

サイエンス・ライター 岩山知三郎／編集部



TechnologyVision

パケット通信を移動体に広げた ALOHAnetの創始者

ノーマン・エイブラムソン

ノーマン・エイブラムソンが1961年に考案した巡回冗長検査 (CRC:Cyclic Redundancy Check) は、データ転送におけるデータ・エラーを効率よく検出でき、その後のネットワーク通信やストレージ技術の発展に大きく貢献した。1968年にハワイ大学の教授に就任したエイブラムソンは、4つの島々に所在する施設や船舶から中央のコンピュータを共有するため、1970年に最初の無線パケット通信網のALOHAnet(アロハネット)を開発した。さらに、エイブラムソンは衛星通信でALOHAnetとARPANETの接続に成功し、海外諸国からARPANETへの接続を可能にした。ALOHAnetの技術はイーサネットの媒体アクセス制御方式「CSMA/CD」を生み出すきっかけとなり、CDMA方式の携帯電話網へと発展する無線通信の出発点となった。

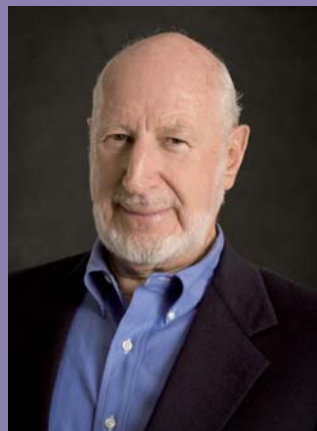
スタンフォード大学でCRCを開発

ノーマン・マニュエル・エイブラムソン(Norman Manuel Abramson)は1932年4月1日に、マサチューセッツ州ボストンのユダヤ人家庭で生まれ育った。エイブラムソンは、1953年にハーバード大学で物理学の学士号を取得して卒業し、カリフォルニア州ロサンゼルス近郊のヒューズ・エアクラフトに就職した。その後、リサーチ・エンジニアとして働きながら、カリフォルニア州立大学ロサンゼルス校(UCLA)の物理学修士課程で

学んだ。

1955年に修士号を取得したエイブラムソンは、カリフォルニア州パロアルトのスタンフォード大学電気工学部の博士課程に進学し、ウィリス・ハーマン(Willis W. Harman)教授の指導のもとで統計通信理論を学びながら、スタンフォード大学で教職を得て、電気工学、通信理論、コンピュータ・ネットワーク、衛星通信などを教えた。

エイブラムソンは、レーダー信号や周



ノーマン・マニュエル・エイブラムソン
(1932.4.1～)
Norman Manuel Abramson

波数変調、サンプリングとデジタル通信などについて研究し、「レーダー検知とコーディング問題に対する“実験の比較”の応用」と題する論文をまとめ、1958年に電気工学の博士号を取得する。同年にスタンフォード大学の講師となり、電気工学、通信理論、コンピュータ・ネットワーク、衛星通信などを教え、1958年に同大学で准教授に就任した。エイブラムソンは1965年までスタンフォード大学で勤務し、1966年からはカリフォルニア州立大学バークレー校、ハーバード大学、マサチューセッツ工科大学(MIT)

で客員教授を務めた。

スタンフォード大学で教職に就くかわら、エイブラムソンはIBMのためにビット・エラーを検出する方法を研究し、1961年に巡回冗長検査(CRC:Cyclic Redundancy Check)を考案すると、1963年12月に特許を取得した。次いで、局所的にビット・エラーが連続して発生するバースト・エラーを検出する方法を考案し、特許を取得した。また、パターン認識や人工知能、コンピュータによる地震分析などについても研究し、1962年に「統計的通信理論について(On statistical communication Theory)」、1963年に「情報理論とコーディング(Information Theory and Coding)」と題する書籍をスタンフォード大学から出版した。

