

WATER UNDER PRESSURE

日本語特集

nature

2008年3月20日号「特集：水」より

翻訳監修：沖 大幹

東京大学 生産技術研究所





「WATER UNDER PRESSURE」 日本語版の刊行にあたって

現在、世界人口の約 15% にあたる 10 億人以上が、安全な水を手に入れることができないといわれています。水問題の最大の要因となっているのは、発展途上国における人口の増加と急激な経済発展です。人口増加は、単に飲料水の不足を意味するだけではありません。人口に見合う食料の生産、すなわち農作物栽培に膨大な水が必要となるのです。また経済発展に伴い、工業用水、発電用冷却用水などの需要が大幅に増加すると予想されます。

利用可能な水（淡水）について考えるときに、降水量および降水パターンの測定・予測は重要なポイントとなります。その際、気候や気象を全地球的な観点でとらえるだけでなく、局所的な気象も考慮に入れることが必要です。例えば、農業や牧畜を主な産業とした地域では、局地的な干ばつの規模と時期が水の利用可能性に大きくかかわっています。また同様に、日本で近年発生しているゲリラ豪雨も、長期的にみて平均降水量の変動に大きな影響をもたらすかもしれません。局所レベルでの水の利用可能性と降水量を測定・予測することが今後の課題ですが、実際にはむずかしく、不確実なものとなっています。

現在の水資源管理を改善できるとすれば、限られた季節に利用できる水の管理の改善、かんがい方法の改善、「ブルーウォーター（湖沼や河川の水）」から「グリーンウォーター（土壌系、植物系内の水）」へのシフトが考えられます。また、水が不足している地域でかんがいをして農業を営むより、水



ISTOCKPHOTO

資源の豊富な地域で生産された農産物を輸入したほうが合理的であるという、「仮想水（バーチャルウォーター）」を導入することも策の1つとなるでしょう。そして、各国・地域の機関が、水資源の管理能力と水問題への対応能力を強化することが非常に重要となります。

Nature では、2008 年 3 月 20 日号で、水資源の利用法、管理法、産業とのかかわりなどの観点から、水問題の現状と将来の展望について特集しました。本冊子では、その中から厳選した記事を日本語に翻訳し、さらに、水資源研究の第一人者である東京大学生産技術研究所の沖大幹教授による、日本における現状についての総説を掲載しています。また、去る 2008 年 11 月 8 日には、ブリティッシュ・カウンシル（東京）において水問題についての「Nature Café」が開催され、上述のような論点から活発な議論が繰り広げられました。本冊子の最後では、このようすについても報告しています。

世界は今、「水の危機」に直面しています。水資源に恵まれていると思われがちな日本にとっても、「水の危機」は決してひとごとではありません。世界の水問題は、日本にも直接的、間接的に大きくかかわっています。今後、気候変動による降水量の変化が及ぼす影響も予想されます。この冊子が、水問題について改めて考えるきっかけになることを願います。

2009 年 1 月

NPG ネイチャー アジア・パシフィック

EDITORIAL

- 2 水の確保に向けた新しいアプローチ

NEWS

- 4 「塩」を取り除く

NEWS FEATURES

- 7 苦境に立つ「水」
8 長く乾燥した夏
13 一滴の水でより多くの作物を
19 先行き不透明なインドの水問題対策

FOCUS ON JAPAN

- 24 水問題解決へ向けた
先進国と科学技術の役割
沖大幹

REPORT

- 27 第 2 回 Nature Café レポート

NPG ネイチャー アジア・パシフィック
〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-37 千代田ビル
Tel. 03-3267-8751 Fax. 03-3267-8754

© 2009 年 NPG Nature Asia-Pacific 掲載記事の無断転載を禁じます。
表紙イラスト：DAVID PARKINS

社説

A fresh approach to water

水の確保に向けた新しいアプローチ

Nature Vol.452 (253) / 20 March 2008

人類を脅かす水不足は、農業やエネルギー生産に広範な影響を及ぼすおそれがあり、この貴重な資源の管理方法を根本から変えていく必要がある。

宇宙から見た地球は深い青色をしていて、我々を満ち足りた気分にくれる。こんな画像を見ていると、生物の体に欠かすことのできない構成成分である水は、どこにでもあるように思われる。しかし、*Nature* 2008年3月20日号が特集しているように、地上の水資源の展望はあまり明るくない。ちなみに *Nature* では、ちょうど5年前の3月20日号の EDITORIAL (*Nature* 2003年3月20日号243ページ参照) でも水の危機について取り上げたが、当時の記事に少し手を加えれば2008年の特集に掲載できそうなほど、状況は改善されていない。世界の公衆衛生は、相変わらず水の危機によって脅かされているのだ。今日もなお、発展途上国に暮らす10億人以上の人々が、安全な飲料水を手に入れることができていない。また、20億人以上の人々が、衛生設備の整っていない環境で暮らしている (*Nature* 2008年3月20日号283ページ参照)。近い将来、水不足は公衆衛生以外の側面、特に農業 (本冊子13ページ参照) とエネルギー (*Nature* 2008年3月20日号285ページ参照) の分野にも広がりそうである。

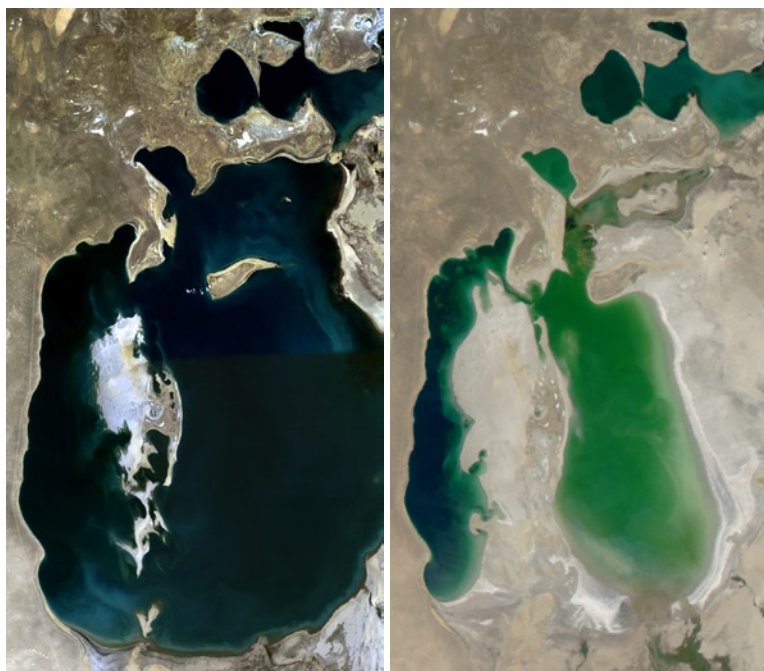
世界的な水の危機には、気候変動も一因を担うことになるだろう。気温の上昇により、土壌が乾燥し、降水が不確実になるのである (本冊子8ページ参照)。しかし、水不足の最大の要因は、人口の増加と急激な経済発展である。例えば、インドや中国などの新興国が豊かになるにつれ、食生活が欧米化し、タンパク質の摂取量が増えてくる。畜産業者が1キログラムの牛肉を生産するのに必要とする水の量は約1万5500リットルであり、これは、1キログラムの小麦を生産するのに必要な水の量の10倍に相当する。こうした国々では、エネルギー消費量も先進国並みに増加するだろう。ま

た、米国では現在、発電所の冷却用水として1日に5000億リットル以上の淡水を使用している。これは、米国の淡水取水量の40%以上に相当し、かんがいのために使用される水の量とほぼ同じである。

その結果、水の供給を求める声は切迫したものになってきている。2030年には、世界のエネルギー需要は今日より57%も多くなると予測されており、食料生産のために必要とされる水の量も、今日の2倍以上になると考えられる。増え続ける世界人口に食料を行き渡らせるために必要な水の量は、2050年までに年間約1万2000立方キロメートルに達する可能性がある。これは、世界最大の淡水湖である北米のスペリオール湖の水量と同じである。しかし、世界の河川と湖の多くは、既に「乱用」といってよいほど利用されている。中国の黄河は、時期によっては河口まで水が届かないことがあり (断流)、米国南西部のミード湖は、水の使用量を減らせなかった場合、2021年までに干上がってしまうおそれがある。こうした厳しい現実と直面する一部の国々は、送水設備の方向を変えるという、大胆な (あるいは無謀ともいえる) 計画を検討している (本冊子19ページ参照)。

「ブルーウォーター」から「グリーンウォーター」へ

とはいえ、まだ希望は残されている。水の危機を大幅に緩和できる新しいアイデアや新鮮なアプローチは、いくつも提案されているのである。あとは、我々が力を合わせてそれらを実現する方法を考えればよい。例えば、過去数十年間の水研究や水政策のほとんどは、河川、湖、貯水池、地下の帯水層にある、いわゆる「ブルーウォーター」ばかりに集中していた。けれどもこうした「ブルーウォーター」は、世界の淡水



干上がるアラル海

カザフスタンとウズベキスタンの国境に位置するアラル海は、かつては世界第4位の大きさの湖だった。しかし、周辺地域のかんがいや運河の建設により、湖に流れ込む河川の流量が激減した。1960年代から急激に縮小し続け、現在では、北の小アラル海と南の大アラル海に分断され、さらに大アラル海が東西に分断されている（左の写真は1989年夏、右の写真は2003年8月に撮影された衛星写真。塩湖であるため、干上がった場所は塩で白くなっている）。縮小を続ける湖では、塩濃度の上昇のため生態系が破壊され、漁業は壊滅した。また、干上がった湖から吹く塩を含んだ風は、かんがい農地の塩害をより深刻なものにしている。

バランスの40%を占めているにすぎず、乾燥地域ではもっと少ない。食料の確保が困難な地域では、「グリーンウォーター」を管理することが水の危機に対処するためのカギとなる。「グリーンウォーター」とは、地表に降った雨や雪などが土壌中に浸透して植物の根によって吸い上げられる水であり、「ブルーウォーター」のように目立つことはないが、はるかに豊富に存在している。専門家は、作物の95%以上が雨水で育てられているサハラ以南のアフリカのような地域では、利用可能な雨量のうち10～30%しか生産的な用途に使われていないと計算している。この問題に対して、彼らは極めて「ローテク」な解決策を提案している。すなわち、雨水を蓄え、植物の根を深く張らせ、段々畑を作り、「耕す」農業から「栽培する」農業へと転換するのである。これだけでも、潜在的には大幅な増産が見込まれる。一方、南アジアのようにかんがいが進んだ地域では、同様な単純な方法で水の利用法を改善することにより、貴重な「ブルーウォーター」の不足に悩まされることなく、十分な量の飲料水を供給できるようになる。

このようにローテク農法による解決策を重要視することは、育種プログラムと遺伝子操作により、強健で干ばつに強い作物を作り出す努力を軽視することではない。世界では今後、あらゆる解決策が必要になるからである。とはいえ、ローテク農法は、比較的少ないコストで大きな利益が得られるという利点がある。問題は、誰がそのコストを負担し、思いつきを実行に移すという、困難で、魅力のない仕事を引き受けるかである。例えば、誰が、貧しい農家の人たちに天然資源の活用法を教えるのだろうか。また、誰が、降水が不確実な地域で新しい農法に取り組むという「賭け」に出るための資金援助をしてくれるのだろうか。

管理の問題

エネルギー分野では、節水と水の再利用により大量の水を確保することができる。例えば、発電所は、淡水の使用から、塩分を含む地下水や処理排水の使用に転換することができる。新しい技術は、こうした場面でも役に立つはずだ（本冊子4ページとNature 2008年3月20日号301ページ参照）。

しかし、ここでもまた、誰がコストを負担するのかという根本的な問題がある。この点で最も努力しているのは、イスラエルとオランダである。水の供給量が極めて少ないイスラエルでは、国中の水をほぼ完全に再利用するシステムができています。また、海と空から「過剰な水」に攻め立てられているオランダは、水資源のあらゆる側面を管理するための国家戦略をもっている。しかし、こうした国々はいくまでも例外である。より典型的なのは、米国のような混沌とした状況である。米国では、洪水の制御から沿岸の警備まで、水にかかわる事項を扱う連邦機関が20以上もある。しかし、地域レベルや国家レベルで水政策が調整されることはめったになく、一貫性のある解決策などほとんど期待できない状況にある。

