

R o b e r t E . K A H N

T C P / I P の 共 同 発 明 者

# ロバート E.カーン

TCP/IP に今、  
求めるべきことは何か

i n t e r v i e w

ロバート・E・カーン

聞き手：三木 泉

Photo：渡 徳博

今日のインターネットの基礎となる考え方は、この人の頭脳から生まれたと言っても過言ではない。ロバート・カーン氏はオープンネットワークアーキテクチャーのコンセプトを考え、必要なプロトコルの要件を定め、ヴィント・サーフ氏と共同で1974年にTCP(Transmission Control Protocol、現在のTCP/IP)に関する論文を発表した。インターネットは、このTCPという通信規約を中核として、現在に至るダイナミックな道程を歩み始めることになった。

1972年、米国防衛省の高等開発局(DARPA: Defence Advanced Research Projects Agency)に加わったカーン氏は、複数のコンピュータ間を結ぶARPANETプロジェクトを担当する一方で、衛星パケット通信ネットワークおよび地上の無線パケット通信ネットワーク構築にもかかわった。

その過程で、別個の伝送技術で構築されたこれら3つのネットワークすべてを相互に接続できるような、オープンネットワーク技術の開発が必要だと考えるようになった。どんなネットワークでも、ゲートウェイ経由で相互接続することができ、集中管理や制御を必要としない分散的な構成が可能で、統一的なエラー制御の機能を備えた仕組みが存在すべきだと考えたのだ。

このコンセプトを実現するため、当時ARPANETで利用されていたNCP(Network Control Protocol)というプロトコルをベースに考案されたのがTCPである。

それから30年経った今、インターネットのバックボーンは飛躍的に広帯域化し、それとともにTCP/IPの性能の限界がとりざたされるようになっていく。また、生活基盤サービスへのTCP/IPの利用が進むにつれて、セキュリティやサービス品質の確保における課題も指摘されるようになってきた。

TCP/IPは、こうした指摘にどう応えるこ

とができるのか。我々は、将来に向けてTCP/IPに何を期待し、どう使いこなしていくべきなのだろうか。インターネットマガジンでは、カーン氏にこれらの問題についてたずねた。

### 本質的問題は今も変わらない

TCP/IPはコンピュータ間の通信プロトコルにとどまらず、我々の生活のさまざまな部分に適用されようとしています。TCP/IPに求められることに関し、開発当時と現在で、何か違いを感じることはありますか。

TCP開発の最初の目標は、複数のネットワークで構成されるネットワーク上で、信頼性のある通信を確保する方法を見つけることでした。このため、パケットの重複受信、パケットの断片化、情報の再構成などの問題に対処する必要がありました。統一的なアドレスづけ(グローバルアドレッシング)の考え方もIPアドレスという形で組み込みました。

これらの要素はすべて当初の設計に組み込まれていますし、現在でもこれらが基本要件であることにはまったく変わりはありません。インターネット環境における通信を扱うがぎり、当時とまったく同一の問題に対処していかなければならないと思います。

放送分野などの人は、インターネットが「ベストエフォート」という考え方に立っていることに拒絶反応を示します。こうした反応をどう思いますか。

そういう人たちは、絶対的な保証が欲しいとでも言うのでしょうか。では核戦争が起きたらどうしますか。太陽の黒点の影響によって通信が妨害されたら？

「ベスト」の努力に勝る努力をすることは不可能です。これはTCPの問題ではなく、それぞれのパケットネットワークやその集合体がどのように実装されているかという問題です。コーディングや再送信の機能を強化したいと考える人はいるでしょう。それは今のプロトコルの枠内で実現できることなのです。

### アプリケーションとTCPの間の問題

しかし、インターネットは信頼性に欠けると考えている人はたくさんいます。

パケットスイッチングを初めて見た人たちは、よくそう言っていました。彼らは、回線交換なら自動的に伝送が保証されるかのような前提に基づいて、「回線交換でないなら使いものにならない」と言ったのです。しかし、これは長い1つの回路を確立することと、複数の短い回路を確立することのどちらを選択するかという問題です。

最終的には伝送路の品質次第なのです。遅延が大きすぎてデータが使いものにならないというなら、帯域を広げたり、中継点を減らしたり、バッファリングを調整したりするなど、ネットワークを再設計して遅延を減らさなければなりません。つまり、提供したいサービスに応じた伝送路の設計をすべきだということです。

現在、高速ネットワークにおけるTCP/IPの性能の限界が指摘されています。たとえばインターネットのバックボーンなど、10Gbpsといった高帯域の伝送に対応するため、ウィンドウサイズ(注1)を広げる改善がなされていますが、ほかにより対処方法はないのでしょうか。

