

# Everything, everywhere

あらゆる場所の、あらゆるものに

Nature Vol.440(402-405)/23 March 2006

J. MAGEE

小さなコンピューターが生態系や建物、さらには人体までも常時監視するようなことになれば、科学は大きく変化するかもしれない。Declan Butler が探る。

「研究室で何やってるんだい。フィールドワークに出かけるよ」。普通、コンピューターに向かってこんな問いかけをしたりはしない。しかし、「スマートダスト」の名でも知られる新たな情報技術の考案者によれば、そんなやりとりもやがて当たり前のことになる。

現在のコンピューターの多くはデスクトップ型で、科学でコンピューターが真価を発揮するのは通常、研究プロセスのずっと後半においてである。問いが立てられ、答えにつながりそうなデータが特定され、そのデータが収集される。コンピューターの番はようやくここからだ。だが、将来はこの位置づけがひっくり返るかもしれない。コンピューターは室内の事務屋から野外の作業員となる可能性があるの

だ。1日24時間、年がら年中、コンピューターは生態系や人体の、検知可能なあらゆる変数を測定するようになる。しかもナノメートルレベルから大陸スケールまで、どんな規模でも対応可能だ。

このような新しいコンピューターは、データの処理や伝送という機能が組み込まれたセンサーによるネットワークを形づくる。「モート」「ノード」あるいは「ポッド」とよばれる小さなコンピューターが、世の中の構造体の中に無数に埋め込まれる。それらは協調的に機能してそれぞれの収集データを共有し、そしてデータを処理して世界をデジタルで実際に表現していく。研究者はこの「センサーウェブ」を利用して、新たな探究を行ったり仮説を検定したりするわけだ。どこか別の場所で

科学者が忙しくしていても、センサーウェブは外界の変化を受けて動き方を適切に調節し、事象を自律的に分析し続ける。

この筋骨きに無理があるというなら、1970年代に大型コンピューターの所有者が、なぜこれが世界中のデスクにたくさん置かれていないのかと問う姿を想像してみしてほしい。その答えは、「単に時間の問題」にすぎなかった。以来、世界中の演算能力の蓄積と、各地に備えられた装置の数は飛躍的に増大し、ネットワーク技術の能力も大幅に向上した。この流れは衰える兆しをみせず、幅広いセンサー網はでき上がる可能性があるというよりも、もはや必然だ。このことを身近に感じるのに先見性なんて必要ない。すぐにでも、今日のデスクトップ機の性

能を搭載した小型機器はどこにでも設置されるほど安価なものになるだろう。

ワシントン大学（米国、シアトル）のコンピューター科学者 Gaetano Borriello は、このようにあちこちで演算能力が幅広く利用されるようになれば、実験科学自体の発展によりもたらされたのと同じくらいのパラダイムシフトが起きるだろうと考えている。「世の中からリアルタイムのデータが初めて大規模に取れるようになるのだ」と Borriello は話す。

研究者は、自分で苦心してデータを収集しなくても、外界のあらゆる局面に関する最新のデータベースを瞬時に探り当てることができるようになる。多くの臨床患者から絶えずデータを取り続けることによって、疾患の理解が進み、治療の効果が追究されるようになるだろう。心拍数や血中酸素の連続監視装置などの医療用センサーを身の回りに組み込む研究を行っている Borriello は「データを選別してパターンを見つけるという、これまでとはかなり違った考え方をするようになる。仮説の立案と検定は、今よりもはるかに短時間で繰り返されるようになるだろう」と話す。

オークリッジ国立研究所（米国テネシー州）で軍事・国土安全保障用のセンサーウェブを研究している Mallikarjun Shankar も同じ考え方で、「コンピューターで処理された風景を見る。それが実際の世の中との接点になる。コンピューター科学が明らかにする世界、それが新たな現実世界なのだ。次のフロンティアはここにある」という。

