

クロード・シャノンはデジタルを論じていなかった

得丸 公明(衛星システム・エンジニア) 東京都世田谷区深沢 2-6-15

1. デジタルとアナログはどう違うか

デジタルはアナログの進化形である。携帯電話の場合、第一世代はアナログで第二世代からデジタル化した。地上波テレビ放送は 21 世紀初頭にデジタル化し、まもなくアナログ放送が停波する。WiMax や無線 LAN などネットワークにはデジタルしかない。我々の回りで次々と通信がデジタル進化しているのに、デジタルとは何か、アナログとどう違うのかが実はほとんど論じられていない。

筆者は言語も哺乳類のアナログな音声通信がデジタル化したものではないかと考えている。ここでデジタルとは、(1) ミニマムな物質消費・エネルギー代謝で自由に産生し分けられ、相互に置換え可能な離散・有限符号を一次元配列した、(2) 符号語と意味の翻訳のために情報源符号化復号化(D/A 変換)が行われ、(3) 1 信号の誤りも許されないため、回線雑音によるエントロピー増大を受信点で吸収し、信号間の親和性に基づく誤り検出・訂正を行う通信路符号化が行われ、(4) 送信機、回線、受信機を媒体を乗り移りながら情報が自動的にネットワークしてオートマトンを形成する、複雑で深淵なシステムのことをいう。

デジタルとアナログの違いは、第 1 に、信号対雑音(S/N)比にある。デジタルでは、桁を増やせばいくらかでも計算精度を向上し符号語数を増やすことができるほか、計算や通信の都度回線雑音によって生じる歪が受信回路の雑音マージンによってリセットされる。アナログは計算精度に限界があるほか、計算や通信を重ねると誤差が重畳する。

第 2 の違いは、通信路符号化にある。デジタルでは 1 信号の誤りも許されないという厳しい精度要求があるため、符号間の演算や親和性を利用して、誤り検出や訂正が行われる。このおかげで符号語の位置や修飾が意味をもつようになり、符号語を文法で接続・修飾する二重分節化(シリアル通信)が行われる。アナログは符号間の演算ができず、歪みや誤りの訂正ができず、そのため文法もないため合図を送る程度のことしかできない。

2. デジタルと離散は別の概念である

上記の違いが理解されていないのは、情報理論の教科書がデジタルを論じていないからではないかと思ひ、古典とされる Shannon の「通信の数学的理論」(1)を読んだところ、(a) 本文中で一度としてデジタルという語が使われてない(Shannon は著作が少なく、ほかには IEEE が 1993 年にまとめた論文集(2)があるのみだがそこでも論じられていない)、(b) 彼が用いた「冗長性」、「符号化」、

「誤り訂正」、「蓋然性」、「変調の逆操作である復調」などの概念はアナログ通信にのみあてはまるものでデジタル通信にはあてはまらないこと、(c) 彼がエントロピーとよぶ概念は、bit データを処理するシフトレジスタの桁数を意味するが、回線雑音による熱力学的な量子ゆらぎにまったく対応していないことなどがわかった。

(1)では、書き言葉を離散情報源、話し言葉を連続情報源としており、離散はデジタルではないかという人もいるが、これは二つの点で妥当でない。

まず書き言葉には、活字の他に筆記体や草書・行書などの書体もある。どの場合も字の形状を記憶に照らしてアナログなパターン認識で読みとっている。一方、連続的な波形を示す音声は離散周波数成分をもっており、ヒトの脳は母語を音節列として聞き取っている。デジタルとは符号が離散的な物理・化学特性を示すだけではだめで、受信回路が自動的に離散判断をすることが必要である。

3. Shannon の概念はアナログ

Shannon の論じたことのうち、妥当でない可能性のあることを以下に列挙する。

3.1 英文表記の半分が冗長である

Shannon は英文表記の半分は冗長であるという。これは 1 音節を表現するのに数文字使う英文の場合、一部を消しても、読み手の記憶によって原文を回復できるというだけの話だ。音節文字の仮名と数音節を一文字で表現する漢字を使う日本語の場合、表記の冗長性は極めて少ない。

デジタルでは、1 信号の誤りもないという前提があるために、文法がなりたつのである。

3.2 使用頻度の高い文字を短くする符号化

Shannon は使用頻度の高い符号を短くすることを符号の最適化という。たとえばモールス信号で、使用頻度の高い e は・、t は-として表現される。これは符号と文字を 1 対 1 で対応させるアナログな符号化である。モールス信号において符号間の演算や、誤り訂正符号化技術は存在しない。

デジタル符号は、相互に置換え可能な有限個の離散符号の組として構成される。bit の 0/1、mRNA の AUGC の 4 元塩基、100 あまりある音節はこの条件に合致する。

デジタル符号化は表現型であり意味をもたないので情報源符号化が必須である。また通信路符号化も行われる。Shannon は意味を論じないことで情報源符号化は論じておらず、ハミング符号など誤り訂正符号化技術についても言及していない。