たしかに帯域が広がれば、ウィンドウサイズを広げたとしても、再送信の際に大量のデータを送らねばならず、その際に性能が低下します。対策としては、何





ロバート E. カーン

1964年、プリンストン大学で博士号取得。ベル研究所、マサチューセッツ工科大学助教授などを経て、1972年に米国防総省高等開発局(DARPA)のIPTO(Information Processing Techniques Office)ディレクターとなる。TCP/IPを開発し、国防総省のインターネット計画の創設責任者となる。13年にわたる国防総省での勤務の後、CNRI(Corporation for National Research Institute)を設立、会長、CEO、社長を兼務する。インターネット上の情報オブジェクトの分散管理を実現するデジタル・オブジェクト・アーキテクチャの研究にも力を入れている。

もし伝送路が非常に不安定ならば、信頼性を大幅に向上させるために、コーディングを工夫しなければならないでしょう。そのうえで、それぞれのアプリケーションが、自分の望む形でパケットの制御をすればいいのです。

たとえば、データを受信してディスプレイに表示するアプリケーションで、パケットがまったくおかしな順番で届いたとしましょう。一般的なTCPの実装では、こうしたパケットはすべて正しい順序に並び替えられなければ表示されません。しかし、パケットが十分な速さで送られてきているなら、ランダムな順序でディスプレイに表示しても、ユーザーは問題なく見ることができるはずです。

つまり、焦点はアプリケーションが何であるか、そして適切な肯定応答やバッファリングなどを行うために、受信者側

らかのエラー制御チャンネルを構築して伝送路の信頼性を高めること、そして同時に、アプリケーションが、再送信メカニズムを選択的に利用できるようなことだと思えます。

広帯域下で音声トラフィックを扱う場合、1つのパケットがなくなったからと言ってたいした問題は生じません。特に、どこかでいったんファイル化してから聞くようなやり方をとるなら、一部のパケットが失われたとしても、再送信を待ってファイルに取り込んでから聞かせることができます。

注1 ウィンドウサイズ

TCPは、受信側からの確認応答(ACK)を受けながらデータを送信することで、送信の信頼性を確保している。「ウィンドウサイズ」とは、この確認応答を受ける前に送るパケットの量のこと。ウィンドウサイズを増加させれば転送速度が上がり、効率が上がるが、いったん再送しなければならない事態に陥った場合、再送しなければならないデータの量も大きくなるので、転送効率が低下してしまうという問題がある。

において、TCPとアプリケーションとの間で、どのようなやり取りが行えるかということになると思います。

TCPの構成要素であるシーケンス番号(注2)に関するセキュリティが問題となりました。これについては、何か抜本的な解決方法があると考えていますか。

それを言うなら、通信事業者は通信路を遮断することまでできてしまいます。つまり、通信事業者を利用すること自体がセキュリティ上の問題を生むとも言えなくもありません。しかし、どんなシステムであっても、利用していくかぎり、どこかに信頼を置かなければなりません。シーケンス番号だけが特別なセキュリティ上の問題を生じるわけではないと

思います。通信事業者は、シーケンス番号などを使わずに、もっと大きなセキュリティ上の問題を起こすことができます。

衛星を使ったパケット通信を始めた頃、同様な質問を受けたことがあります。誰かが、「これは非常に脆弱なのではないだろうか。誰かが妨害できる可能性がある」と質問したのです。これに対して我々は、「それはパケットかどうかとは関係なく発生する問題だ」と答えました。

あるとき、軌道上で回転してしまう衛星との通信を試したことがあります。このとき、回線交換の仕組みでは、衛星のアンテナが回転によって地球から見えなくなるたびに通信が切れたわけですが、パケット通信では、衛星のアンテナが地球を向いている瞬間に、タイミングを計ってデータを送ることにより、信頼性の高い通信を実現できたのです。

### TCPはあらゆるアプリケーションを支えるプロトコルにしたかった

TCP/IPの開発プロセスを振り返って、違うやり方もあったなと思うことがあるとすれば、それは何ですか？

まず、もっと迅速に開発を進められればよかったと思います。そうすれば、今頃もっと先のことが見えていたでしょうから。

もう1つはアドレスの数に関する点です。我々は当時、現在とはまったく違った環境にいました。現在の貨幣価値で言えば、数千万ドルもするようなコンピュータしかなかったのです。1973年にインターネットを始めたとき、我々はアドレスフィールドを32ビットと決めましたが、これで永遠に十分だろうと考えました。

32ビットのうち8ビットをネットワークの識別に当て、残りの24ビットをホストコンピュータのアドレスとして割り当てることにしました。8ビットでは256のネットワークを識別できません。当時私は世界中で多分6から12くらいのネットワークが生まれるく





らいだろうと考えていましたから、256は途方もない数字だったのです。

振り返れば、最初から128ビット、あるいは少なくとも64ビットで始めればよかったです。ただ、当時は帯域が狭すぎて、ヘッダーサイズを広く取ると回線効率が大幅に低下するという問題がありました。