### 仮想から現実へ

ヨーロッパ最大の氷床の支流で、その下に埋もれる花崗岩に向かって氷に穴を開けることは最もよい例だ。サウサンプトン大学（英国）の Kirk Martinez がここ数年間取り進めてきたセンサーウェブは、主にこの研究に関わっている。Martinez は、ノルウェー北西部のブリクスダール氷河（ヨステダール氷原の一部）の動態を研究する雪氷学者を支援し、気候変化と天候パターンが氷原に及ぼす影響の解明を目指している<sup>1</sup>。

Martinez のチームは熱水の「ドリル」を用い、毎回 12 個ずつ、別々の地点で氷の深部にポッドを設置している。各ポッドにはセンサーが取り付けられていて、温度や圧力、動きなどの項目を測定している。収集したデータは、氷河の流速の算出と氷河底の動態のモデル化に利用されている。このセンサーウェブは、個々のポッドが協力し合うようにプログラムすることができる。Martinez は「ポッドは互いに話しかけ、測定値がほとんど変化していないから最近は大したことが起きていない、1 つが起きていて、何かが始まったらみんなを起こすから、ほかのものは休んでバッテリーを節約しよう、というような判断ができる」という。

Martinez 自身はコンピューター科学者であって雪氷学者ではない。こうしたセンサーウェブに必要とされるさまざまな技術を集約するという課題を得たいと考えていたことから、苛酷な環境を四六時中遠隔監視するこの仕事に興味をもった。「これは技術的に非常にむずかしい」と Martinez は話す。

コンピューター科学者でない者にとってはさらにたいへんな話だ。CrossBow 社や Dust Networks 社（いずれも本拠地は米国カリフォルニア州のベイエリア）など、多数の新興企業が製造するタバコ箱サイズやクレジットカード大のポッドは、すでに既製品の形で購入することができる。しかし、これは出発点にすぎない。特定の科学的用途に用いるセンサーウェブの構築には、特にプログラミングの面で大規模なカスタマイズが必要なのが現状だ。

ジョンズホプキンス大学（米国メリーランド州ボルティモア）の生態学者である Katalin Szlavecz は、土壌の生物多様性と栄養循環を研究している。Szlavecz がセンサーウェブにのめり込んだのは、限られたデータで複雑な問題を解こうとするにはあまりに制約が多いからだった。土壌は地上の生態系で最も複雑とされる階層だが、サンプルを手作業で収集して持ち帰り、研究室で分析しなければならないという現実が足かせと

なり、理解はあまり進んでいない。「無線式のセンサーネットワークがあれば、これまでは不可能だった時空間での測定ができ、土壌生態学が大きく変わることになる」と Szlavecz は話す。

### データの流れ

昨年 9 月、Szlavecz は大学の敷地のすぐそばを流れる小川沿いにモートを 10 個配備した。各モートは土壌の水分と温度を分刻みで測定し、そのデータはネットワークを通じて定期的に室内のコンピューターに送られてくる。

これは単純な話にも聞こえるが、実際にはポッドを動作させるためだけに、コンピューター科学者、物理学者、数人の学生プログラマーという学際的なチームを編成しなければならなかったという。Szlavecz は、ポッドのネットワークが広がっていくこと自体は「間違いない」とするが、もっと簡単に展開できるようになることが条件だと話す。経済性も問題で、「ユニット 1 つに約 300 ドル（3 万 5000 円）かかる。でも、学生が作業する時間も算入すれば、1,000 ドル（12 万円）くらいにもなる」という。しかし Szlavecz は、マイクロソフト社が出資するこの小規模試験について、土壌の小気候が示す変化をはじめて解明するとともに、降雨が乾湿サイクルにどう影響するかを明らかにすることができ<sup>2</sup>、成功だったと話す。



