



## 特集Ⅱ

# 生体内での分子のブラウン運動を情報通信分野に応用

ナノ ICT グループのペパー主任研究員はコンピューターの並列分散処理やパターン認識といった研究を経て、1990 年ころから現在のナノ、バイオを利用した研究を進めています。ナノテクノロジーによる分子デバイスを実装し、分子の性質をアルゴリズムに取り入れる分子コンピュータのための新しいアーキテクチャー研究の現況をお聞きしました。

**Q: 半導体デバイスは微細化することで集積度を上げてきましたが、微細化が進むたびにノイズの問題を解決しなければなりません。ところが生物はノイズを利用しているとのことですが、どのようなことでしょうか。**

**ペパー:** 現状のシリコン半導体を代表する LSI の Si-MOSFET は年々進む電源電圧の低下とプロセスルールの微細化に伴ってノイズが増え、信号品質は年々劣化します。ノイズの制御も LSI のトランジスタの規模がナノスケールになると限界が生じ、近い将来、コンピュータはエラー発生率が大きくなり、精度を保証できなくなります。

ところで生物は自己の環境でノイズを効果的に利用しています。例えば、バクテリアの鞭毛は回転しながら餌の方向に進んでいく分子モーターです。バクテリアのサイズになると水や気体分子はあらゆる方向に激しい勢いで絶えず飛び回りバクテリアに衝突しています。このような粒子の動きは、マクロの世界ではノイズとされ、できる限り排除しようとはしますが、鞭毛の分子モーターは

むしろこのノイズを分子モーターの回転にうまく利用しています。雑音を排除するのではなく、効率よく利用しているのが生物です。

このように生物の持つ分子的メカニズムはナノテクノロジーにおける分子の相互作用と似ています。ナノテクノロジーによる回路を作製中、生物のシステムも分子の相互作用であることに気づき、これが利用できないかと考えました。

**Q: 分子モーターはどのような動きをするのでしょうか。**

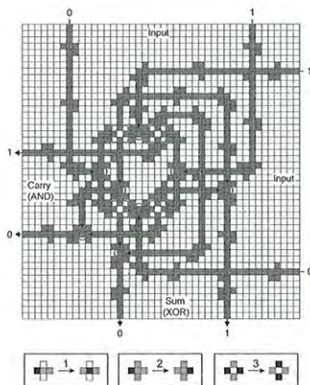
**ペパー:** 分子モーターの動きをブラウン運動といいます。ブラウン運動とは非常に微小な粒子が乱数的に動くことをいいます。イギリスの植物学者ロバート・ブラウンが、植物の受粉の研究から発見した粒子の運動のことです。

**Q: コンピュータのアルゴリズムなどを表す数理モデルの一つであるセル・オートマトンにブラウン運動を実装され、どのような効率の良さが表れたのでしょうか。**



**ペパー:**乱数的な動きで、予測のできないランダムな動き、偏差を「ゆらぎ」といいます。ブラウン運動を分子デバイスモデルや回路モデルに展開し、ノイズおよびゆらぎというランダム性が情報・通信システムに有効であることが分かりました。

セル・オートマトンにブラウン運動回路を実装することを学会で提唱しました。セル・オートマトンとは有限次元の格子と単純な規則からなる計算モデルで、対象となる空間を等間隔に区切り、各格子内でとりうる状態を離散量として定義すると、時間を更新したときに対象全体がどのように変化するかを見ることができます。生物学的な動きの導入に大きな反響があり、このときに発表した学会「Automata 2008:EPSRC Workshop on Cellular Automaton Theory」でこのときに発表した論文が2008年のベストペーパーに選ばれました。



**図1**  
半加算器のブラウニアンセルオートマトンにおける局所形状(1)(2)(3)の遷移ルールによって2つのビットが加算される。加算の動作が計算の基本になる。

**Q:**計測自動制御学会学会誌『計測と制御』2010年4月号に「ナノコンピュータ用のブラウン回路」を寄稿されました。ブラウン回路とはブラウン運動を利用する回路でしょうか。

**ペパー:**分子デバイスを使った分子コンピュータは、分子の性質をアルゴリズムに取り入れることで、一つのプロセッサで複数の計算処理を可能にし、さらにコンピュータ自体も非常に小さく安価にできる可能性を秘めています。ナノスケールの分子や原子などの粒子はブラウン運動による乱数的な動きは粒子が多様な動作をします。ノイズやゆらぎというランダム性はコンピュータと通信システムのアーキテクチャーを構築するでしょう。この論文では状態空間におけるランダム探索が活用する原



神戸研究所 未来 ICT 研究センター  
ナノ ICT グループ 主任研究員

**ペパー・フェルディナンド**  
工学博士 (Ph.D)

**学歴**  
1989年 デルフト工科大学大学院 理論コンピュータサイエンス博士課程修了

**職歴**  
1990年 STA フェロー  
1993年 通信総合研究所 (現 NICT) 入所 研究員、主任研究員 (現職)  
1997年 カリフォルニア大学サンフランシスコ校 Keck Center for Integrative Neuroscience 客員ポスドク (1年間)  
1999年 兵庫県立大学 (元姫路工業大学) 大学院工学研究科 客員教授 (現職)  
2005年 広島大学大学院工学研究科 非常勤講師 (2年間)

休日には、子ども達と一緒に過ごせる時間を見つけて、水泳の練習や2人用のピアノを弾いたりして過ごすというペパーさん。ロボットを作成することも楽しみの一つだそうです。

理とトークンベース回路を使ってデッドロック解決のためにランダムな探索行動を利用する原理について論議しました。

**Q:**生物から非常に効率のいい活動を学びましたが、次はどのような分野を研究されるのでしょうか。

**ペパー:**脳はコンピューターと比較すると計算は遅いですが複雑な画像でもパターン認識は速い。脳は140億個の神経細胞が50兆個の結合を持っています。しかし脳の消費エネルギーはわずか1ワットで、これではノイズを遮断することはできません。遮断ではなく、ノイズやゆらぎを利用してうまく制御しているのではないかと考えられています。

脳における情報符号化、特に神経細胞の発火が同期化するかしらないか、それによるどの情報があるのかについての研究を行っています。脳は雑音があっても、非常に高効率な動作ができ、この動作の原則を理解して、その原則に基づいて、さらに高効率情報処理と通信のアルゴリズムを開発したいと思います。



**図2** 乱数的な動きを持つブラウン回路ロジック空間である回路において、ブラウン運動による乱数的な探索によって、入力から出力までの計算の道が見つけられる。