それでも最近、米国のこうした状況が変わり始めている。その一例が、コロラド川流域での水の利用を調整する取り組みである。しかし、新しい変化はすべての場所で起こらなければならない。都市生活者と農業従事者、河川下流の利用者と上流の利用者、地域と地域の間での水資源をめぐる争奪戦を回避したいのであれば、あらゆる国の政策立案者は水戦略について考えていく必要がある。

Purification with a pinch of salt

「塩」を取り除く

Nature Vol. 452 (260-261) / 20 March 2008

気候変動と人口増加、そして政治的関心から、世界各国の政府や投資家たちが、淡水化事業へ視線を向けている。Quirin Schiermeier がこの話題に切り込む。

人間が暮らす場所として最も乾燥した大陸であるオーストラリアでは、水問題は常に一触即発の状況にある。それを考慮すると、最近起こったある政治デモは、まったく驚きの出来事である。なぜならデモ参加者たちは、ヴィクトリア州メルボルン郊外に建設が計画されている淡水化プラントは水を過剰生産する、と抗議していたのだ。

30 億米ドルで建設されるこの国有プラントは、2011 年の完成時には 1 日 30 万立方メートル以上もの飲料水を生産し、世界最大規模となるだろう。しかし環境保護団体は、淡水化プラントは不要であると主張している。環境保護団体「Your

Water Your Say」のスポークスマン Neil Rankine によると、25% の水消費量の増加を見込んでも、2016 年における水の供給量は消費量を 60% も上回るといふ。ただし Rankine の数字は、水の再利用や天水農業といったほかの水需要改善策への努力が行われることを想定したものである。

もちろん、水が余ることが問題だと考える人はいない。問題は環境への負担にある。「淡水化は最もエネルギーが必要な給水策です」と、独立系環境シンクタンク、パシフィック・インスティテュート（米国、カリフォルニア州オークランド）の代表 Peter Gleick はいう。ヴィクトリア州の淡水化プラントは 6 基の風力発電所に隣接して建設される予定であるが、小さくて非効率的な発電機が巨大な淡水化プラントを動かせるとは信じがたい。淡水化過程で発生する高濃度の塩水が、生態系に与える影響も懸念されている。

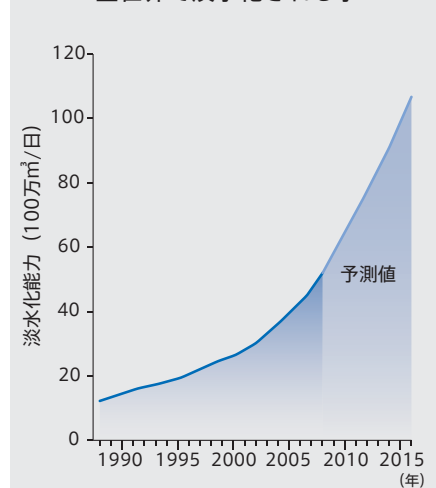
また、経済的な支出も法外な数値に上る。ほかの消費財を大量生産する場合と異なり、水の「生産」に関しては「規模の経済」が働くかはあいまいだ。つまり、巨大プラントであっても、小さな地域型の工場より明らかに安く淡水を生産することはできないのである。

そのうえで、各国はさらなる出資を考えているようだ。オーストラリアから英国、米国、中国にまで及ぶ国々で、淡水化プ

ロジェクトが進行中で、主要なものだけでも 75 施設に及ぶ淡水化プラントが世界中で建設中である。現在、既に稼働中の約 1 万 5000 のプラントにより、1 日 4000 万立方メートルを超える淡水が生産されている（左下グラフ参照）。「今後 10 ～ 20 年間に我々は、淡水の生産能力と実際の生産量の大幅な増加を目の当たりにするでしょう」と、独立系のコンサルタントで水事業に 30 年以上携わっている Bruce Durham は語る。カリフォルニア州だけでも、少なくとも 20 の大規模な淡水化プラントが新たに計画されており（右ページ図参照）、合算すると、最終的に州の都市部における水需要の約 6% を供給できるようになる。

生産コストは下がってきている。中東湾岸地域にある、最もエネルギーを必要とする熱蒸留式プラント（沸騰と再凝結によって海水を浄化する）ですら、1 立方メートル当たり 1 米ドル未満のコストで淡水を生産できる。かつては世界最大規模であったイスラエルのアシュケロンにある淡水化プラントは、1 日 30 万立方メートルの淡水を、1 立方メートル当たり 50 セントほどのコストで生産している。ここで作られる 1000 リットルの飲料水は、エビアン 1 リットルボトルの小売価格の半額以下である。しかしそれでも、帯水層などの淡水源から取水するより、淡水化技術は平均で 3.5 倍も高い。

全世界で淡水化される水



テクノロジーあふれる未来

化学工学の進歩によって、淡水化はより手ごろになるだろう。現在、淡水化事業で利用されているポリアミド膜は、逆浸透式プラントの基本材料である。逆浸透式プラントは世界の淡水生産の半分以上を担い、非効率的な熱蒸留式プラントに取って代わっている。逆浸透式では、溶存有機物とほかの不純物を除くため汽水や海水は事前に濾過され、次に、圧力をかけて水から塩分を分離する半透膜に通される。

濾過だけでは半透膜の汚れや摩耗を完全に防げないため、化学洗浄や膜の交換を頻繁に行う必要がある。これが淡水化コストの主要因である。どのプラントも、塩分堆積など、膜の透水性を阻害する現象、いわゆる「生物汚れ」に対処するため、それぞれ工夫をしている。

生物汚れを減らすために、地理的条件がよい沿岸の淡水化プラントでは、海面からではなく砂浜からの取水を始めた。砂が天然のフィルターとなり、海水を濾過するのである。砂浜での濾過により、魚類などの海生生物が取水口に吸込まれるという、沿岸の淡水化でよくある問題も解決できる。

こうした高分子膜の透過性と耐久性は開発初期より向上したが、逆浸透の基本技術と淡水化を行う半透膜の材料は、あまり変わっていない。最近、淡水化技術に2億5000万米ドルを充てることを決めたシンガポールでは、研究者たちが膜蒸留とよばれる代替技術の試験を行っている。膜蒸留は、膜浸透と蒸留過程を合わせたような技術である。さらに膜蒸留では、太陽光エネルギー、地熱エネルギー、排熱も活用できる。

別の有望な手法は、カーボンナノチューブの並列利用である。分子スケールの管は摩擦が小さく、高分子膜より1000倍速く水を流すことができる。しかしながら、ナノチューブによる淡水化はいまだに実現しておらず、生物汚れへの対処法も考案されていない。そのうえ専門家たちは、

水圧を利用するこの技術は20%しかエネルギー消費を減らせないと考えている。

ほとんど水圧を必要としない「順浸透」という淡水化技術も、既に試作段階にある。エール大学（米国、コネチカット州ニューヘヴン）の環境工学者 Menachem Elimelech は、水圧ではなく浸透圧を利用する淡水化試験プラントの建設チームを率いている（6ページ下図を参照）。「順浸透」では、アンモニアと二酸化炭素の高濃度溶液を膜の裏側に入れ、浸透圧を引き起こす。これにより、膜の表側にある塩水を透過させるのである。そして、膜を透過した溶液を58℃まで加熱すると、アンモニアと二酸化炭素が溶液から沸騰して取り除かれ、淡水が得られる。

「必要な熱の絶対量では、順浸透と逆浸透の効率はそれほど変わりませんが、順浸透のメリットとして、溶液から塩類を分離する際に排熱を利用することができます」と Elimelech は語る。

順浸透は必要エネルギー量が少ないだけでなく、塩水の排出量を激減させる。現在、淡水化による残留塩水の濃度は、海洋生物に無害なレベルまで薄められなければならない。

「しかしながら、順浸透はごく薄く、多孔性で、塩基性溶液に強い耐性がある膜を必要とします。そのような装置はまだ商品化には至っていません」と Elimelech はいう。

エネルギーは、今後も大きな障壁であり続けるだろう。20年前には、1立方メー

カリフォルニア州で計画中の淡水化プラント



スペイン沿岸部の淡水化プラントでは、砂を天然のフィルターとして海水の濾過を行っている。

著作権等の理由により画像を掲載することができません。

トルの水を淡水化するのに5～10キロワット時の電力が必要だった。現在、アシュケロンにあるような近代的な逆浸透式プラントでは、同量の淡水を生産するには約2キロワット時で十分だ。また、カリフォルニア州の試験プラントがもつ世界記録は1.58キロワット時である。熱力学の法則によると、淡水化エネルギー効率の理論的限界は約0.7キロワット時であるとされる。そして、実用的な浸透速度を得るの

に必要なエネルギーを考慮すると、アシュケロンのプラントのエネルギー効率は、ほぼ技術的な限界に近づいているといえる。

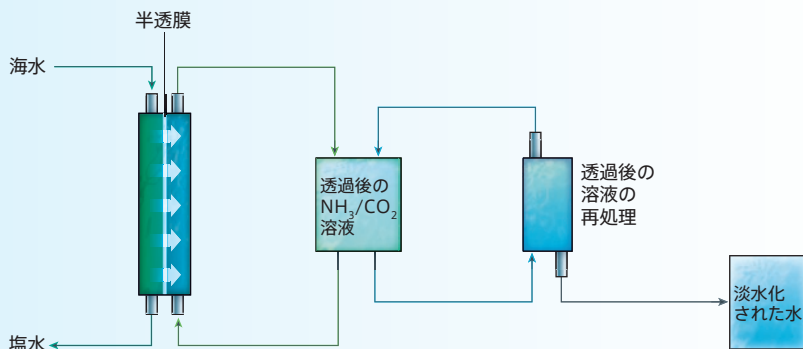
「膜材料の改良やエネルギー再利用装置の最適化を行うことはできます」と国連教育科学文化機関の水教育研究所（オランダ、デルフト）の淡水化技術専門家、Gary Amy はいう。「しかし、どの方法を試しても、淡水化エネルギー効率はすぐに上限に達してしまうでしょう」。

こうした制約にもかかわらず、きちんと設計すれば、淡水化プラントは、巨大ダムやパイプライン、水路よりも、効率的かつ環境に配慮したものとなりうる。一方、「淡水化は水不足を緩和しうる技術の1つであり、水問題の解決策ではありません」と、米国立科学財団が支援する水浄化のための科学技術センターを監督する、イリノイ大学アーバナ・シャンペーン校（米国）の機械技師、Mark Shannon は語る。

Rankineと彼の支持者たちは新たな抗議活動を計画しており、メルボルンは西部のパスよりも激しい抗議の場となりそうだ。パスでは、何とか住民の承認を得て、3億2900万米ドルを投じた淡水化プラントが、2006年に稼働を開始した。さらに現在、予算8億1100万米ドルの2つ目の淡水化プラントが計画されている。新しい計画の秘密兵器は、再生可能エネルギーの利用である。主な動力に風力発電を用い、そのうち最大90%をエネルギー回収装置で再利用するというのである。



順浸透による淡水化



WATER UNDER PRESSURE

苦境に立つ「水」

Nature Vol. 452 (269) / 20 March 2008

現在世界では、10 億人以上の人が安全な飲用水を入手することができず、20 億人が不十分な衛生設備のもとで暮らしている。2 回にわたる水に関する「国際 10 年」、ミレニアム開発目標、2 つの「国際年」、またいくつかの国際記念日で、飲料水と衛生設備の確保を目標としたにもかかわらず、状況は改善されていない。どうしてこんなにも進展が遅いのか？

