

無線インターネット接続における 伝送誤りの TCP 動作への影響と特性改善

内藤 克浩

近年のインターネットの急激な普及と無線通信技術の発展に伴い、有線通信を利用したインターネット接続だけでなく、携帯電話、無線 LAN、FWA(Fixed Wireless Access) などの無線通信を利用したインターネット接続が今後急激に増加すると考えられる。

インターネットでは、TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol) を利用することで、ネットワークを相互に接続し、コンピュータ間で誤りのないデータ通信を行なっている。既存のインターネットは、主に有線通信を利用することで構成されてきたため、TCP/IP は有線通信を前提として設計されている。有線通信では、送信した信号が雑音により誤って受信される伝送誤りは極めて希にしか発生しない。このため、TCP/IP は、雑音などによる伝送誤りを考慮せずに設計された。インターネットは自律分散型のネットワークであるため、ネットワークの一部にトラヒックが集中することが多々ある。ネットワークは多数のルータによって接続されているため、トラヒックの集中は結果として特定のルータの負荷を高めることになる。しかし、ルータが利用することのできる帯域は限られているため、増加したトラヒックをルータが処理しきれなくなる場合がある。このとき、IP のパケットであるデータグラムの損失が発生する。このような状況を輻輳と呼び、有線通信でのデータグラムの損失は輻輳が発生したことにより主に発生する。

IP が経路上のルータにおいてデータグラムが損失することを許しているのは、IP は最善努力式配送を前提に設計されているためである。しかし、アプリケーションプログラムは、あるデータ列を他のホストのアプリケーションプログラムに損失なく転送しなければならないこともある。そこで、考え出されたのが TCP である。TCP はトランスポート層のプロトコルであり、ルータなどでデータグラムが損失した場合、TCP のパケットであるセグメントも損失する。TCP はこのセグメント損失に対してセグメントの再送を行なうことで対処する。また、セグメント損失はネットワークが輻輳状態である時に発生するため、TCP はセグメント損失を検出した際には、送信するセグメント数を削減する。

一方、無線通信では有線通信と異なり、雑音の影響による伝送誤りが多数発生する。さらに、送信した電波が建物などで反射し、複数の電波の合成波として受信されることにより、受信される信号強度は大きく変動してしまい、一時的に通信が不可能な状況も発生する。無線通信では、このような伝送誤りが原因となり、TCP のセグメントは多数損失する。このようなセグメント損失は雑音などによる影響であるため、有線通信のようにトラヒックと関係してセグメント損失が発生するわけではない。

TCP はセグメント損失を検出する手法は持っているが、セグメント損失が輻輳によって発生したのか、伝送誤りによって発生したのかを検出する手法は持っていない。そのため、TCP は伝送誤りによって発生したセグメント損失も輻輳によって発生したものと推定する。そして、TCP がセグメント損失を検出した場合、送信するセグメント数を削減する。場合によってはセグメント損失が多数発生するため、結果として TCP は自ら殆どセグメントの送信を行なわなくなることもある。このように、無線通信を利用したネットワーク上で TCP を利用した場合、TCP はセグメントの送信を控えてしまうために、TCP の特性は非常に劣化してしまうことが知られている。また、無線通信を利用した際の TCP の特性改善を目指す検討も多数提案されている。これらの研究では、大きく分けて、TCP を無線通信環境にあわせて修正する手法、TCP の接続を無線基