また、急いで結果を示す必要がなく、技術を実証してみせる前にたとえば10年間を開発に費やせたとしたら、セキュリティ関連の問題にもっと時間を割いたと思います。特に認証に関しては、現在大きな問題になっていることを認識しています。しかし、当時セキュリティに本格的に取り組んだとすれば、それが大幅な遅れにつながったでしょうし、多分TCPの技術を実証してみせるまでに至らなかったと思っています。

もう1つ付け加えるならば、TCPはあらゆるアプリケーションを支えるプロトコルとして利用していくことが可能でしたが、実際にはそうなりません。私がヴァイント・サーフと共同で書いた論文は、TCPをバーチャルサーキット(注3)としての実装に限定していたわけではありません。

私は、後のUDP (User Datagram Protocol)と同じことがTCPの枠内でできると考えていました。アプリケーション側が確認応答(ACK)のやり方やバッファリング、再送信などに関する指示を出せるようにすればいいと思っていたのです。TCPが実装においてバーチャルサーキットと同義になってしまったのは、当時バーチャルサーキットを実現することに関するニーズが強く、これが定着してしまったからです。このため、後でUDPを付け加えなければならなくなったのです。

## 自分の直感を信じよ

これからのネットワーク化社会を担っ

ていく若い人たちに伝えたいと思うメッセージは何でしょうか。

グローバルな情報社会が将来どのようなものになっていくのか、我々はまだその入り口に立っているだけだと思います。今我々が使っているコンピュータと20年前のそれを比べるだけで、どんな変化が起こりうるかが分かります。ですから、皆さんには勇気と確信を持って行動していただきたいと考えています。

私がネットワーク分野に飛び込んだとき、先輩たちは、私が自分のキャリアを無にしようとしていると言いました。当時は巨大なバッチ処理機の時代でしたから、相互通信などはあまり求められていなかったのです。電算処理センターのスタッフで、通信をやりたいと思う人はほとんどいませんでした。しかし私はあえてこの道を選び、5年、10年と経つにつれて自分のしたことが大きな進歩につながりました。私は自分の直感を信じたのです。

ですから、今の環境が今後永遠に続くと思込むことはありません。他の人が、自分の直感と違うことを言ったとしても、信じる必要はないのです。

### 注2 シーケンス番号

TCPでは、パケットの順番を特定し、受信側での再構成を可能にするために、特定のデータの流れにおける位置を示す情報を各パケットに埋め込んで送信することになっている。これを「シーケンス番号」という。このシーケンス番号を推測し、TCPコネクションを乗っ取ることで不正なパケットを送りつける攻撃が表面化したことがある。これについてはシーケンス番号の生成方法を変更するなどの対策がとられた。

### 注3 バーチャルサーキット

TCPでは、送信者と受信者が特定のデータの流れを識別し、仮想的な経路として管理する仕組みが用意されている。これを「バーチャルサーキット」と呼ぶ。具体的には、各パケットに送信アドレスと送信ポート、受信アドレスと受信ポートの情報が組み込まれており、これによって一続きのパケットの流れ(フロー)が識別され、このフローを単位として全パケットを確実に送り届ける作業が行われる。カーン氏がここで話しているのは、当初の論文では、パケットが喪失した場合に再送によって必ずその到達を保証することだけを目的としていたわけではないということである。





## [インターネットマガジン バックナンバーアーカイブ] ご利用上の注意

このPDFファイルは、株式会社インプレスR&D(株式会社インプレスから分割)が1994年～2006年まで発行した月刊誌『インターネットマガジン』の誌面をPDF化し、「インターネットマガジン バックナンバーアーカイブ」として以下のウェブサイト「All-in-One INTERNET magazine 2.0」で公開しているものです。

<http://i.impressRD.jp/bn>

このファイルをご利用いただくにあたり、下記の注意事項を必ずお読みください。

- 記載されている内容(技術解説、URL、団体・企業名、商品名、価格、プレゼント募集、アンケートなど)は発行当時のものです。
- 収録されている内容は著作権法上の保護を受けています。著作権はそれぞれの記事の著作者(執筆者、写真の撮影者、イラストの作成者、編集部など)が保持しています。
- 著作者から許諾が得られなかった著作物は収録されていない場合があります。
- このファイルやその内容を改変したり、商用を目的として再利用することはできません。あくまで個人や企業の非商用利用での閲覧、複製、送信に限られます。
- 収録されている内容を何らかの媒体に引用としてご利用する際は、出典として媒体名および月号、該当ページ番号、発行元(株式会社インプレス R&D)、コピーライトなどの情報をご明記ください。
- オリジナルの雑誌の発行時点では、株式会社インプレス R&D(当時は株式会社インプレス)と著作権者は内容が正確なものであるように最大限に努めましたが、すべての情報が完全に正確であることは保証できません。このファイルの内容に起因する直接のおよび間接的な損害に対して、一切の責任を負いません。お客様個人の責任においてご利用ください。

このファイルに関するお問い合わせ先

**株式会社インプレスR&D**

All-in-One INTERNET magazine 編集部

[im-info@impress.co.jp](mailto:im-info@impress.co.jp)