1 つの原因は、現在の世界的な目標、つまり「ミレニアム開発目標」にある。ミレニアム開発目標には、世界の人々の水の入手と衛生環境を保障することについての各国のインセンティブが不足しているのだ（*Nature* 2008 年 3 月 20 日号 283 ページ参照）。もう 1 つの原因は、水資源に対する負荷が上昇し続けていることだ。ここでいう負荷には、人口増加、経済発展、気候変動などが挙げられる（本冊子 8 ページ参照）。

既に水不足による影響は、健康や衛生問題の範囲にとどまらず、農業やエネルギーといった経済活動の核心にまで及んでいる。認識が十分ではないにせよ、取り組むべき課題は明白である。農業には、今後数十年で、2 倍以上の水が必要になるだろう（本冊子 13 ページ参照）。また、世界のエネルギー需要は、2030 年までに 57% 増加する見込みである（*Nature* 2008 年 3 月 20 日号 285 ページ参照）。



ISTOCKPHOTO

もし我々が、世界規模で水の入手手段の改善を望むなら、水に関する戦略を再考し、食料とエネルギー生産の世界的動向に対応しなければならない。

水と農業については、新たな発想が生まれつつある。貧しい人々の多くが暮らす天水農業地域における生産性を向上させるため、専門家や政策決定者たちはシンプルな解決策を打ち出しているのだ。この解決策は、かんがい農地を拡大することよりも得策である。というのも、かんがいは、世界で最も水を消費している事業だからである。

エネルギー需要の増加に対応するには、より統合的な淡水管理手法が必要とされる。都市と農村、上流と下流の利用者の衝突を回避しなければならないからだ。この統合的な政策決定の方法はこれまで軽視されてきたが、流域、地域、さらには国家間スケールでの水管理において不可欠なものとなるだろう（本冊子 2 ページ参照）。

Nature 2008 年 3 月 20 日号ではこのほかに、REVIEW や ESSAY、BOOKS & ARTS で、さまざまな角度から水問題について取り上げている。さらに詳細を知りたい方は、同号をご参照いただきたい。 ■

A LONG DRY SUMMER

長く乾燥した夏

Nature Vol.452 (270-273) / 20 March 2008

現在、安定した食料供給が期待できなくなっている地域では、今後、不安定な気候が、土壌、植物、人々に対してさらなるストレスをかけることが予想されている。Quirin Schiermeier が、乾燥していく世界の水戦略について報告する。

2003年にヨーロッパを襲った記録破りの熱波には、前兆があった。その年の春は異常に乾燥しており、ヨーロッパ大陸全体の土壌がカラカラに乾いていたのである。土壌水分量の不足は、土壌からの水分蒸発と、それに伴う冷却効果を激減させて、夏の猛暑を引き起こした。

気候学者は、今世紀の後半には地球規模で温度が上昇するため、夏の猛暑と干ばつは例外ではなく常態になると考えている。また、ヨーロッパで年初から土壌水分量が急激に低下することは、その年の夏に熱波に襲われる前兆であるとされている¹。そこには、暑さが土壌を乾燥させ、乾燥した土壌が暑さをエスカレートさせるという悪循環が生じているようである。

土壌水分量の変化は、ほかにも影響を及ぼしている可能性があり、土壌浸食、表土流出、土壌の栄養分、雲の形成など

への影響が考えられている。しかし、気温の上昇が土壌の乾燥に及ぼす影響については、いまだに非常に不確かである。気候モデル作成者たちは、アフリカと南米に関しては、シミュレーションした変化の徴候に確信をもつことができていない。

「我々は、気候が変動しやすくなり、一部の地域で乾燥が進むおそれがあると教えられています。けれども、その詳細についてはほとんど知らされていないのです」と、水文学者であり、水管理の専門家である、ストックホルム国際水研究所(スウェーデン)のMalin Falkenmarkという。それにもかかわらず、Falkenmarkはほかの水文学者とともに、気候の変化に応じて水管理の方法を変えていくことを勧告し、ようすをみる時期は終わったとよびかけている²。

「今後、気候の変化がどのように進んでいくのか、はっきりしたことはわかりま

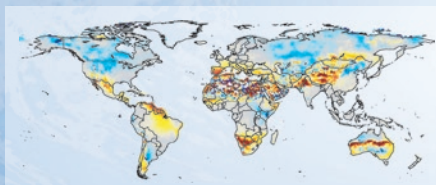
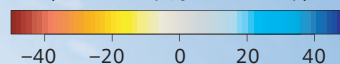
せん。けれども、変化が起こりつつあり、何らかの準備が必要であることについては、もはや疑問の余地はないのです」とFalkenmarkはいう。「例えば、一部の乾燥地域では、河川の流量が最大で40%も減少する可能性があります。それなら、水資源計画の手法を変えていかなければなりません。実際にそうなるまで待っているわけにはいかないのです」。

現在の気候モデルからは、雨量は増加するが、降雨回数は減少すると予測されている。これは、土壌水分量が極端に少なくなる期間が長引くことを意味している。北米、ヨーロッパ、アフリカ南部、オーストラリアなど、複数の地域での観察結果は、1回ごとの降雨はより激しくなり、その間の乾燥した期間はより長くなるという傾向を裏づけており、この傾向は夏に強まることがわかっている³。

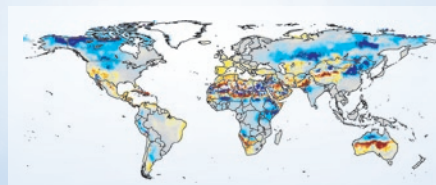
気候モデルが予測する土壌水分量

3つの地図は、温室効果ガスの排出量の予測によって、1960～90年と比較した2068～98年の土壌水分量がどのように変わってくるかを示している。それぞれの地図は異なる気候モデルに基づいており、ポツダム気候影響研究所(ドイツ)の研究者により、世界の植生と水のモデルに関する同一のモデルを用いて作成された。

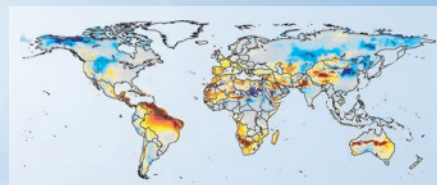
年間平均土壌水分量の変化割合
(2068～98年対1960～90年)



マックス・プランク気象研究所(ドイツ)



米国立大気研究所



英国気象局



土壌水分量を把握する

土壌水分量の観測からは、はっきりした傾向はみえにくい。土壌は、山岳の氷河や極地の氷床などに比べて、地球温暖化に対して柔軟に応答しているようである。土壌水分量についてすぐれた観測データがある地域はほとんどないが、研究者たちが45年にわたって土壌水分量を測定してきたウクライナなどでも、土壌水分量の大幅な減少傾向を示唆する証拠は見つからなかった。

米国立大気研究所（コロラド州ボルダー）の気候研究者であり、「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」の代表執筆者である Jerry Meehl は、「土壌水分量は、容易に測定できる量ではないのです」と話す。「大陸中央部で夏季の土壌乾燥が強まることを IPCC が最初に予測したのは、20 年近く前のことでした」。けれど

もその後、IPCC の予測を支持する観測も否定する観測も行われていないため、この分野の科学はほとんど進展していない。

どの気候モデルも、2050 年以降は南極大陸を除くすべての大陸で夏季の土壌乾燥が強まると予測している。しかし、どの地域で、どの程度の変化が起こるかについては、モデルによって予想が大きく食い違っている（左ページ図を参照）。また、Falkenmark らの水管理の専門家が関心をもっているのは河川流域またはそれより小さなスケールでの土壌水分量であるが、どのモデルも、このスケールで予測ができてだけの水準には達していない。

あいまいさが生じる主たる理由は、降雨モデルの構築が、気温モデルの構築に比べてはるかにむずかしいからである。降雨を制御する過程（雲や水滴の形成など）のスケールは、既存の気候モデルが用い

るスケールに比べて非常に小さい。土壌もまた、場所による違いが大きすぎて、現在のモデルでは適切に再現することができない。さらに、降雨、蒸発、二酸化炭素の濃度、植物の成長と土壌水分量の間の複雑な相互作用をコンピューターで処理するのは容易ではない。

土壌水分量と降雨は相互に影響を及ぼし合うため、モデルを改良するためにはよりよい土壌データが必要不可欠である。しかし、世界の土壌は、気温や降雨ほどは調査されていない。現地での観測はほとんど行われておらず、観測が行われている地域もまばらである。複雑な相互作用を解きほぐすためには、研究者は、土壌水分量を直接かつ連続的に測定する方法を考案しなければならない。

そこで期待されているのが、人工衛星を利用した観測である。欧州宇宙機関

(ESA) も米国国立航空宇宙局 (NASA) も、ESA の ERS-1 衛星と ERS-2 衛星の任務を拡大して、土壌水分量を観測するミッションを計画している。計画されているミッションで搭載されるマイクロ波センサーは、地球のほぼ全域をカバーし、土壌水分量をリアルタイムで測定することになる。植生の密度が高く、土壌が隠れている地点では、緑の多さを土壌水分量の代用とすることができる。

その一方で、コンピューターの処理能力の向上は、研究者がモデルを改良することを可能にしている。エクセター大学 (英国) の気候モデル作成者である Peter Cox は、現在のモデルにまだ改良の余地があることを認めている。例えば、現在のモデルには、個々の熱帯低気圧のモデルを構築できるほどのきめの細かさはない。しかし Cox は、一部の領域モデルは、かなり細かくなってきていると指摘する。

「ポイントは、さまざまな情報源を用い、これらを組み合わせて、大域的なデータセットを構築することにあります」と Cox はいう。「気候モデルと人工衛星による観測のスケールと解像度が一致してくれば、気候モデルに衛星観測データを取り入れて、より強力にすることができるのです」。

一般の人々は通常、水不足と聞けば飲み水がなくなることを考える。けれども、世界的な水不足がもたらす主要な問題は、渇きではなく飢えなのである。一般に、土

壌水分量が低下することは、干ばつの危険が増すことを意味している。ゆえに、水不足の危険にさらされているすべての地域の作物を管理するためには、予想される土壌水分量の変化をモニターし、理解することが必要不可欠なのである。

研究者は、気候変動により最も厳しい影響を受けるのは、湿潤気候から乾燥気候への遷移帯であると予想している。極めて湿潤な地域では、土壌水分量が常に多く、蒸発と降雨は土壌水分量にほとんど影響されないし、極めて乾燥した領域では、蒸発量が少なすぎて、いずれにせよ、たいした降雨はないからである。

世界気候研究計画が進めている全球陸域 - 大気結合実験のマルチモデル研究は、現時点で最もすぐれた予測の 1 つであるが、これによると、土壌水分量と降雨を連結するホットスポットは、北米、サハラ砂漠以南のアフリカ、およびインド北部の平原にあるという⁴。これらの地域、特にサヘルからアフリカの角にかけての「ハンガー・ベルト (飢餓地帯)」は、気候変動の影響を最も受けやすく、干ばつや洪水の頻度の増加や土壌浸食の加速などが懸念されている。

土壌は、植物の根の周りに雨水を蓄える。河川や湖や地下水として蓄えられる水が「ブルーウォーター」とよばれるのに対して、こうした水は「グリーンウォーター」とよばれている。通常、乾燥した地域では、「ブルーウォーター」は非常に少なく、しばしば水収支の全体の 10% 未満しか占めていない。かんがい普及していない熱帯およびサバンナ地方のすべての天水農業は、ほとんど降らない雨を蓄えるのに土壌の能力に依存している。

1990 年代初頭に「グリーンウォーター」という用語を作った Falkenmark は、「『グリーンウォーター』は、干ばつが起りやすい地域の水と食料の安全を守るためのカギとなります」と指摘する。けれども専門家たちは、世界のサバンナ地帯 (すべての大陸に存在する、中程度に

湿潤な地域から乾燥した地域) に降る雨のうち、生産的に利用されているのは 10 ~ 30% にすぎないと考えている。

食料の供給が不安定な地域の水不足に気候の変化が及ぼす影響は、しだいに明白になってきている。最近、Falkenmark をはじめとする各国の専門家たちは、「人間が気候や水にこれだけ干渉している以上、給水管理については (人間の影響を考えずに) 自然の変化のみを考えていけばよいという考え方は、もはや通用しない」と宣言した²。発展途上国が現在必要としているのは、第 2 の『緑の革命』である。その目的は、「グリーンウォーター」の管理法を改良し、土壌を保全し、長期にわたる乾燥から作物を守って、作物の収穫量を増やすことにある。

