

インターネットの渋滞と相転移現象

慶応大・理工 高安 美佐子

インターネットは、自律分散的に情報を転送するネットワークである点、生物の神経系などと類似した使命をになっている。利用者の増加とともに、巨大化したネットワークでは、神経系同様、様々な複雑系特有の現象が観測されるようになった。しかし、神経系と大きく異なっている点は、インターネットにおいては、実装されているプロトコルが、完全に分かっているという点である。つまり、物理系で言うならば、ミクロのダイナミクスが完全に分かっている系で、マクロに観測される複雑な挙動を解明するという魅力的な問題になっている。さらに、世界中で多くの人が、ネットワークを利用している今日、インターネットから無造作に取り出せるデータには、十分な統計性があることも、物理学的研究対象として大きな魅力である。

インターネットの研究では、最近、複雑系特有の現象が多く観測され、情報科学の分野においてもホットな話題となっているが、その1つには、インターネットの経路上で観測される渋滞現象の性質がある。一般に、経路上には多数のルータが存在するが、パケット（転送される情報の単位）が局所的に集中すると、そのルータが混雑し、情報転送に時間がかかるようになる。このような、局所的なルータの渋滞は、近傍のルータへと渋滞を拡張し、将棋倒し的に、大域的な渋滞へと発展することが確認された。この渋滞伝播のプロセスは、平均場のコンタクトプロセスによって近似され、臨界現象を伴う相転移現象とみなすことができる。臨界点においては、経路上のパケットの往復時間のゆらぎに $1/f$ ゆらぎなどのフラクタル的性質が観測されているが、ネットワークの転送効率が最もよいのも臨界点であることが確認されている。

もう1つの複雑系特有の現象は、インターネット上のリンクで観測さ

れる流量変動のフラクタル性である。流量の時間的変動は、 $1/f$ ノイズに従うことが知られているが、詳細に観測すると、必ずしもいつもは $1/f$ ノイズには従わず、かなり非定常的な領域から、ホワイトノイズ的な変動まで観測される。我々は、それらの様々な、領域を一色単に解析するのではなく、特徴のおよぶ長さごとに区切って、データを解析することにした。長時間の流量の変動のデータの部分部分はどのくらい相関を持っているのか調べ、その相関の及ぶ最長の長さの数倍程度をおおよその単位と考え、一本の長時間データをそれらの単位で切断し、いくつもの小データからなるセットに分割した。これらの小データから、各々のデータの平均流量、流量の密度分布、相関長、半値幅、渋滞の持続時間の分布などを観測した。そこで得られた結果は、一般の物理現象で観測される、臨界現象を伴う相転移現象の性質を示しており、平均流量がコントロールパラメータに対応する量となっていることがわかった。この観測において強調すべき点は、コントロールパラメータを変え、リアライゼーションを重ねて観測するという、従来の相転移現象の場合に行われるプロセスとは異なった手法によって同様の結果が得られている点である。つまり、元は1つの長時間時系列を小データに切断したものから、従来の相転移現象で得られている結果と同様な結果が得られるのだ。そういう意味では、流量変動は、動的な相転移現象を起していると考えられ、コントロールパラメータが時々刻々変化している系であることが確認されたといえよう。

以上、インターネットで観測される、2つの相転移現象を簡単に述べたが、これらの相転移はかなり異なるメカニズムによっておこっていることが分かってきた。先にも延べたように経路の渋滞のメカニズムは、接触過程によるルータの渋滞伝播と考えら、大域的な空間が関与する相転移現象である。一方、流量の相転移現象はインターネット上のある1点を通る流量の時間的ゆらぎを観測して得られる相転移現象であることから、経路の相転移に比べて、局所的に観測される相転移現象であ

るといえる。局所的な相転移現象は、ルータのもつバッファの性質が大きく関与していると考えられる。ルータに入力されたパケットが、バッファに貯えられ、リンクの容量に束縛されながら出力する状態を考えると、たとえ、ホワイトノイズの入力であっても、出力は、臨界現象的な振る舞いをする事が示される。それ故に、ネットワークの流量のゆらぎを考える上では、バッファの待ち行列の効果を無視することはできない。

このようにインターネットはローカルな観測においてもグローバルな観測にも臨界現象を示す。これらのローカルとグローバルな性質を统一的に説明できるモデルの追求が今後の研究課題である。

1. Misako Takayasu, Hideki Takayasu, and Takamitsu Sato,
Physica A 233 (1996) 824-834.
2. M. Takayasu, A. Yu. Tretyakov, K. Fukuda, and H. Takayasu,
“Traffic and Granular Flow '97”, edited by Schreckenberg and Wolf,
(Springer, Singapore, 1998).
3. A. Yu. Tretyakov, H. Takayasu, and M. Takayasu,
Physica A 253 (1998) 315-322.
4. Misako Takayasu, Hideki Takayasu, and Kensuke Fukuda, 投稿中。
“Dynamic Phase Transition observed in the Internet Traffic Flow”.
5. Kensuke Fukuda, Hideki Takayasu, and Misako Takayasu, 投降中。
“A stochastic map model of Phase Transition in the Internet Traffic”.
6. Kensuke Fukuda, Hideki Takayasu, and Misako Takayasu, 投降中。
“Spatial and temporal behavior of congestion in Internet Traffic”.