地局で分離する手法、ネットワークインターフェース層で伝送誤りの影響を軽減する手法が提案されている。

本研究では、既存のインターネットとの互換性を重視するため、ネットワークインターフェース層で伝送誤りの影響を軽減する手法の検討を行なう。ネットワークインターフェース層で伝送誤りの影響を軽減する手法を検討するためには、無線通信環境で発生する伝送誤りが、TCP の動作にどのように影響するのかについて検討する必要がある。このような検討に対してシミュレーションなどを利用することで、スループット特性や、タイムアウトの発生数などの TCP の特性を検討することができる。しかし、シミュレーションでは、TCP がどのような状況でタイムアウトが発生する可能性が高くなるのかと言った、TCP が持つ動作特性については検討を行ないにくい。そこで、本研究では、TCP の動作であるスロースタート、輻輳回避、ファーストリトランスミット、ファーストリカバリ、タイムアウトの動作をモデル化することにより、TCP の動作が伝送誤りによってどのような特性を持つのかを明らかにする。提案モデルでは、TCP の各動作を RTT(Round Trip Time) ごとのマルコフ連鎖としてモデル化を行なうことで、TCP の特徴を表現可能な解析モデルを提案する。そして、一般的な TCP の 3 種類のバージョン (TCP Tahoe, TCP Reno, TCP New Reno) についてモデル化を行なう。提案モデルを利用することで、TCP の各動作がどのように発生するのかを理論的に説明することが可能となり、TCP の動作に基づいた特性改善手法を検討することが可能となる。

次に、無線通信環境での伝送誤りの影響を軽減するために、ネットワークインターフェース層において誤り訂正技術を利用した場合、TCP 特性がどのように影響されるのかについて検討を行なう必要がある。ネットワークインターフェース層での特性改善手法と TCP の特性を独立に検討できないのは、一般に誤り訂正技術を利用した場合、伝送誤りによるセグメント損失数を減らせる一方、ネットワークインターフェース層で送信されるデータ量は増加することがある。そのため、ネットワークインターフェース層が TCP に対して低いセグメント損失率を提供できたとしても、ネットワークインターフェース層で多量のデータを送信するために送信時間が長時間必要となり、結果として TCP のスループットはそれほど改善されないことも考えられる。このように、様々な無線通信環境を前提とした場合、TCP の動作とネットワークインターフェース層での誤り訂正技術の動作を同時に検討することは重要である。そこで、無線通信環境としては、伝送誤りが一様ランダムに発生する AWGN(Additive White Gaussian Noise) 環境と、伝送誤りがバースト的に発生するフェージング環境の代表的モデルであるレイリーフェージング環境という、典型的な二通りの無線通信環境について検討を行なう。そして、ネットワークインターフェース層での誤り訂正技術として、誤り訂正符号と誤り検出再送制御を利用した場合について理論的な検討を行なう。このような理論的な検討を行なうことで、様々な誤り訂正技術や無線環境での TCP の特性を検討する基礎的な議論を行なうことができる。

最後に、ネットワークインターフェース層で伝送誤りの影響を軽減する手法の発展として、無線ホストが複数の基地局と接続することで、複数のネットワーク経路を利用する伝送誤りの軽減手法を検討する。本研究では、複数のネットワーク経路の実現手法として、無線ホストが複数の異なる基地局と通信を行なう、基地局ダイバシチシステムを利用する。基地局ダイバシチシステムは、複数の異なる基地局と無線ホストの間で、同一のデータを転送するシステムである。そして、一部の無線リンクで伝送誤りが発生したとしても、複数の無線リンクの情報を利用することにより、伝送誤りの発生による影響を軽減することが可能となる。提案システムでは、複数の基地局が通信エリアを構成するセルラシステムを利用する。そして、受信電力が低くなるセル境界付近において、無線ホストが複数の基地局に接続することで、TCP の特性劣化に繋がる伝送誤りの影響の軽減を行なう。さらに、無線ホストの移動に対しても、セル境界付近で複数のネットワーク経路を利用することで、通信を継続して行なうことも可能とする。

本研究では、以上のように、無線環境での伝送誤りと TCP のスループット特性、ファーストリトランスミットの発生確率、タイムアウトの発生確率との関係を明らかにするだけでなく、ネットワークインターフェース層での誤り訂正技術による TCP の動作への影響を解析的に示す。そして、無線環境での伝送誤りと TCP の動作との関係に着目することで、無線環境と TCP のスループット特性の関係を考慮した、ネットワークインターフェース層での特性改善手法を提案する。