もちろん、「グリーンウォーター」と「ブルーウォーター」は別々の資源ではない。かんがいは、「ブルーウォーター」を「グリーンウォーター」に変える技術である (右ページ図を参照)。しかし、乾燥した地域では、ダムなどの技術により水の有効利用を進めていくのは困難である。「ですから、大部分の水技術者が、もっぱら『ブルーウォーター』のことばかり考えているのは、非常に困ったことなのです」と、Falkenmark は語る。

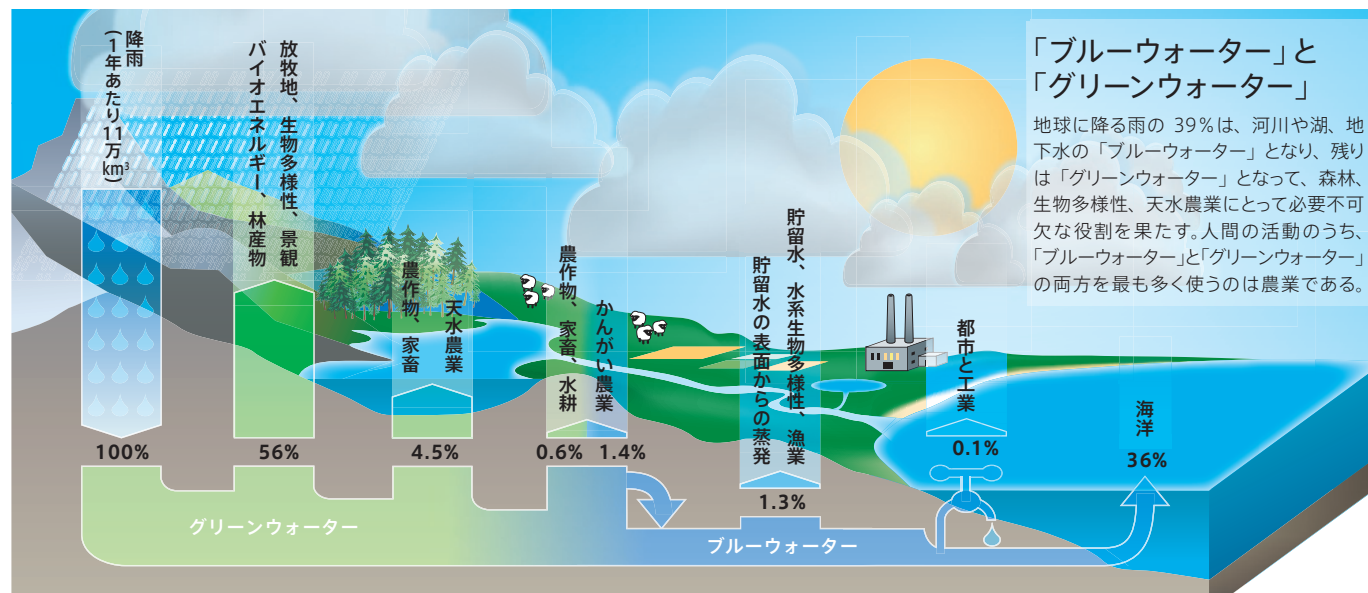
アフリカの乾燥地域で「グリーンウォーター」を蓄えるためには、農民は、より土壌にやさしい方法で畦を作るなどして、乾燥した期間の後に降った雨が土壌に浸透できるようにする必要がある。ラテンアメリカでは、既にこの方法により収穫量を増やしている。専門家は農民に、流出水 (雨水のうち、地中に蓄えられたり蒸発したりせずに流れ去る成分) を蓄えておき、作物の生育期の乾燥した時期に使用するよう勧めている (12 ページコラム「シンプルに行こう」参照)。

「グリーンウォーター」へ

気候の変化がなくても、サバンナ地帯の雨は不規則である。例えば、サハラ以南



タンザニアのこのかんがいシステムは、乾燥している時期の給水を補うために、雨水を蓄えるようになっている。



のアフリカでは、「雨の多い」年にも乾燥した時期があるのが普通である。「アフリカの『雨季』とは、雨が降ることが可能な季節という意味であり、雨が降る季節という意味ではないのです」と、Falkenmark はいう。

土壌水分量と「グリーンウォーター」にとって、局地的な降雨の頻度と強度は、少なくとも総雨量と同じくらい重要である。大雨は、カラカラに乾いて硬くなった土壌には浸透することができない。研究者たちは、水および土地利用を効率よく管理することができなければ、影響を受けやすい地域では降雨の変動が大きくなり、流出水、浸食、植物が受ける水ストレス、洪水などが増加するおそれがあると警告している。

どの気候モデルも、地球温暖化の結果、蒸発から降雨を経て流出に至る水循環の全過程が増幅されると予測している⁵。全世界の陸地、特に、北半球の一部や熱帯領域への降雨量はわずかに増加し、豪雨として降る雨の割合が高くなる。

マックス・プランク生物地球化学研究所（ドイツ、イエナ）に所属する炭素循環の専門家である Markus Reichstein は、より極端な降雨が生態系に及ぼす影響に

ついて検証した。彼は、流出水から土壌蒸発や栄養分の利用可能性まで、生態系のすべてのレベルと過程が影響を受ける可能性がある」と指摘する。15名の研究者からなる学際的研究チームは、その未発表の総説において、変化はすべての気候帯に影響を及ぼすが、一部の生態系はほかの生態系とはまったく異なる応答をするかもしれないと結論づけている。

温暖化する世界で植物が生き抜いていくためには、水分と栄養分の利用可能性の変化に適応する能力が不可欠になるかもしれない。生態学者は、変化がある閾値を超えると、植物がストレスを受けるようになると考えている。しかし、この閾値は生態系ごとに異なっているため、気候の変化に対する植物の反応にもばらつきがある可能性がある。

一般に、土壌に含まれる水分の利用可能性は、植物の成長と光合成に制約を課す。しかし、土壌中の栄養分の利用可能性は、乾燥した時期に増加する。乾燥は、栄養分の無機化よりも、植物による栄養分の取り込みを厳しく抑制するからである。

それでも、すべての乾燥気味の地域において、より極端な降雨は、作物や植生のストレスを増大させると研究者は考えて

いる⁶。残念ながら、こうした地域は、食料生産が不安定な人口稠密地域でもある。サハラ砂漠以南のアフリカでは、乾燥した時期が長くなれば植生に悪影響が出て、かんがいにより水を補給しなければ作物の収穫量も減少するだろう。

品種改良の問題

気候の変化に適応するにはどうすればよいのだろうか。2003年にヨーロッパを襲った熱波が一部の国々の収穫量を50%以上も低下させたことは、豊かな国々も地球温暖化の影響を免れることはできず、変化に適応していく必要があることを示している。しかし、気候の変化が、貧しい国々の食料の安定供給に対してはるかに大きな脅威となることは明らかである。

専門家は、発展途上国では貧困のために天水農業が不可能になる傾向があると警告する。貧しい農民が作物のために投資することができないならば、外国からの投資援助や低利の融資が必要である。

最近、食料供給が不安定な12の地域について気候が収穫量に及ぼすリスクが分析された結果、南アジアとアフリカ南部におけるアブラナ、トウモロコシ、小麦などの作物が最も影響を受けやすいこ

とが明らかになった。論文の著者らは、農業への投資と適応のための努力をこれらの作物と地域に集中させることを提案している⁷。

この論文の著者の1人であり、スタンフォード大学（米国、カリフォルニア州）の農業生態学者であるDavid Lobellは、「我々は、大きな問題に直面しています」といい、植物の品種改良を進めるための研究資金が不十分であると警告する。

彼は、「高温と干ばつに強い新しい品種を緊急に開発しなければなりません。また、トウモロコシだけでなく、ほかの作物も必要です」と話す。「我々は、懸命かつ迅速に取り組む必要があります。農家の人たちが新しい品種を採用するまでには15年もの開発努力が必要になる場合もあることを忘れてはなりません」。

しかし、国際水管理研究所（スリランカ、コロンボ）の研究ディレクターであり、IPCCと同類の、農業のための国際的取り組みである「開発のための農業科学技術の国際的評価（IAASTD）」の代表執筆者であるDeborah Bossioは、まずは水と土地の管理に対する投資がなければ、作物を適応させる努力の一部はむだになってしまうと指摘する。

南アジアとサハラ砂漠以南のアフリカでは、水への投資が特に重要であるとBossioはいう。その際には、貯水と配水の方法について、極めて小規模のもの（土壌に蓄えられる水分やため池）から、共同体で貯水池を作る計画まで、あらゆる可能性を考慮する必要があると彼女はいう。

けれどもBossioは、農作物ばかりを重視していると、農作物と家畜のどちらに

優先的に水をまわすべきかをめぐって争いになり、気候の変化の影響をさらに受けやすくなるおそれがあると警告する。「水不足に脅かされる地域の生計にとって、家畜は常に非常に重要な構成要素なのです」と彼女はいう。水不足への適応に関しては、人命に影響を及ぼすすべての構成要素を考慮していかなければならない。 ■

Quirin Schiermeierは、ミュンヘンに拠点を置くNatureの記者である。

1. Fischer, E. M., Seneviratne, S. I., Lüthi, D. & Schär, C. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L06707 (2007).
2. Milly, P. C. D. et al. *Science* **319**, 573-574 (2008).
3. New, M., Todd, M., Hulme, M. & Jones, P. *Int. J. Climatol.* **21**, 1889-1922 (2001).
4. Koster, R. D. et al. *Science* **305**, 1138-1140 (2004).
5. Intergovernmental Panel on Climate Change in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* 760-789 (Cambridge Univ. Press, New York, 2007).
6. Porporato, A., Vico, G. & Fay, P. A. *Geophys. Res. Lett.* **33**, L15402 (2006).
7. Lobell, D. B. et al. *Science* **319**, 607-610 (2008).

シンプルに行こう

ケニアは2000年にも干ばつに襲われた。農業が行われる雨季に、ほとんど雨が降らなかったのである。大統領は非常事態宣言を出し、飢餓に苦しむ国民を救うために国際食料支援を求めた。

ケニア中の農家が不作に苦しめられたこの年に、ナイロビの南東に位置するマチャコスという地区の数件のトウモロコシ農家は、1ヘクタール当たり3トンという豊かな収穫をあげていた。

マチャコスの農民たちは、たまたま幸運に恵まれたのではない。彼らは、川の上流に小さなダムをいくつか建設して、雨季の初めに豪雨が降ったときの水を蓄えておいたのである。それは、小さな水泳用プールを2つ満たせる程度の量にすぎなかったが、雨の降らない時期を切り

抜けるには十分な量だった。

ストックホルム大学（スウェーデン）の水管理の専門家であるJohan Rockströmは、ケニア政府が「深刻な気象干ばつ」とよんだこの年の干ばつは、実際には「農業干ばつ」にすぎなかったという。すなわち、降水量そのものは十分にあったのだが、その大半が雨季の最初の豪雨として一度に降ってしまったため、農業に支障をきたしてしまったのである。

Rockströmと研究チームは、ケニア、エチオピア、ウガンダおよびタンザニアの農家が、土壌と不安定な降雨をよりよく利用できるように支援している。乾季にかんがいを行うために雨水をためておくことも、彼らの計画の1つである。彼らはまた、農家に深耕をやめて

浅耕にするように勧めている。

この20年間に、浅耕はラテンアメリカの農業を一変させた。重い鋤^{すき}を使って土壌を掘り起こす代わりに浅く耕すようにすると、雨水が土壌中に浸透するのを妨げ、土壌浸食を悪化させる固い溝ができずにすむ。また、土壌が掘り起こされなければ、水分を保持する有機物質が空気にさらされ、酸化によって失われる量を少なくすることもできる。おまけに、より多くの炭素が土壌中にとどまるようになるため、浅耕は地球の気候にとっても好都合である。

アフリカではもともと浅耕が行われていたが、植民地時代に深耕が導入された。農家の多くは、深耕をやめて浅耕に戻るのを躊躇^{ちゅうちゅう}している。深耕には雑草の生育を抑える効果がある

からである。貧しい農家の人々は、新しい技術と高価な肥料に投資して、不作によりもとをとれなくなることも心配している。

専門家たちは、天水農業でより多くの食料を生産するカギとなるのは、土壌に浸透する雨水の量をできるだけ増やすと同時に、かんがいのために雨水を蓄えておくことであると考えている。Rockströmは、浅耕を普及させるだけで、サバンナ地帯で利用できる水の量は大幅に増えるはずだと指摘する。

Rockströmは、単純な方法で農地に蓄えられる水の量を増やすことで、主要な作物の収穫量を4倍に増やすことができたという。「気候の変化により仕事が増えることはないでしょう。けれども、望みがないわけではないのです」。 Q.S.

