特別寄稿

東京大学　大学院工学系研究科　バイオエンジニアリング専攻／電気系工学専攻　教授　田畑（たばた）　仁（ひとし）さん

雑音が叶える未来の省エネルギー

先日，大学間研究交流の一環として南米チリ共和国を訪れた．チリは南北に4,000km以上広がる大変に細長い国であり，北部のアタカマ砂漠から，風の大地と称される南端のパタゴニア地区に至る実にさまざまな気候帯を有している．同地区に位置し南極への玄関口の1つでもあるプンタ・アレーナス．美しい氷河で著名なパイネ国立公園に隣接する都市のプエルト・ナターレス．そこでは見渡す限りに広がる地平線や氷河が削り取った急峻な山と海とのコントラストがみられ，大自然に抱かれたスケールで，人間がいかに小さな存在であるかを痛切に感じさせられた．一方日本において，我々が日々の生活の中で体験している，自然に対する感覚はそれとは異なるように思う．日本人は自然のさまざまな現象や変化を敏感にくみ取り，常に身近に感じて暮らしてきた．そして我々は，自然に寄り添い，自然現象や季節の変化をわび・さび，風流として楽しむ文化を有している．

季節を表現する二十四節気の寒露の末候辺りを指す七十二候の1つに「蟋蟀在戸（きりぎりすとにあり）」の句がある．昔は「こおろぎ」のことを「きりぎりす」と呼び，虫の声を代表的な秋の風情の1つとして愉しんだ句である．しかし，川のせせらぎ，そよ風，雨しずくの音など，日本人には情緒があり風流に聞こえる音色も，西洋人には単なる「雑音」としか聞こえないようである．これは虫の音を右脳によってノイズとして処理する西洋人と，左脳により言語の一種として認識する日本人の差異であるといわれている．社内公用語に英語を採用する企業が現れ，大学ではグローバルキャンパス構想などで国際化がこれまで以上に必要とされる中，お互いの文化や習慣を理解するとともに生理学的な背景も心得て付き合う事が肝要であるといえるだろう．

この「雑音」であるが，情報エレクトロニクス分野では「ノイズ」として扱われ，不要なものとして，可能な限り排除する努力がなされてきた．ところが，バイオの世界では，この我々の生活に不可避の“雑音（ノイズ）”を，信号検出の高感度化，動作の省エネルギー化の観点で極めて有効に利用している．例えばコオロギの尻尾付け根の体毛は気流などの環境雑音（エネルギー源）を利用して振動していた方が，無風環境よりも天敵のスズメバチの羽音をより敏感に察知して退避行動をとることができる．適度な「雑音」が存在する方が，むしろ危険探知能力が向上するのである．この機構は確率共鳴現象と呼ばれ，熱力学的運動方程式であるランジュバン方程式*1のノイズ項として，熱ゆらぎ項に繰り込まれている．一般にエレクトロニクスの世界では排除すべき悪者とされている“雑音（ノイズ）”が，バイオ世界では極めて有効な信号・エネルギー源であり，自然に寄り添った生物の智恵，マイナス因子を逆に活用する生物生来の能力，まさに究極の省エネルギー機構である．

このような高感度・省エネルギーセンシング機能に限らず，脳機能すなわち生体の情報処理においても，ノイズである「熱雑音*2」を利用している．この機構の特徴は，確率共鳴原理が有効に働くことで処理速度は低速であるが，熱雑音と同レベルの低エネルギーで確率的に動作する点にある．この一見あいまいで確率的にゆらぐ素子がネットワークとしてシステム化されれば，脳に見られるような生体特有の柔軟で省エネルギーな情報処理が可能となる．またアルゴリズムを自発的に形成することができ，そのシステムは環境変動に対し頑強（ロバスト）なものになる．このようにバイオシステムには学ぶべきところが多い．

周知のとおり高度な超スマート社会を支えるためには，ハード技術としてのコンピュータやエレクトロニクスデバイスの高性能化，高機能化が極めて重要な課題となっている．同時に世界的規模で議論されるCO_2排出削減や，特に東日本大震災後の電力事情を背景とした省エネルギーエレクトロニクスの実現が喫緊の課題となっている．