3.3 送信データと受信データを比較して誤り検出

Shannon は「誤り訂正符号の働きは、個人が構造と文脈に関する知識に基づいて、原稿中に相当数のタイプミスや訂正する能力と結びつく」と述べた(3)。「何が送信されて何が受信されたか(雑音による誤りを含めて)を共に見ることができる観測者(あるいは補助装置)」が誤りを監視して、「訂正通信路」を経由して訂正データを提供することが(1)の図8で示されている。

一人の人間が送信点と受信点の両方のデータを見比べて誤りを検出することは現実的には不可能であり、デジタル通信においてはブロック符号や畳み込み符号によって前後の符号間の親和性を高める前方誤り訂正(FEC)が実施されているが、Shannon はそれにまったく言及していない。

3.4 受信機は送信機と逆の操作

Shannon は、受信機は「送信機の行った操作とは逆の操作を行う」という。たしかにアナログのベースバンド信号の変復調は逆操作である。

しかしデジタルでは、受信機内で復調された位相や振幅や周波数成分を、タイミング同期して雑音マージンをもつ回路が判定して新たにデジタル信号を産生している。このメカニズムによって回線雑音による歪が吸収されるのだが、このことの重要性を Shannon はまったく論じていない。

3.5 0か1かを蓋然性や確率論として論ずる

誤り訂正符号化技術もデジタル判定回路も想定していないために、Shannon は受信データが0か1かを蓋然性や確率論の問題として考えた。これはアナログの発想である。

デジタル回路においては、スレッシュホルドによって回線雑音による量子揺らぎが多少あっても自動的に0か1かが決まる仕組みになっているため、確率論や蓋然性が出る幕はない。bit反転するほど大きな揺らぎがあった場合は、誤り訂正符号化技術によって符号誤りが検出・訂正される仕組みとなっている。

マルコフモデルもアナログな線形予測であり、デジタル技術とは無縁であると考えられる。

4. オートマトンとエントロピー概念

4.1 情報理論からオートマトンを排除した

Shannon は情報理論におけるエントロピーは熱力学とは無縁として取り扱っている。2を底にした対数値である「情報源から得られる1記号あたりの情報量」をエントロピーと定義する。そのためこの概念は扱うデータのダイナミック・レンジによって決まる定数となる。

Shannon は一般通信モデル上に雑音源を書き入れており、雑音が符号誤りを起こすことも知っていた。なぜ熱の関数である雑音と情報の乱雑さ(エントロピー)を結びつけなかったのか不思議である。

von Neumann は、自動で100%正確に情報を伝え、時としてより複雑な方向に進化する生命の神秘を解明するために情報理論の構築を試みたと述べている。そして、情報理論は未完成であるが、オートマトンの存在定理を確立するにあたって「かなり重要な点に至るまで熱力学の型と概念形成のあとをたどることになるだろう」と予言している(4)。

4.2 デジタルはノイズを自動的に乗り越える

エントロピーとオートマトンの関係は、デジタルに固有のものであり、アナログな発想しかもたない人間には理解できないと考えられる。

図1は横軸がS/N比で左に行くほど雑音が大きいため、縦軸は情報のエントロピー増大を示し、同時に受信点ではエントロピー要求値が送信点より大きい(緩い)ことを示す。このため回線上の雑音によって情報のエントロピーがある程度増大しても、デジタルは送信点のエントロピーが低く設定されているため、誤りない通信が自動的に実現できるのだ。

そして雑音が増大して環境ストレスが生命体に苦難を強いると、環境に適應するためにエントロピー利得の許す範囲で表現層での遺伝子組替えがおきて進化が生まれることも予想される。

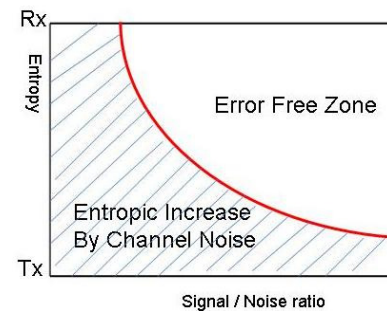


図1 デジタルエントロピー利得による誤りなき通信の領域(右上)

5. デジタル=情報=オートマトン

情報はデジタルであり、デジタルはネットワークして、自然に進化するオートマトンを生み出す。

これまで情報理論は Shannon のアナログな発想のみにとらわれて、デジタルやオートマトンと無縁に発展してきた。一方で遺伝子の世界は、ゲノムという意味単位を ncRNA が文法的に修飾・接続するエピジェネティクスが注目されている。今こそ情報理論はデジタル原理を熱力学的に解明し、進化がデジタルな情報現象として起こることを示すときではないだろうか。

参考文献:

- 1) C.E. シャノン, ワレン ウィーバー, 通信の数学的理論 ちくま学芸文庫 植松 友彦訳 2009
 - 2) Claude E. Shannon; Collected Papers, IEEE Press 1993
 - 3) C.E.Shannon, Information Theory, id. pp212-220
 - 4) J. von Neumann, Statistical Theories of Information, (1949年にイリノイ大学で行なわれた講義の第3回) pp 460-466, Papers of John von Neumann on computing and computer theory / edited by W. Aspray and A. Burks MIT Press, 1987
- Claude Shannon did not discuss "Digital". Kimiaki Tokumaru