MORE CROP PER DROP

一滴の水でより多くの作物を

Nature Vol.452 (273-277) / 20 March 2008

発展途上国では、不安定な降雨量のために、農家の生産量がしばしば制約されている。収穫量を増やすには、植物育種家、アグロノミスト（作物栽培の専門家）、遺伝学研究者の協力が必要となるが、これらの専門家は互いの意見の違いを埋められるのだろうか。Emma Marris が報告する。

IAASTD（開発のための農業科学技術の国際的評価）の目的は、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）が気候に対して果たしている役割を農業に対して果たすことであり、農業に関する科学技術についての最終的な意見を表明することであった。報告書の作成には、数百人の研究者が関与し、5年の歳月を要した。この活動には、国連、地球環境ファシリティー、世界銀行、世界保健機関が協賛し、世界中から大企業、小規模農家、科学者など非常に多くの利害関係者が協力した。ところが、2008年の1月になって、モンサント社、デュポン社、シンジェンタ社など作物科学（crop-science）関連の巨大企業を代表する業界団体「クロップライフ・インターナショナル」が、この活動から手を引いた。

意見が対立したのは、報告書の中で、発展途上国におけるバイオテクノロジーの役割、もっと正確に言えば、バイオテクノロジーの役割が意図的に無視されてきた程度をどのように記述するかという問題だった。作物科学関連企業側は、複合遺伝形質が将来的に発展途上国での農業の重要な一部になると考えているが、報告書の草案では、この点で、遺伝子組み換え作物から得られる利益は限定的だとする考え方が示された。

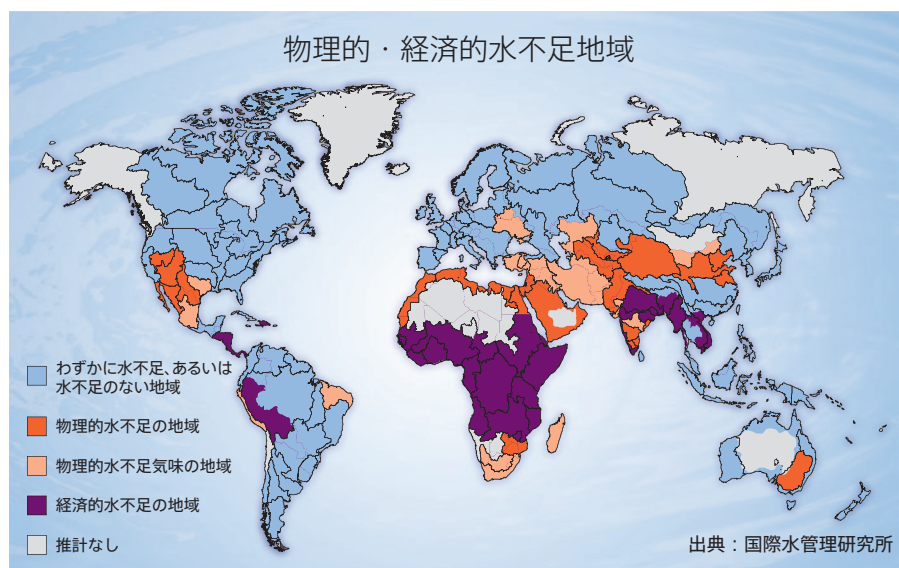
水（雨水もしくはかんがい用水）は、作物の生産高を決める大きな要因となることが多い。そのため、気候変動によって降水量、気温、干ばつの発生がますます

不規則になると推測される世界に居住する人々に、食料を持続的に供給するという今世紀最大の課題の1つを解決するうえで、一滴の水から得られる作物収穫量を増やすことが中心的な要素となるだろう（14ページコラム「仮想水（バーチャルウォーター）」参照）。既に、住民全員の水需要を満たすことのできない地域に12億人が住みついており¹（下図参照）、そうした地域の人口は、おそらく世界の人口増加より急速に増えていくだろう。この点が問題であることは、誰もが認めている。しかし、クロップライフの撤退が示したように、誰もが同じ解決方法に同意し

ているわけではない。

イタリアに本部のある UNFAO（国連食糧農業機関）水開発管理課長 Pasquale Steduto は「遺伝子組み換え技術の開発に対しては、資源が幅広く非常に大量につき込まれるようになりましたが、過大評価されていると思います。これまでのところ、乾燥耐性（干ばつ耐性）という点で、遺伝子組み換え技術あるいは分子生物学からの直接の恩恵はありません」と注意を促している。

特定の作物について単位水利用量当たりの最大収量を引き上げることは、何百万もの収穫量の少ない小規模農家の生産性を欧米の農家のレベルに引き上げる



ことほどの効果がない、と Steduto は考えている。例えば、小麦の場合、土地 1 ヘクタール、水 1 ミリメートル当たりの年間収穫量の上限は、約 22 キログラムと考えられている、と Steduto は話し、「この上限は、封筒のようなもので、その中には、ほぼゼロからこの上限付近に至る、さまざまなレベルの生産性が含まれています」という。いろいろな作物栽培技術を使えば、世界中で、この封筒をいっぱいにすることが可能なのである。

技術を受け入れる

同じような主張は、CGIAR（国際農業研究協議グループ）の研究センターの 1 つである IWMI（国際水管理研究所）が最近発表した報告書にもみられ、「今後数十年間における食料需要増加分のうちの 75% は、世界の生産の低い農家の生産レベルを、同程度の土地で高い生産性をもつ農家のレベルの最大 80% まで引き上げることで充足可能である」という記述がある。ここでいう同程度の土地とは、土壌と降水量のパターンが類似した土地のことをいう。例えば、この報告書の筆頭著者である David Morden は、「ウガンダに

おける穀物収量は 1 ヘクタール当たり約 1 ～ 2 トンですが、これと類似した環境で本当にすぐれた栽培管理が行われれば、6 ～ 8 トンは期待できます」と話している。

こうした格差は、それぞれの土地に適した作物や家畜の組み合わせを工夫することや、水管理のための小型ダムの建設、段々畑の構築といった基礎研究技術を普及させることでほぼ埋められる、と報告書には記されている。それぞれの農家にとって実質的なプラスとなることの多くは、可能な経済負担の範囲内で実現できるのだが、それが何かを農家が知っていなければならない。このほかにも、技術や情報に対する少額の投資によって収量を増やす方法がいくつもあり、これらはマイクロインベストメントや寄付によって必要な資金を賄うことができる。さらに、国や世界レベルでマネジメントを改善することは、市場の拡大や水供給の安定化に役立つだろう（18 ページコラム「枯れゆく流域」参照）。

多くの作物栽培や農村開発の専門家は、こうした取り組みにバイオテクノロジーが果たす役割は非常に小さいと感じている。バイオテクノロジー作物は、先進国での採用率が高く、バイオテクノロジー作物の

60% は先進国で栽培されている²。一方、バイオテクノロジーは、発展途上国にとって、せいぜい、よくもあり悪くもあるという程度のものだ、というのが一般的な見方である。こうした消極的な見方には、種子会社の真意に対する懐疑心も反映されているかもしれない。これに対して、遺伝子組み換えにかかわる人々は、なかなか成熟しない技術に対するいら立ちや不信感があるのではないかと考えている。

初期の遺伝子組み換え作物が単純で、容易に実現できたことに原因がある、と Gent 大学（ベルギー）の研究者 Marc van Montagu はいう。van Montagu は、植物に新しい遺伝子を導入するアグロバクテリウム法によって農業バイオテクノロジーを大きく変えた。しかし開発研究が進んでいくと、農業耐性よりもずっと複雑な性質は、解明がよりむずかしいことがわかってきた。それでも彼は、「乾燥耐性は、びっくりするほど複雑であるようにみえますが、解明は可能です」という。そして、それができるのはバイオテクノロジーだけだと主張し、「伝統的な育種は、最高レベルのものでも時間がかかり過ぎます」と話す。

非営利組織ドナルド・ダンフォース植物

仮想水（バーチャルウォーター）

「more crop per drop（一滴の水でより多くの作物を）」という目標に対する取り組みは、個々の植物、農場全体、河川流域全体あるいは地球全体といった、いくつかのレベルで行うことができる。しかし 1 つのレベルで効率が上がっても、別のレベルでの状況が改善されるとはかぎらない。乾燥気候の国では、水を大量に消費する農産物の生産をやめて海外から購入したほうが、コストがかからないかもしれない。

例えば、トウェント大学（オランダ）に所属する水管理の専門家 Arjen Hoekstra によれば、現在、市販の牛肉 1 キログラムを生産するために 1 万 5500 リットルの水が必要とされる。それだけの水を輸入するくらいなら、牛肉は輸入することにして、乾燥気候の国により適した産業にエネルギーを集中させたほうがよいという話になる。

これまでのところ、「仮想水」の考え方を採用し、政策に取り入れている国はごく少数に限

られている。なかでも、水を大量に消費する食物の輸入増加を意識的に推進しているヨルダンは突出している。こうした政策に違和感をもつ国も多く、そのような国では、食料の自給を重視していることが多い。しかし、予想どおりのことかもしれないが、中国など、水の枯渇に対する危機感を強めている一部の国々は、「仮想水」の輸入に「無意識に」依存してきている⁶。

「仮想水」の研究者は、「立

法キロメートル」単位の水という具合に大きなスケールで考えている。そうすると、植物レベルで遺伝的改良があった場合には、彼らの「仮想水」の計算式に反映されるのだろうか。「遺伝学的手法は、水の必要量を減らすための多くの手法の 1 つだと私は考えています。時には、遺伝学的手法が部分的解決となりうるケースもあると思います」と Hoekstra は話している。

E.M.