2進数のデータは、メモリに書き込んだり読み出すときに、しばしば0と1が入れ替わるビット・エラーを起こす。エラーを検出する最も簡単な方法は、8ビット(8桁の2進数)のデータに1桁加えて9桁にし、各桁の和が偶数になるように記録して、読み出すときに各桁の和が偶数かどうかを確認することでデータの信頼判定を行なう。2進数で表記したASCIIコードのA(00000100)は各桁の和が1で奇数になるが、最後に1を付加して000001001にすると偶数になる。また、2進数表記のB(00000101)の各桁の和は偶数であるため、最後に0を付加して000001010とし、データの桁数を揃える。こうして数字の合計が偶数か奇数かを比較し、通信の誤りを検出する技術を「パリティ・チェック」と呼び、最後に付加する1桁を「パリティ・ビット」という。ただしこの方法では、エラーが偶数個発生しても各桁の和が偶数になるため、2ビット以上の誤りを検出できない。

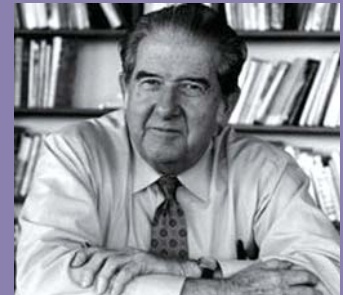
1947年にAT&Tベル電話研究所で

リレー式汎用計算機「Model V」を使用していた研究員のリチャード・ハミング(Richard Wesley Hamming)は、2週続けてビット・エラーで計算が台無しになったため、コンピュータにエラーを検出させて訂正させる方法を考え始めた。

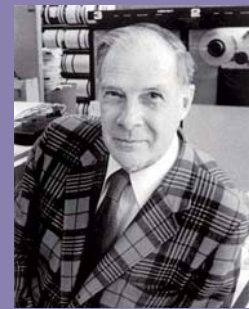
1937年にシカゴ大学を卒業したハミングは、1939年にネブラスカ大学で修士号、1942年にイリノイ大学アーバナ・シャンペーン校で数学の博士号を取得した。その後、ケンタッキー州のルイビル大学で教授を務め、1945年にロスアラモス国立研究所に入所してマンハッタン計画で原子爆弾の開発に従事したのち、終戦後の1946年にベル研究所に入所した。

ハミングは、4ビットのデータ(情報ビット)に3ビットの検査用符号(冗長ビット)を付加することで、1ビットの誤りを検出して自動的に訂正できる方法を考案し、その内容を「エラー検出およびエラー訂正コード」と題する論文にまとめて、1950年4月に発行されたベル・システム・テクニカル・ジャーナル誌で発表した。

パリティ・チェックでは偶数になったエラーを検出できないが、ハミングは符号間に「距離」の概念を導入した。2で割り切れる偶数の符号体系では、各符号は2以上の距離を保って存在しているとし、エラーが発生して値が1つ増えた場合は元の符号から距離が1つ離れたと解釈する。正しい符号間の距離は常に2つ以上離れているため、距離が1つ離れたコードは誤っていると判断される。データ・エラーの多くは1ビットだけ値が変化したもので、変化したビット数が多いほどエラーが複雑になり、その発生確率は小さくなる。ハミングは、エラーなしの距離が0、1ビットのエラーの距離を1、2ビットのエラーの距離を2と定め、ある符合が別の符合に変化する場合



ウィリス・ハーマン
(1918.8.16 ~ 1997.1.30)
Willis W. Harman
photo: Institute of Noetic Sciences



リチャード・ハミング
(1915.2.11 ~ 1998.1.7)
Richard Wesley Hamming
Copyright (c) 2006-2009 Alcatel-Lucent. All rights reserved

の距離を確率計算によって求めた。これは「ハミング距離」と呼ばれ、桁数が同じ2つの2進数(文字列)を比較したときに、対応する位置にある異なった値(文字)の個数を意味する。

ハミングの手法はECC(エラー検出・訂正)の原理となり、現在でもメモリのビット・エラー訂正に使用されている。ただ、ディスクの読み書きやネットワーク伝送では扱うデータ量が格段に多く、エラーの発生する頻度も高まるため、エラーを効率よく検出する仕組みが必要になる。