眠らない目：モートとよばれる小さなコンピューターが、ある日あらゆるものに取り付けられているかもしれない。



未来の科学：氷の下に埋めた小型センサーを追跡することにより、ノルウェーの氷河の流れを絶えず観測し続けることができる。

### 広がるセンサーウェブ

Dust Networks 社の創設者で最高技術責任者でもある Kris Pister は、Szlavec の経験したような困難はごくありふれたものだと言語。スマートダストという言葉を作り出し、目に見えないほど小さなセンサーを組み合わせて頭で把握しきれないほどのネットワークを構築するという構想を発表したのは、カリフォルニア大学バークレー校（米国）にいたこの Pister だった。Pister は、この技術の軍事への応用に興味をもつ米国国防総省高等研究計画局から資金を得て、センサーウェブの原型を構築した。しかし、市場の資金を得て Dust Networks 社を設立することにしたのは、さらに利便性の高いシステムを構築したいという欲求からだったという。「すばらしさは示せたのに、実際に木や川に設置できる実物を科学者に提供できなかったことにいらだちがあった。求められているのは、外の世界にただ置くだけで済むセンサーと、そこからデータを取ることなのだ」と Pister は語る。

Pister は、センサーウェブ開発の現状を初期のコンピューターになぞらえる。「参入に必要な時間とノウハウをもち、この

ツールをどう使いこなせばよいのかを学べる専門家がセンサーウェブの最先端にはたくさんいる。しかし、専門家以外の人々がやってきて使おうとしてもむずかしい」という。一方で、初代ウェブブラウザの「モザイク」やその後継の「ネットスケープ」がワールドワイドウェブの一般への広がりを誘起したように、もっと扱いやすいセンサーウェブのツールができれば関心も大きくなるだろうと予想する。

科学への応用にも興味をもつものの、Pister の主要な目標は稼げる制御システム用の産業市場にある。米国エネルギー省と契約し、工場、オフィス、家庭用の「インテリジェント」な自己監視照明システムを構築するための支援を受けている。この用途の照明が使用する電力量は 6000 億キロワット時で、建物の総電気使用量の 30% にあたる。「次のステップとして、何らかの形で実際に規格が採用され、商業利用されるようにしたい。そうすればコストが下がって性能は向上し、科学向けにも手がけられるようになる」という。

現在のセンサーウェブ技術でも研究用途は増加している。ジェット推進研究所（JPL；米国カリフォルニア州パサデナ）は

NASA の惑星科学研究の大部分を取り仕切る施設だが、そのほかにも、植物園にはじまりセビレッタ国立野生生物保護区（米国ニューメキシコ州中央部）にいたるさまざまな環境で、洪水や汚染、小気候などを調べる大規模なセンサーウェブを 9 件運用している。今年 3 月、JPL のセンサーウェブ計画の責任者である Kevin Dellin は、この事業を Sensorware Systems 社として独立させた。

### 巨大ネットワークの構築

しかし、現在のセンサーウェブは野外で科学活動を行うには大きな制約がある、と CENS（Center for Embedded Networked Sensing；米国カリフォルニア州ロスアンゼルス）所長の Deborah Estrin は語る。CENS は大学グループと共同で、地上および海洋を拠点とする監視プロジェクトを進めている。Estrin によれば、センサーウェブだけではモニタリングで得たいとされるデータのすべてを満たすには不十分な場合が多く、しかもきめ細かな野外実験でたびたび必要とされるポッド密度は、センサーのコストの問題で達せられないのだという。

地球の監視という壮大な計画を完成させるにはセンサーウェブの大変革が重要になると Estrin は考えている。大陸と海洋を監視するこのプロジェクトでは、何十億ドルもの資金がつかまされることになっている。たとえば米国立科学財団の海洋観測イニシアティブ (OOI) は、太平洋の海底にギガビットの「バックボーン」(光ファイバーのデータキャリア) を設置するため、今後 6 年間で 3 億ドル (約 350 億円) を投じる計画だ。地上では、計画中の米国立生態観測施設ネットワークを使って、地域レベルから大陸スケールまでの地上生態系をリアルタイムで研究することを目指している。さらに地中では、北米大陸の地殻から核までの 4 次元構造が「アーススコープ」プロジェクトで探査される。局所的なセンサーウェブとこうしたほかのネットワークのすべてを統合することは、観測科学が発展していくうえで直面する大きな難問の 1 つだ、と Estrin は話す。