J. PIETRAGALLA/CIMMYT

メキシコの小麦研究者たちは、赤外線センサーを用いて作物の温度を測定し、乾燥ストレス下での根の深さを調べている。

科学センター（米国、ミズーリ州セントルイス）（その運営資金の一部を、通りの向かいの巨大企業モンサント社が出資している）のセンター長 Roger Beachy は、研究者が乾燥耐性の分野で、あまりに早いタイミングで数多くの約束をしてしまったことを認めている。「1980 年代には大げさで目を引くような予測がいくつかあったのですが、今、そのツケが回ってきているのです」と Beachy はいう。彼は、乾燥耐性に関連する遺伝子をめぐる当初の活気を、乳がん関連遺伝子として最初に同定された BRCA1 のケースに重ね合わせて説明する。当時の人々は、乳がんとの闘いの終わりが目前に迫ったと祝ったが、「そのうちに 2 つ目、3 つ目、4 つ目、5 つ目の遺伝子が次々と見つかり、状況がより複雑なことがわかったのです」。

CIMMYT（国際トウモロコシ小麦改良センター；メキシコ、メキシコ州テスコ）に所属する Marianne Bänziger のような伝統的な育種家も、こうした立ちを確かに感じていた。「現在、おそらく数百のグループが、遺伝子組み換えによる乾

燥耐性の付与に取り組んでいますが、野外実験までこぎつけて、収量増加を実証できたのは、ごくわずかです」と Bänziger は話す。また、彼女は、遺伝子組み換え法が伝統的な植物育種から人々の注目と資金を奪っていることも危惧している。しかし、伝統的な植物育種は、野外での育種をスピードアップさせる新たな遺伝学的手法によって、より強力になっている。例えば植物育種家が、マーカー利用選抜を使えば、目的とする特定の遺伝子と連鎖する遺伝子マーカーを追跡できるのである。

長期的にみると、こうした立ちは逆効果だ、とバイオテクノロジーの研究者はいう。Beachy は、バイオテクノロジーに反発することは重大な間違いだと考えており、こう話す。「先進的農業は、まだ初期段階にあり、この段階では、誰もが自分たちの成果が他人の成果よりも重要だと考えています。問題の深刻さに気づくようになれば、誰もが参加して合議できるような体制ができていくと思います。使える技術をすべて集めて協力し合う必要があるのです」。

植物は、いろいろな形で水を必要とする。水なしでは栄養を吸収できず、光合成もできない。緑色植物は、水圧のおかげでしおれないでいられる。CIMMYT で小麦の生理を研究している Matthew Reynolds は、干ばつに耐える植物を作り出せると考えることが間違っている、という。「岩や石は干ばつに耐えますが、植物には水が必要です。この性質は、ほとんど変えられないのです」。

それに、植物自身が進化に任せて水ストレスに対応する方法は、農家のニーズに合わないかもしれない。その一例が、トウモロコシの種子不稔である。CIMMYT のトウモロコシ研究担当ディレクターの Bänziger は、「干ばつ状況下に置かれたトウモロコシは、花粉を作るために、より多くの養分を使い、種子作りに回す養分を減らします」と話す。トウモロコシの立場でみれば、これはもっともなことである。花粉は、かなり少ない養分でも作ることができ、別のトウモロコシに受粉して結実にこぎつけられれば、干ばつにあった親植物は自分の遺伝子の 50% を子孫に伝えること

ができる。しかし、このことはほとんど農家の役には立たない。農家は花粉ではなく、穀粒を売っているのである。

そこで、干ばつ時に植物の生理反応を止める、ということが乾燥耐性を高める方法の1つの選択肢となる。カリフォルニア大学デービス校（米国）の植物生物学者 Eduardo Blumwald は、こう話す。「植物は、通常、ストレスを避けます。実際、我々は誰もがストレスを避けます。空気がカラカラに乾いていれば、我々はバブに行きビールを飲むでしょう」。タバコの場合には気孔（光合成のために二酸化炭素を取り入れたり、蒸散を行ったり、呼吸したりするための、葉にある孔）を閉じる。そして、蒸散が起こる面積を減らすために古い葉を落とし始める。「何百万年もの間、この方法でうまく機能してきました。とてもよい方法です」と Blumwald はいう。

しかし農家にとっては、落葉は種子に入るはずだった大量のタンパク質と糖分が失われることを意味する。そこで Blumwald は、遺伝子操作によって、サイトカイニンとよばれるホルモンが古い葉に残るタバコを作製し、古い葉がしおれても落ちないようにした。この遺伝子組み換えタバコに再び水を与えれば、古い葉が息を吹き返し、古い葉の養分を種子の成長に利用できるようになる³。遺伝子操作の最も多い副作用の1つが収量低下だが、「この技術に代償はありません。収量は減らないのです」と Blumwald はいう。

Blumwald の研究成果は、タバコのようなモデル作物でしか得られていないが、Bänziger は、別のモデル作物であるシロイヌナズナで、数多くの遺伝子組み換え研究が行われている点にも留意している。彼女はまた、実験室での成果を農場でも得ることのむずかしさと、資金や設備の不足も憂慮している。たとえ農作物での研究が行われたとしても、「野外環境が大きく異なるため、実験室内での研究から踏み出せないのです」と彼女はいう。

そして、Reynolds たちは、干ばつ条件下で従来以上の収量が得られる有望な小麦の品種を数種類開発した。その一部は1～2年以内に発売される予定だが、それは遺伝子組み換え技術ではなく、伝統的な選抜育種の成果である。そのいくつかは、近代的な品種と、小麦の栽培が最初に始まった中東地域に由来する野生近縁種を交配したものである。これらの品種は、干ばつ時に根の構造を変え、根をより深く張るようになる。

偶然に始まった育種実験が500年続いて生まれた品種もある。コンキスタドルが、メキシコに小麦を持ち込んだのは、カトリック教会のミサで使うパンを作るために、「トウモロコシは異教徒の作物とみなされていた」からだ、と Reynolds は説明する。それから500年が経ち、農家は、小麦をメキシコの乾燥状態に適応させた。こうした品種の多くは、地中の非常に深いところまで根を張る⁴。

同じ目的が、伝統的な育種にもバイオテクノロジーによるアプローチにも役立つことが多い。しおれてしまうような暑さでも光合成を最大限確保するために、気孔を閉じる研究、植物全体の導水性を高めるための研究、葉の構造を変えることをめざした研究が行われている。また、植物による二酸化炭素の利用効率を高め、そのためには気孔をさらにしっかりと閉じておくための複数の技術も検討されている。このような二酸化炭素濃縮メカニズムは、さまざまな科の植物に自然に備わってきた。

化学系の巨大企業デュポン社の子会社であるバイオニアハイブレッッド社（米国、アイオワ州ジョンストン）は、多くの大手の種子会社と同じように、乾燥ストレスを受けた植物の光合成を高め、危険させる種子不稔を回避し、植物の年間スケジュールを微調整して、被害を受けやすい開花期が最も暑い時期と重ならないようにする、というそれぞれの目的を達成するための遺伝子組み換えによる方法と伝統的な方法の開発に取り組んでいる。

こういった研究アプローチはすべて、植物の乾燥ストレスに対処する方法に関して何を知っているのかということから始まる。伝統的な育種にとっては、これ以外の出発点はない。これに対して、純粋に遺伝子組み換えの手法で植物と水の関係を変えようとする研究者もいる。この方法には、植物ゲノムのデータから乾燥応答と何らかの関連性があると思われる遺伝子を抜き出して、遺伝子操作を行うといったことが含まれる。「それはまさに、ゲノム全体にわたって個々の遺伝子の機能を解明することなのです」と、モンサント社の乾燥耐性トウモロコシ担当のプロジェクントリーダー Jacqueline Heard は語る。

モンサント社とメンデル・バイオテクノロジー社（米国、カリフォルニア州ヘイワード）は、「腕力勝負」で、研究対象作物における転写因子を系統的に調べ、そのノックアウトや過剰発現によって何が得られるのかを調べている。転写因子は、さまざまな遺伝子の発現を制御するため、植物のストレス応答に関連するシグナル伝達経路の上流で機能しているという傾向がある。この研究アプローチによって、モンサント社とメンデル・バイオテクノロジー社は、モデル植物で、いくつかの有望な候補を発見した⁵。そして既に、モンサント社は、2種類の乾燥耐性トウモロコシ製品を開発中で、2015年ごろの発売をめざしている。

「当社の初期の製品は、すべてが雑草と害虫対策に関するものでした。しかし、次の10年は収量増加をもたらす製品になると心から確信しています」と、モンサント社のバイオテクノロジー研究担当副社長の Steve Padgett は話す。そして、乾燥耐性が、業界がこれまでに取り組んできた形質よりも複雑なことに間違いはないが、その複雑さに研究が追いついてきた、と付言する。さらに彼は、「我々が取り組んでいる科学は相対的に扱いやすく、市場の要求に応えるものです」と語っている。バイオニアハイブレッッド社の作物遺伝学研究開発担当副社長の William Niebur



R. KAUTSKY/AZOTEIMAGES

タンザニアの農家は、早く成熟して干ばつに打ち勝ち、すぐれた農法を十分に活用できるような、作物品種を求めている。

は、さまざまなスケールの乾燥耐性作物市場が世界中に存在しているが、製品開発と利益を達成するまでに時間がかかることが予想される、という同社の見方を示している。そして、「乾燥耐性作物の開発は、虫を殺すタンパク質や植物に除草剤耐性を付与するタンパク質を同定することよりもかなり複雑です。この研究領域は、自分のキャリアすべてをささげ、それでも改善の余地が残るようなものであると我々は考えています」と語っている。

農場に目を向ける

さまざまな投資家や企業がからんでいるため、遺伝子組み換え研究と作物栽培研究のどちらに資金が多く集まっているのかわかるような全体統計を入手することは、ほぼ不可能である。

Reynolds は、こう語る。「おそらく、遺伝子操作研究に対する資金のほうが多いのではないかと私は思います。なぜならば、遺伝子操作研究のほうが容易に投資利益が得られるからです。作物栽培上の操作については、特許を得ることがむずかしいのです。それは実に危険なことだ

と思います。正しい作物栽培方法で土壌管理をしないなら、どんな遺伝子操作技術も役には立たないのです」。

そのため、今世界では、各農家を訪ねて、細部を重視しながら、長靴を泥だらけにして現場で活躍するアグロノミストが必要とされているのである。その1人が Hubert Savenije である。彼は、デルフト工科大学（オランダ）に所属する水文学者で、タンザニアでの農業経営の改善に助力してきた。「雨で土壌が潤うときに最大の収益が得られることは明白です」と彼はいう。

タンザニアでの Savenije の研究地域では、*fanya juu* という特殊な段々畑の一種が耕作されている。これは一連の溝を斜面の勾配に直角になるようにいくつも作り、その溝の上側に土を盛るという方法である。こうすると、水が斜面を流れ落ちるとき、盛り土によって水がたまり、その背後に植えられた作物が利用できる。この農法で数年間耕作を続けると、唇の形をした段地が何段も重なった耕地になる。これとは別に、深く根づくように、ナイフで土地を切り開いて深さ 50 センチメートルの細長い溝を作り、そこにトウモロコシ

の種をまく農法もある。また、休耕地や道路から流れ出る少量の水を集める農家もある。作物をより深く根づかせ、土壌からの水の蒸発を減らし、水をかき集めて土に戻すことは、発展途上国での作物栽培にとって新しい考え方ではない。しかし、それを正しく行うことはむずかしい。「ひとつひとつのケースが極めて特殊なため、さまざまな手法を試す必要があるのです」と Savenije はいう。

タンザニアのムウェンベ近郊の農家で、Savenije の協力先である Iddi Murindaka は、*fanya juu* を利用し、肥料を撒き、近くの溝から水を引いて、作物を栽培している。Murindaka は前回のひどい干ばつのことをよく覚えており、当時を次のように振り返る。「食料がまったくなく、家畜は死に、家族の健康状態も非常に悪くなりました。2頭のヤギを売って、20 キログラムのトウモロコシを買っていました」。今では状況が改善され、彼の家族は最近ミシンを買ったことを自慢し、子どもたちは学校に通えるようになった。

Murindaka と Savenije の協力先の別の複数の農家は、従来種よりも早く成

長して干ばつに打ち勝ち、その結果として新しい農法を最大限利用できるような作物品種に関心をもっている。どの点が重要なのかと尋ねたところ、全員が「両方」と答えた。「適切な農業経営をしても、種の質が悪ければ、成長に時間がかかるでしょう」と Murindaka は話す。

だからといって、質の高い種子が発売されれば、それに Murindaka が投資するということにはならない。農家は、その土地の気候のために、リスク回避を優先しているのである。Savenije の別の協力先農家である Walter Godfrey Mjema も同じ考えである。「いまだに、次の農期に雨が降るかどうか分からないのです。そのために収穫量が決して安定しません。『次の農期にはトウモロコシを植え、新しい農業経営の知識で収穫量を増やし、それによって新しい家財道具が買える』ということはできます。そうはいっても、雨が降らなければ、仕方ないのですよ」と Mjema はいう。

Savenije のような研究者が犠牲を払っているのに、最新のバイオテクノロジーにすべての資金が集まっているのではないかという懸念がある一方で、作物栽培学に対する関心は高まっている。伝統的な投資家やビル & メリンダ・ゲイツ財団とロックフェラー財団の共同企業体や AGRA（アフリカ緑の革命のための同盟）のような新しい資金援助団体は、農業技術に対する資金提供の重要性を強く主張している。

海外開発研究所（英国）によると、発展途上国では、1980 年から 2005 年までの間に政府の開発関連予算の総額が 250% 増加した一方で、農業に対する予算が実質ベースでほぼ半減した。このように軽視された時期があったにせよ、農業技術に資金を提供しようという動きは、確かに歓迎すべきことである。AGRA 総裁の Namanga Ngongi は、AGRA が、足こぎ式の揚水ポンプや太陽電池式の点滴かんがいといった技術を研究していることを明らかにしている。ゲイツ財団の農業

開発担当ディレクター Rajiv Shah は、「農場レベルや流域レベルでの」管理プロジェクトや伝統的な育種に対する助成金に注目していると話す。

「作物遺伝学と作物管理の間には強い相互作用があり、この両者のアプローチは補完的であり相乗的であると我々は考えています。こうした領域における優先課題を決める作業は今も続いています」と Shah はいう。結局のところ、資金援助団体が強く後押しをすれば、作物栽培学とバイオテクノロジーは仲よく協力し合う関係になれるのかもしれない。

Emma Marris はミズーリを拠点に活躍する *Nature* の特派員である。

1. *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture* (Int. Wat. Mgmt. Inst. & Earthscan, Colombo & London, 2007).
2. James, C. *Preview: Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2006 ISAAA Briefs No. 32* (2006).
3. Rivero, R. M. et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **104**, 19631-19636 (2007).
4. Reynolds, M. J. *Exp. Bot.* **58**, 177-186 (2007).
5. Nelson, D. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **104**, 16450-16455 (2007).
6. Liu, J. & Savenije, H. H. G. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* **5**, 27-50 (2008).

