量(音声とデータトラヒックのそれぞれのスループット、音声トラヒックに関する輻輳確率およびデータパケットの平均遅延時間)を求める諸公式を厳密な解析により導出した。また、音声とデータトラヒックのジョイント確率母関数を導出するとともに、それぞれの変動係数の数値結果を示すことにより、ネットワークシステムの高速度と大容量化が可能なが判明した。

#### (iii) マルチホップ・マルチメディアアクセス

次世代の高速・広帯域マルチメディア移動体無線通信ネットワークの構築には、(a)多元トラヒックに適用できるアクセス方式、(b)有効な無線周波数割当て方式やパケット多重転送技術とルーティングプロトコル、(c)インフラストラクチャ(インフラ)を必要としない自律分散型の通信形態であるアドホック通信またはピアツーピア通信におけるマルチホップ、(d)これらの伝送形態や方式の融合、等の開発やシステムの性能解析と評価が必要である。

筆者らはこれまでにランダムアクセス多元接続方式 Slotted ALOHA, CSMA/CD, CSMA/CA 方式を用いるマルチチャンネル無線移動通信システム、無線 LAN システム、そしてユーザの移動性を考慮に入れたマルチホップネットワーク、さらに多元トラヒック無線通信ネットワーク、アドホックネットワークを対象に、トラヒックの解析や多重アクセス方式、制御方式の開発を重点において行ってきた。これらのシステムにおいて、応答時間、パケット遅延、チャンネルの利用率等の平均値のみならず、性能評価量間の相関関係や変動係数の算出式を陽に導出して数値評価を行った。これらによりシステムの最適設計とネットワーク制御に対する手法の提案を行った。これらの研究結果の一部を松本豊氏との共著「Performance Analysis of Multichannel and Multi-Traffic on Wireless Communication Networks」, Kluwer Academic Publishers, 2002 にまとめた。紙数の制約から、その詳細の記述は割愛する。

## 4. むすび

ユビキタス社会を支える、固定通信網と移動通信網、インフラストラクチャをベースとする無線ネットワーク、そして自律分散型無線ネットワークの高度な融合

による次世代の高速・広帯域マルチメディア移動体無線通信が実現しつつある。このような高度な無線通信ネットワーク構築には、セルラー系の広域システム、無線LANのスポットシステム、アドホックシステム、モバイルP2Pネットワーク等が相互の特徴を生かしながら、移動体同士が自律的につながる無線自律分散、無線移動マルチホップ、無線インターネットの高度な融合による次世代移動体通信ネットワークのアクセスに適用できる多重アクセスプロトコルの開発、移動体通信におけるマルチトラヒックの特性の解明、数値解析手法の提案、システムを評価できる数値計算ツールの開発が大いに期待される。

そのため、これらの高度に統合化されたネットワークシステムの確率の振舞い、ユーザ間、マルチチャネル間、マルチホップ間、多元トラヒック間におけるシステム要素間の従属性による確率的性質を正確に把握し、システムモデルを構築すると共に、性能評価量の算出式を導出し、各要素間の関係を数値結果により判明することは重要である。しかし、その反面数学的解析手法は煩雑となり、大規模のシステムを対象とする数値計算に多くの時間を要してしまうといった問題がある。これらの問題を解決することは、今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] 橋田温, “通信ネットワークにおけるORの問題,” オペレーションズ・リサーチ, Vol. 43, No. 5, pp. 259-263, 1998.
- [2] 滝根哲哉, 伊藤大雄, 西尾章治郎, ネットワーク設計理論, 岩波書店, 2001.
- [3] 伊理正夫, 今野浩, 刀根薫, 確率モデルハンドブック, pp. 531-562, 朝倉書店, 1995.
- [4] <http://queue.j.dendai.ac.jp/jbooks.html>
- [5] E. Gelenbe and I. Mitrani 著, 秋丸春夫, 橋田温訳, 計算機システムの解析と設計, オーム社, 1980.
- [6] H. Takagi, Queueing Analysis: A Foundation of Performance Evaluation, Volume 1: Vacation and Priority Systems, Elsevier Science Publishers B. V., 1991.
- [7] H. Takagi, Queueing Analysis: A Foundation of Performance Evaluation, Volume 2: Finite Systems, Elsevier Science Publishers B. V., 1993.
- [8] H. Takagi, Queueing Analysis: A Foundation of Performance Evaluation, Volume 3: Discrete-Time Systems, Elsevier Publishers B. V., 1993.
- [9] 村田正幸, 宮原秀夫, “通信トラフィック理論とその応用 (1)—システムのモデル化と性能評価,” 電子情報通信学会誌, Vol. 77, No. 9, pp. 968-975, 1994.
- [10] J. Wu, W. Yue and S. Wang, “Stochastic Model and Analysis for Capacity Optimization in Communication Networks,” to appear in *Journal of Computer Communications*, 2006.
- [11] J. Wu, W. Yue and S. Wang, “Performance Analysis of Communication Networks Based on Conditional Value-at-Risk,” to appear in *International Journal Nonlinear Dynamics and Systems Theory*, 2006.
- [12] 高木英明, “セルラ移動体通信網のトラヒックモデル,” オペレーションズ・リサーチ, Vol. 43, No. 5, pp. 259-263, 1998.
- [13] W. Yue, “Analytical Methods to Calculate the Performance of a Cellular Mobile Radio Communication System with Hybrid Channel Assignment,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 40, No. 2, pp. 453-460, 1991.
- [14] W. Yue, K. Miyazaki and X. Deng, “Optimal Channel Assignment in Wireless Communication Networks with Distance and Frequency Interferences,” *Journal Computer Communications*, Vol. 27, pp. 1661-1669, 2004.
- [15] W. Yue and Y. Matsumoto, “Probability Distribution of Delay in Cellular Mobile Networks with Hand-off,” *IEICE Transactions on Communications*, Vol. E 79-A, No. 7, pp. 1011-1020, 1996.
- [16] W. Yue and Y. Matsumoto, “Output and Delay Process Analysis for Slotted CDMA Wireless Communication Networks with Integrated Voice/Data transmission,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, No. 7, pp. 1245-1253, 2000.