このような巨大観測設備は、Szlavec がボルティモアの小川にいくつも配備したセンサーとはまったく別物のように思えるかもしれない。しかし、質の高いリアルタイムデータを環境から可能な限り収集するという点で、その根本は極めてよく似ている。OOI 執行運営委員会議長の Robert Detrick は「個々のデータファイルではなく、連続的なデータの流れが取り扱われるようになる。さまざまなセンサーからの入力情報を双方向的に組み合わせてバーチャルな観測施設を構築するのだ。センサーはあらゆる場所に設置されるようになる」と語る。

海洋学者は自分の研究船が任意のタイミングで通る海域しか観測できない場合が多い、というような現実の打破を OOI は目指している。海底の光ファイバーバックボーンの面倒をみるのは、多数の小型自走式潜水艦だ。これらはセンサーを積み、サンプリング活動に出かけ、バックボーンに戻ってバッテリー充電とデータのアップロードを行う。「潜水艦は互いに音でコミュニケーションをとる。そのなかの 1 つが『お

い、こっちに変なのがあるぞ、来いよ』なんていうのかもかもしれない」と Detrick は興奮気味に話す。構造プレートについては定置式センサーが全体を連続監視する。地震や火山噴火、海流の不安定状態などの突発事象はリアルタイムに捕捉される。どれも観測船ではできない類のことだ。

ただ、このような大規模ネットワークを存在させるには大きな課題があると Estrin はいう。センサーウェブは数々のデータ収集システムのなかの 1 つにすぎないということも十分にありうる。こうしたシステムでは、衛星のリモートセンシングデータから現場での測定値まで、さまざまな時間空間における情報を引き出す。

それらのすべてを管理するには装置間での大量のコミュニケーションが必要で、さまざまな種類のネットワークが互いに作用できるような新たな統一規格とオペレーティングシステムの開発が大きな課題となる。センサーとセンサーネットワークは、自らが集めるデータは何についてのものか、データをどのように入手・校正したか、誰に見せてよいのか、異なるニーズをもつユーザーに対してどのようにデータを見せればよいのか、という点について互いにコミュニケーション



生態学者 Katalin Szlavec は、小型のコンピューターを使って土壌水分の変化を分刻みで測定している。

ンが取れる必要がある。Shankar は、規格の欠如がセンサーウェブ問題を解決不能にしているわけではないが「この分野の進展を数年遅らせている」という。

### 瞬間をとらえる

いくつもの問題を併いながらも、センサーウェブの利用は増大し続けている。最初の 10 個のポッドでいろいろと苦労した Szlavec は、200 個からなるネットワークにまで増強している。専門家は、最終的にあらゆるものにセンサーが埋め込まれることについて、根本的な障害はないと考えている。Borriello は「我々は正しい道を進んでいる。そしてさまざまな意味ですでにゴールに達したといたい」と話す。Estrin によれば、2020 年までには、グーグルアースのような視覚化ツールを利用する研究者が、古い衛星画像にとどまらない「地球の複数地点のリアルタイムでの現場観察」ができるようになるという。

データネットワークは科学データのレポジトリになるのではなく、やがてそこから研究の出発点となるのだろう。科学者の思い描く世界が我々には突拍子もないものに映るのと同じく、コンピューターがデスクトップやポータブルだけだと考えられていたころを研究者が振り返ると、奇異な世界に感じるのかもしれない。これほどまでにコンピューターに依存する科学は生命の本質からかけ離れていると考えられることもあるだろうが、未来の科学者は今の世界を抽象化されたものとして振り返るのかもしれない。皮肉っぽくいえば、今の科学こそデータ選択と実験室分析の不自然さに縛られたバーチャルリアリティのようなもので、本当の世界の本質をとらえるところまではまだ達していないかもしれないのだ。 ■

Declan Butler は *Nature* のシニアレポーター(パリ)。

1. Martinez, K., Riddoch, A., Hart, J. & Ong, R. in *Intelligent Spaces* (eds Stevenson, A. & Wright, S.) Ch. 9, 125-138 (Springer, 2006).
2. Musualoiu, E. R. et al. *Life Under your Feet: A Wireless Soil Ecology Sensor Network* (submitted) The Third IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (2006).