枯れゆく流域

水盆、集水域、流域、何とよぼうとも、この水循環の基本単位で、人々は、日々の生活用水を分かち合わねばならない。多くの流域では、水の需給が逼迫している。上流と下流の農家が交渉して、河川や地下水からの取水量を取り決めており、水道用水や工業用水と競合することも多い。それに川には魚も生息している。

対立が起こっている流域の例は、あらゆる地域で見られる。例えば米国では、南西部のコロラド川の水域に対する需要が、農家やフェニックスなど諸都市の間で非常に高く、1900 年

隣接諸国の間で、水利権をめぐる争いが絶えない。

ある地域社会で、作物への過剰な散水をやめ、プラスチック製のかんがい用水路を設置したことで大いに満足しているでしょう。それにより確かに水のむだを減らすことができたが、それまでは水が土壌に浸み込み下流の井戸を満たしていたことを考えてほしい。流域全体でみれば、何の効率改善にもなっておらず、下流では井戸の所有者が怒り狂っているのである。

コロラド川（右写真）や中国の黄河をはじめとする多くの流域では、海へ流れ出る水がなくなり、今や「内陸河川」とな

っている。かつて河口に形成されていたデルタ湿地は、乾き切った三角地帯と化している。ウズベキスタンのアムダリア川とシルダリア川も、もはやアラル海には注いでいない。アラル海は昔の半分の大きさになり、現在の海岸線から何キロメートルも離れたところにボートが朽ちて転がっている。

水量のない河川や水量の少ない河川は、環境上、大災害となりうる。生態系を健全に保つために必要な最低限の水量を見極めるための研究は、始まったばかりである。例えば、魚が繁殖するためには、ある程度の水量を必要とする。そうなる



と、環境も水の消費者として競合関係に加わるのである。「環境は、水の資源でありながら水の消費者でもあります。環境にも正当な水の取り分が当然あるわけです」。スリランカのコロナボにある IWMI（国際水管理研究所）に所属する主任水文学者 Vladimir Smakhtin は、こう語っている。

E.M.



M. HENLEY/PANOS

MUDDY WATERS

先行き不透明なインドの水問題対策

Nature Vol.452 (278-281) / 20 March 2008

インドでは、増加し続ける人口に、水の供給が追いついていない。インド国内の河川をつなぐ大胆な計画は、深刻化する国民の渇きを癒やすことができるのだろうか。Daemon Fairless が検証する。

神聖なヤムナ川は、デリーの街を流れる間に、汚泥にまみれた汚れた川となる。悪臭の立ち込める川岸から、漁師たちは網を投げ入れ、わずかに生き残っているとげのある魚を引き揚げる。若い男性の集団が飛び込み、泥々の川底からコインを回収する。そのそばでは、男性が麻袋に入った灰（家族の遺灰）を川にまいている。この22キロメートルに及ぶ流域は、アジアで最も汚染された水域の1つである。35億リットルの汚水が、ほとんど処

理されないまま、毎日川に流れ込んでいるのである。

だが、デリーで水質より懸念されているのが、水の供給そのものである。比較的ましな地域でも、突然1日数時間にわたる断水が起こるのは珍しくない。給水時でも、漏れやすい給水管のために、最大40%もの水が失われてしまう。デリーにおける市営水道システムは非常に不安定で、1500万人の市民のうち約4分の1が個人的に掘削した井戸に頼っており、

それによって地下水位の低下を引き起こしている。

こうしたデリーでの事態は、迫りくるインド水危機の前兆である。現在のインドには、国民に十分供給できる、1人当たり年間1800立方メートルの水がある。これは、飲料用、衛生用に直接必要な水と、食料生産のために間接的に必要な水の量を合計した、1人当たり年間1700立方メートルを上回っている。しかし、インドの人口は増加し続けており、今後水の需

要も増すだろう。その需要のほとんどは農業用水である。かんがい用水は既にインドの淡水消費量の 90% 以上を占めていて、その多くは米のような多量の水を必要とする穀物に利用されている。世界銀行の推計によると、今後 20 年で、インド国民 1 人当たりが利用できる水の量は 1000 立方メートル以下に落ち込むという。これは、生存に必要な 1700 立方メートルをはるかに下回る。今世紀の半ばまでに、インドの人口は 15 億～18 億人で安定すると予想されていて、国連環境計画は、インドでは現在の供給量より 30% 増の水が必要になると推計している。

ラージャスターン州やグジャラート州といった乾燥した西部の州や、西ベンガル州を含む北部の州の農家では、既に水の過剰利用による地下水位低下という問題を抱えている。デリーでも、問題は農業需要によって深刻化している。ヤムナ川流域からの水の 85% 以上はかんがいのために利用され、都市部の帯水層を涵養する能力が低下している。そのうえ、もしインドの政策立案者の思いどおりに計画が実行されれば、さらに将来、多くの水が取水されることになるだろう。

網の目作戦

いかなる問題も工学で解決できると確信するインドは、壮大な計画を考案している。それは、主要な河川流域の大部分を広大な運河網でつなぎ、何十億リットルという水を、水が豊富にある流域から水の乏しい流域に運ぶというものだ。インド国立水開発庁（NWDA；水資源省下の政府系学術組織）の指揮の下、早ければまもなく河川連結プロジェクトによる最初の運河が着工される。

しかし、この解決策によって状況が改善されるかどうかは定かではない。この計画の環境への潜在的影響や、予測される水不足が本当はどの程度なのかということについて、公式に手に入る情報はほとんどないのである。『河川連結』プロジェク



連結プロジェクト

インドの河川連結プロジェクトの目的は、国内の河川を広大な 30 の運河網（赤線）でつなぐことにある。ケン・ベトワ運河（矢印）は建設間近である。

トの経済、社会、環境に対する妥当性を認める公式な文書はありません」。こう話すのは、インド経営大学院コルカタ校の開発環境政策の専門家、計画に反対する学者と研究者、政策顧問のグループ、インド河川連結プロジェクトに関する全国市民組織委員会（National Civil Society Committee on the Interlinking of Rivers in India; NCSCILR）のメンバー、Jayanta Bandyopadhyay である。また、ジャワハルラール・ネルー大学環境科学部（デリー）の地質学者 Vedaraman Rajamani は、「連結プロジェクトは、インド亜大陸でこれまで経験したことのない規模の環境破壊を引き起こす可能性があります」と語っている。

水をむだにしない

一見したところ、インドは特別、水の乏しい国ではない。年間降水量は約 1170 ミリメートルである。問題は、降水量の分布が不均一なところにある。インドで最も湿潤な州の 1 つである北東部のメガラヤ州では、年間平均降水量が 2818 ミリメートルもあるが、その一方でラージャスターン州では、乾燥が激しい年には、たった 100 ミリメートル程度しか雨が降らないのである。入手可能な数少ない資料や公式発表によると、河川連結プロジェクトの背景にあるのは、海に流れてむだになる「余剰水」を、かんがいや水力発電に必要な場所に回そうという論理である。

河川連結のアイデアは 19 世紀半ばまで

さかのぼる。英国の将軍で技術者でもあった Arthur Cotton が、内陸輸送のために一連の運河を提案した。この計画が再浮上したのは、2002 年、タミルナドゥ州とカルナータカ州との間で起こった、カヴェリ川からのかんがい用水の利用をめぐる訴訟の最高裁判決を受けてのことである。判決の中で裁判官らは、その当時 NWDA の調査構想にすぎなかった河川連結プロジェクトを、2012 年までに完成させるよう命じたのだ。この判決は、問題になっている訴訟とはあまりにかけ離れており、連結プロジェクトの監視団を悩ませた。「このような形で裁判所が介入するのは、我々にとって大きな打撃でした」と、電力計画省と科学技術省の前大臣で、NCSCILR の一員でもある Yoginder Alagh は話す。Nature は、NWDA を管理する水資源省に何度も連結プロジェクトについての取材を申し込んだが、返答はなかった。

裁判所がプロジェクトの実行を命じたこうした特殊な経緯と、時に不可解なインド政府官僚主義の体質は、いつ何が関与してくるのか、誰も正確には知らないことを意味している。しかし全体としては、この計画は、インドの主要河川流域の大部分を占める 46 の河川を、1 万キロメートルに及ぶ 30 の運河網でつなぐというものだ。いくつかの運河は、2 つ以上の河川を横断している（左ページ図参照）。このプロジェクトは、約 2000 億米ドルかかると見積もられていて、32 の主要なダム建設も含まれている。デリーを拠点とし、計画に反対する非営利組織「Development Alternatives Group」の代表 Ashok Khosla は、「着工されれば、単独では世界最大の土木事業となります」と述べている。

このプロジェクトの規模の大きさは一部のインド国民の誇りとなっている。インドの初代首相ジャワハルラール・ネルーは、巨大な多目的ダムを「近代インドの神殿」と称したことで有名である。1947 年の独立当時、インドの主要なダムは約 300 基

にすぎなかった。2000 年には、巨大ダムの数は 4000 基を超えている。これは、8 万 6000 基のダムを保有する中国、7 万 9000 基の米国に次いで、世界第 3 位の規模である。同様に、国家の発展という精神の下で、連結プロジェクトはさらに 3500 万ヘクタールをかんがい地に変えようとしている。当時の NWDA 河川連結作業部会の議長 Suresh Prabhu の記者声明によると、これは 2003 年に主要なかんがいプロジェクトによって開発された面積の 2 倍に近いという。そうならば、このプロジェクトは 25 万ヘクタールの土地で干ばつを克服し、ガンジス川（ガンガ川）とブラマプトラ川流域の洪水被害を 20 ～ 30 % 低減できることになる。この 2 つの河川はインドの淡水資源の 60 % を占めるが、一方では年間を通じて起こる洪水によって、2007 年には 8 億 5000 万米ドルの被害が発生し、1000 人以上の人が亡くなっている。

デリーを拠点とする国際かんがい排水委員会の事務局長で、河川連結作業部会の前調整官 Mukuteswara Gopalakrishnan によると、このプロジェクトは約 3 万 4000 メガワットの水力発電量も供給するだろうという。これは、インド国内の電力需要の 25 % を占める現在の水力発電量の約 2 倍に相当する。Gopalakrishnan は、「この種のプロジェクトをどの発展途上国も望んでいるのです」と話す。政府を支持する人々は、乾季に縮小することの多い水路に一年中水を送るこの計画が、河川の生態系のためにもなると主張している。