エイブラムソンが考案したCRCにはエラーを訂正する機能はないが、バースト・エラーを検出することができ、ハード

Technology Vision

ウェアへの実装が容易にできる。CRCではシリアル伝送されるビット列の0と1を多項式の係数とみなし、特定の数で除算した余り(modulo 2)を算出して、エラー検出用の符号にする。この符号を送信データに付加し、特定の数で割り切れるようにして伝送し、受信側は送信元と同じ数で除算する。余りが0以外の場合はデータにエラーがあると判断し、送信されたデータを破棄して

送信元に否定応答(NAK: Negative Acknowledgement)を送出してデータの再送を要求する。

CRCはその後、国際電信電話諮問委員会(CCITT)で標準化された。イーサネットや銀行のATM(現金自動預け払い機)、HDLC(ハイレベル・データリンク制御手順)のフレーム制御などに利用され、今日もデータ送受信の健全性を支えている。

ハワイ大学で無線パケット通信を着想

1967年夏に客員教授の仕事を終えたエイブラムソンは、ロサンゼルスでおぼえたサーフィンをするためにハワイを訪れた。そこでハワイの波のすばらしさに感激し、定住することを考えるようになった。

そして、電気工学やコンピュータ・サイエンス分野の教職を求めて、ハワイ大学に問い合わせた。打診を受けたハワイ大学では、エイブラムソンが有名大学に知り合いが多く、政府や企業のコンサルタント、国際電気通信連合(ITU)の委員なども務めていたことから、歓迎をもって受け入れた。こうしてエイブラムソンは、1968年9月にハワイ大学の電気工学部の教授に就任し、同大学でコンピュータ・サイエンス学科を創設する役割を任された。

その当時、オアフ島のホノルル市近郊にあるハワイ大学マノア校では、IBMが1965年11月に出荷開始した「System/360 モデル65」を導入してタイムシェアリングOSの「TSO (Time-Sharing Option)」を稼働させ、テレタイプ端末やデジタルイクイップメント

(DEC)のミニコンピュータ「PDP-8」などから、電話回線と音響カプラを使用して時分割方式で利用されていた。

ハワイ大学はマノア校のほかにも、ハワイ島ヒロに4年制のヒロ校とカウアイ、オアフ、マウイ、ハワイの各島に5カ所の2年制コミュニティ・カレッジを運営していた。また、こうしたキャンパス以外にも、ハレアカラ山やマウナケア山の天文台、船舶上で常時活動する地球物理学や海洋生物学の研究グループも、マノア校に設置されたコンピュータの利用を希望していた。

エイブラムソンは1968年9月に、直径400kmの範囲内に点在するこれらすべての施設でIBM System/360を経済的に共有利用する方法を検討し、19世紀末から音声通信用に使用されていたアマチュア無線を利用することにした。

これは、専用電話回線を必要な本数だけ用意すると相当のコストがかかるうえ、ハワイ諸島を結ぶ電話回線はノイズがひどく、通信が確立しにくかったという事情もあった。エイブラムソンは、船舶



IBM System/360 モデル65
photo: The Gallery of Old Iron

を含めた実験的な広域無線データ・ネットワークを海軍に提案し、海軍と空軍航空宇宙研究局が研究費の助成に同意した。

エイブラムソンは、トーマス・ガーダー(N. Thomas Gaarder)やフランクリン・クオ(Franklin F. Kuo)、シュー・リン(Shu-Hwa Lin)、ウェズリー・ピーターソン(William Wesley Peterson)、エドワード・ウェルドン(Edward J. Weldon)らとともに研究を開始し、1チャンネルだけのパケット通信でデータを高速転送する方法を1969年に考案した。そして、ヒューズ・エアクラフト社に依頼して、UHF帯の地上波無線通信で帯域幅が100kHzのチャンネル2本分の周波数を確保した。開発チームは、ARPANETでルータの役割を担うIMP (Interface Message Processor)の機構を調べてパケット通信の仕組みを理解し、中央コンピュータに接続した小型コンピュータから、パケットをユーザー端末にブロードキャストする世界初のパケット無線ネットワークの仕様をまとめた。さらに、エイブラムソンは米国防省・高等研究計画局(ARPA)の情報処理技術部(IPTO)にパケット無線ネットワークの構築を提案し、助成を獲得した。

無線データ・ネットワーク“ALOHAnet”