日常生活の利便さはコンピュータ速度の劇的変化やメモリ量の飛躍的増大によって支えられている．例えば，MS-DOS時代の1980年代は記録媒体にフロッピーディスク（記憶容量640kB）が，CPUに

Profile

昭和63年京都大学工学部卒．同年川崎重工業㈱技術研究所入社．平成6年大阪大学助手，助教授／准教授，教授を経て，平成18年より東京大学大学院工学系研究科教授．博士（理学）．酸化物エレクトロニクス，バイオエレクトロニクス・フォトニクス融合研究に従事．第1回応用物理学会講演奨励賞，平成12年丸文研究奨励賞，平成20年日本学術振興会賞，平成25年応用物理学会優秀論文賞受賞，平成26年応用物理学会フェロー．

はザイログのZ80やインテルのICチップ8086，80286などが使われていた．その頃のCPU熱設計電力は1～2Wに収まっており，計算速度はクロック数で数MHz，使用されているメモリトランジスタ数も1万個以下と少なかった．それが2016年では熱設計電力で約100倍，計算速度は数GHz，メモリトランジスタ数では4桁以上増の1～100億個と高集積化が進んでいる．

経産省の調べによれば[1]，ICT（Information and Communication Technology）機器の消費電力が国内総発電量に占める割合は，2006年時には6％であったものが，2025年に約20％，2035年に50％，そして2050年には60％を占めると予測されている．このようにICTによる電力消費（エネルギー）需要は，情報サーバの電源をはじめとする必要電力量の増大に伴い加速度的に大きくなっていくと予測されている．省エネルギーデバイスの視点から記憶保持に電力を消費しない不揮発性メモリの利用や，待機電力を極力低減させるための構造最適化などさまざまな工夫が試みられているが，抜本的な解決が必須の課題である．

一般にコンピュータの特徴は，「雑音」に対して十分に高いエネルギーを用いてエラーを極めて低く押さえ，決定論的動作を高速に行う点にある．ノイマン型プロセス*3によりブール代数*4を解くという明確な目標設定のもとで室温エネルギーの約100倍に相当する膨大なエネルギーを利用して，エラーが$1/10^{80}$以下にまで抑え込まれて決定論的に動作している．しかしその低エラー率で高速な情報処理は膨大な電力消費を伴う．また，その動作を規定するアルゴリズムはソフトウェアとしてハードウェアから切り離され，システムは環境変動に対し脆弱である．

一方，生物は室温の数倍程度のエネルギーを利用して，その誤り頻度はおよそ$1/10^4$である．そこでは熱雑音（ノイズ）が本質的な役割を果たし，状況・環境変化に応じて目標が変化する自律型である．コンピュータにとっては悪者である雑音（ノイズ）が，バイオの機能発現には本質的な役割を果たしている．このような生体の持つユニークな“ノイズ”を活用する事で，エレクトロニクスの新しいパラダイム開拓が期待される．

新しい年が明け，希望と活力に満ち溢れた1年が本格的に始動する小寒次候（1月10～14日）を指す二十四節気七十二候の言葉に「水泉動（しみずあたたかをふくむ）」がある．地上の空気はまだまだ冷たいが，大地の下では凍結した泉の水が溶け，春に向けて少しずつではあるが着実に動いている．そのような意味である．研究にも経済にも通ずるこの自然現象のその根幹要素が，まさに環境中に存在する“雑音”なのである．

文　献

[1] 高濱 航：“グリーンITイニシアティブの推進，”経済産業省商務情報政策局，Oct. 2008.
http://www.csaj.jp/seminar/2008/081006_meti.pdf

＊1 **ランジュバン方程式**：熱振動力によるブラウン運動を記述する方程式．熱力学的運動方程式とも呼ばれる．
＊2 **熱雑音**：自由電子の熱運動により生じる雑音．
＊3 **ノイマン型プロセス**：記憶部に内蔵されたプログラムに従い，バスを介してCPUへ命令やデータが転送され逐次処理される計算方式．一般的なコンピュータの大半はこのプロセスにより動作している．
＊4 **ブール代数**：命題の真偽を0と1の2値の演算によって処理するための代数で，計算機による論理積や論理和などの論理演算の基礎となっている．