ARPA/IPTOの部長、ローレンス・ロバーツ (Lawrence G. Roberts) は、エイブラソンのプロジェクトを重視し、自ら設計に関与するとともに、ARPANETのソフトウェア設計を担当した大学院生にも協力を要請した。

エイブラソンの開発チームは、64キロバイトのメモリを備えたヒューレット・パッカー (HP) 製の16ビット・ミニコン「HP 2115A」を購入し、IBM System/360からユーザー端末が接続されているローカル・コンピュータにパケットを無線でブロードキャストして、ローカル・コンピュータのユーザー端末で受信するメッセージ・インタフェースを開発した。エイブラソンらはこのインタフェースを、ハワイの伝説上の小人族の名前から“メネフネ (Menehune)”と名づけた。

新ネットワークのパケットは、ヘッダ (32ビット) とヘッダ用のCRC (16ビット)、80

バイトのデータとデータ用のCRC (16ビット) で構成され、総ビット数は704ビットだった。メネフネはパケットをブロードキャストするが、受け取れるのはヘッダが指定したユーザー端末だけである。理論上の通信速度は9,600ビット/秒 (bps) だが、実効速度は4,800bps程度になる。

エイブラソンは、1970年4月に「ALOHAシステム-コンピュータ通信のもう1つの選択肢 (The Aloha System - Another Alternative for Computer Communications)」と題する論文をまとめ、1970年11月に開催された米国情報処理学会 (AFIPS) の秋期合同コンピュータ会議で発表した。この論文でエイブラソンは、フランスの数学・物理学者シメオン・ドニ・ポワソン (Simeon Denis Poisson) が1838年に発表した確率論「ポワソン分布」を利用し、ALOHAシステムによるネットワーク (ALOHAnet) における総伝送容量の有効利用率を18.4%と試算した。

この確率論は、単位時間あたりの事象の発生率 (平均値) と平均サービス時間の関係の評価することができ、ARPANETの実現に貢献したレオナード・クラインロック (Leonard Kleinrock) が、1961年に大規模ネットワークにおけるデジタル・メッセージの流量を分析して以来、パケット通信の測定基準になっていた。エイブラソンが試算したALOHAnetの有効利用率では、伝送容量の81.6%が、異なるユーザーのメッセージと衝突したりデータ・エラーを起こして消滅することになる。

ローカル・コンピュータに接続するメッセージ・インタフェースの開発は、アラン・オキナカ (Alan Okinaka) とデビッド・ワックス (David Wax) が担当し、ターミナル・コントロール・ユニット (TCU) と名づけられた。幅が約50センチ、高さが約180センチのTCUは、UHFアンテナ、トランシーバ、モデム、パケット・バッファ、制御ユニットを内蔵し、情報をパケット化してユーザー番号とCRCを付加し、それを送信するプロトコルと再送プロトコルが実装されていた。

ALOHAシステムでは、ユーザーはTCUに接続されたミニコンからいつでもデータを送信できる。データを送信したあと、TCUはしばらくリスニング・モードに入り、メネフネから受信確認 (ACK: Acknowledgement) 信号が送られてくるのを待つ。複数のユーザーが同時にデータを送信すると、データ・パケット同士が衝突して混信が起こるが、メネフネはパケットの混信やデータ・エラーを検出するとメッセージを破棄する。ACKを受信できなかったTCUはメッセージを再送信するが、ランダムに選んだ間隔で各端末から送信させることで、メッセージが再衝突する確率を下げた仕組みを導入していた。

1971年6月、ALOHAシステムのパケット送受信は、メネフネが設置された場所から約1.6km離れたエイブラソンの自宅にあるTCUとの間で成功する。次いで、直径100kmの範囲でも通信できることが確認された。

ARPA/IPTO部長のロバーツはこの成功を評価し、1972年5月に開催された春期合同コンピュータ会議で、将来の無線モバイル・インターネット・アクセスを予見する論文「パケット通信技術の個人用携帯端末への拡張」を発表した。

この頃、ゼロックス・パロアルト研究所



1967年に11月に発売されたミニコン「HP 2115A」
(c) 2004-2010 WordSong Communications P/L. All Rights Reserved.