中身のない情報

NWDA は、提案されている 30 の運河のうち、14 の運河についての予備調査報告書をウェブサイトで公開している。この報告書は、プロジェクトに関して市民が入手可能な唯一の公式データで、提案されたそれぞれの運河の利点と欠点について詳細に述べられている。ただし、この報告

書には、検証できるデータはほとんど含まれておらず、調査研究は引用されていない。想定される生態系への影響についての章には、ダム建設によって水没する総面積、移住が必要な人の数、現地の動植物の簡単なリストしか記載されていない。

こうした計画の規模と不明瞭さを考えれば、このプロジェクトを辛口に批判する人が多いことは、まったく驚くには当たらない。批判的な意見をもつ人々は、流出や洪水が生態系に果たす重要な役割が無視されているため、このプロジェクトで使われている余剰水の概念は誤解を招いている、と主張する。Rajamani は、「プロジェクトの余剰水の定義は、完全に人間中心のものです」と語る。「モンスーン期の洪水と渇水期という制約の下でインドの生態系は発展してきた、という事実を考慮していません」。インド経営大学院コルカタ校の Bandyopadhyay と Shama Perveen によるこの主張は、プロジェクトを最初に公に批判したものの 1 つである。彼らは 2004 年発行のオンラインジャーナル *India Together* で、水とかかわる生態系の全体像を考慮しない「還元主義的立場」を取っているとして、インド中央政府を厳しく批判している。

警告は継続している

2005 年 8 月、Rajamani は、国の計画はインド亜大陸の水循環を十分に理解していないと批判する意見を、インドの主要な全国紙の 1 つである *The Hindu* に投稿した。この記事の中で Rajamani は、政府が軽減しようとしている毎年の洪水は、主要な農地で、有害物質を取り除き、土壌の栄養素を堆積させ、地下水を涵養するのに重要であると述べている。そして、このように大規模にインドの川の流れを変えてしまうと、沿岸の生態系への悪影響や、モンスーンの周期さえ変化させる可能性といった、予期せぬ影響を及ぼすのではないかと主張している。「これは憶測にすぎません」と Rajamani はいう。「し

かし私がいいたいのは、こうしたことを考慮せず、詳細な調査もしないでこのような計画を進めるのは、自殺行為であるということです」。

Rajamani の記事は、連結プロジェクトを強く支持していた Abdul Kalam 大統領（当時）の目にとまった。大統領は、電話で、モンスーンに関する Rajamani の懸念を裏づけるデータがあるのかどうか尋ね、Rajamani を驚かせた。データは存在しなかったが、大統領の関心に触発され Rajamani は、2005 年 10 月、

いく人かのインド人地球科学者を招いて、バンガロールで 1 日だけの会議を開いた。何の準備もなく、自由な雰囲気の中で意見を交換しただけだったが、プロジェクトによる環境への悪影響について、政府外で科学的に話し合われた、最初で最後の討論となった。

会議では、「現在入手可能な情報を単純に解釈すると、河川の付け替えによるベンガル湾への淡水の流入量の減少は、モンスーン周期の規模、期間、空間分布に大きな影響を与える可能性がある¹」と結論づけられた。インドの東海岸からベンガル湾に流れ込む淡水は、湾北部の広い地域で 10 ～ 20 メートルの水の層を形成する。塩分濃度が低い水の層は、モンスーンによる雲形成の一翼を担うと考えられている。それがまた、インド亜大陸の淡水の源となっている。会議参加者の結論は道理にかなっていると、持続可能な水の管理について研究する Institute for Sustainable Water, Integrated Management & Ecosystem Research（英国、リバプール）の湿原管理の専門家 Edward Maltby はいう。そして、「陸上生態系はもちろんのこと、沿岸・海洋生態系へ大きな影響を与えるなど、ほかにも潜在的に重大な結果をもたらす可能性があります」と付け加えた。

この報告書の重要な点は、プロジェクト評価の過程で研究者が加わっていないことを示したところだ、と Rajamani はいう。しかし、ほかの公の批判と同様に、この報告書によっても NWDA の公式な返答を引き出すことはできず、その後、独立系調査機関による追跡調査もほとんど行われていない。

機密情報

またこの会議では、ヒマラヤから流れてくるインドの河川流量の推定値が公式に手に入らないことも批判している。水利権は、パキスタン、中国、バングラデシュ、ブータン、ネパール各国と共有されていて

政治的緊張の原因となっているため、政府がデータを保護しているのだ。これらの数値は予備調査報告書に載っておらず、インドの川の流れを変えたとき、どのくらいの河川流量が残るかを外部の科学者が見積もることはむずかしい。これは、環境科学者の間ではよくある批判である。「今日でさえ、河川流量は機密情報となっています」。International Journal of Ecology & Environmental Sciences の編集長で、ジャワハルラール・ネルー大学の水文学者 Brij Gopal は、こう話す。Rajamani は、現在自分が不満に思っていることの 1 つは、多かれ少なかれ、インドの環境科学が政府の政策立案者に無視されていることだという。物理学や工学のような研究分野は高い評価を受けているのに対して、「環境科学は『不可触な科学』、すなわち、触れることも、見ることも、聞くこともしてはならない汚れたもの」とみなされているのだ。そのため、河川計画と水管理は、伝統的に技術者と官僚の手にゆだねられている。彼らはいつも適任であるとはかぎらず、必ずしも大規模な水利事業が環境に与える影響に関心があるとはいえない。Gopal はさらに厳しく批判している。「インドの環境科学、少なくとも水域の科学は、政策を動かすというよりもむしろ、政策によって動かされています。インドの河川の現状について責任を追及するのならば、政府の技術者に行き着くでしょう」。

しかし、プロジェクトはいまだ実現に至っておらず、こうした議論は机上の空論に終わるかもしれない。提案された 30 の連結計画のうち、最初のプロジェクト（マディヤ・プラデシュ州のケン川とウッタル・プラデシュ州のベトワ川をつなぐ、230 キロメートルの運河）こそ進行中だが、それ以外に着工に至ったプロジェクトはまだ 1 つもない。マディヤ・プラデシュ州とウッタル・プラデシュ州は、2005 年、中央政府との覚書に調印した。河川連結プロジェクトの政府のコンサルタントとして今も働く Gopalakrishnan は、詳細

ISTOCKPHOTO



降れば必ず土砂降り：インドの降雨量は地域によって大きく異なり、水供給の管理をむずかしくしている。

なプロジェクト報告書は既に作成されていて、2009年には承認されるはずだ、と述べている。

要因

こうした着工に向けた動きは、必ずしもすべての連結プロジェクトが進んでいることを意味してはいない。デリー大学経済成長研究所の所長 Kanchan Chopra は、2007年の夏、中央水道局と NWDA の技術者と話をした後、NCSCILR の公式な批判が計画をいくらか遅らせる圧力になっているのではないかと思ったという。「論理的な反対意見は、政府の熱意をそいだようです。プロジェクトは、自然消滅するかもしれません」と Chopra は話す。しかし Gopalakrishnan は、それは計画に反対する側の人々の希望的観測だという。プロジェクト全体は進行しており、「必然的な流れといてもいいでしょう」と彼は語る。目前に迫っているインドの水不足に対する警告により、プロジェクトは緊急性を増しているのだ。

しかし、正確な水利用可能性の推定値を入手するのが困難だという理由で、水危機は実際より過大に警告されているという専門家もいる。デルフト工科大学（オランダ）の水文学者 Hubert Savenije は、利用可能な淡水を 2 種類に分けている²。「ブルーウォーター」は大小の河川や湖起源の水のことで、かんがいによる穀物生産に使われている。作物が成長する季節に乾燥している期間があれば致命的となるが、毎年食料生産に使われる淡水使用量の約 20 ～ 30 % にしかならない。残りは「グリーンウォーター」とよばれる、植物が直接吸い上げる、土壌中に蓄えられている雨水由来のものである。Savenije によると世界の主要な食料の 60 % 以上は、グリーンウォーターによって生産されている。

国際連合などの機関による水消費量の推計では、一般的にブルーウォーターとグリーンウォーターの両方が含まれているた

め、問題が生じる。しかし、グリーンウォーターは新しい概念であるため、水利用可能性の推計にはグリーンウォーターが考慮されていない傾向がある。Savenije によれば、これは大きな見過ごしだという。特に、グリーンウォーターの正確な推計のないインドでは大きな問題である。このずれは、需要が供給を大きく上回るという誤った印象を与える、と彼はいう。

水を上手に管理する必要があるとっているわけではない。政府は連結プロジェクトにこだわっているが、水管理手法はそれほど壮大なものでなくてもよいのではないだろうか。インドのさまざまなかんがい手法の計画に深くかかわってきた Alagh は、プロジェクトの提案者がいうように、水の供給量が全体的に増加することによって農業の生産性が向上することはないと話す。1970、80 年代のかんがい農地の増加は穀物の生産性を爆発的に押し上げたが、新しいかんがいシステムの誤った管理などによって、ここ 5 年ほどは全穀物生産量は低下していると指摘する。

かんがいのために新たな水を取水するのではなく、現在の水資源をよりよく管理するところに解決策がある、と Alagh はいう。そうするための簡単な方法は、大きなタンクに雨水を集め、乾季に農地へまくことである。インドのかんがい手法も、もっと効率的にできるだろう。水漏れ防止されていないかんがい用運河で、蒸発や漏水によって多くの水が失われている。また、一般的な湛水かんがいの手法は、パイプから植物の根に直接水を供給する細流かんがいと比べるとむだが多い。しかし、かんがい用水は無料であるため、インドの農家にはより経済的な方法を導入する気はほとんどないだろう。

Savenije は個人として、インド政府は最も簡単な解決策がみえていないと感じている。すなわち、水そのものを運ぶのではなく、湿潤な地域でより多くの穀物を育て、乾燥地域へ運ぶという方法である。というのも、育てるのに使う水よりも穀物のほう



「不可触な事業」：インドでは、人口増加によって水供給が不足すると見込まれている。

が何倍も軽いから、安く輸送できるからだ。しかし、地方輸送機関の不足や、不十分な地方の社会基盤整備、不公平な農村市場を考えると、食料の流通を改善するのは大変な挑戦である。「それでも、国内の河川網を作り変えるより困難な問題が少ないことは確かです」と Savenije は語る。

デリーの神聖な川の岸にたたずむ観光客は、インドの水が哀れな状態にあることに気づいていないようだ。家族連れがヤムナ川の岸にある火葬場を訪れ、小さな少年に数ルピー払う。少年は泥まみれの川に泳ぎ出て、小さなわらの敷物の上に砂糖菓子や果物、花といった供え物を乗せ、下流に流す。供え物は下流へ流れ、どこへ行くのかわからない。インドと、先細りするインドの水供給は、似たような先の見えない将来に直面している。 ■

Daemon Fairless は 2007 年 IDRC ネイチャー・フェローシップの受賞者である。

1. Rajamani, V. et al. *Curr. Sci.* **90**, 12-13 (2006).

2. Savenije, H. *Phys. Chem. Earth B* **25**, 199-204 (2000).

水問題解決へ向けた 先進国と 科学技術の役割

沖 大幹

東京大学 生産技術研究所
人間・社会系部門 教授

2002年に南アフリカ共和国のヨハネスブルグで開催された持続可能な開発に関する世界首脳会議、いわゆるヨハネスブルグ・サミットでは、取り組むべき課題がアナン前国連事務総長らによってWEHAB、すなわち、Water（水）、Energy（エネルギー）、Health（健康）、Agriculture（農業）、Biodiversity（生物多様性）の5つに整理された。気候変動の影響を考えたりする際に、このWEHAB各項目の観点から検討するなど、チェックリストとして現在でも有用である。会議では、安全な水を手に入れることができない人口の割合を2015年までに（1990年に比べて）半減するという国連ミレニアム開発目標に、改良された衛生施設（トイレ）を利用できない人口の割合も半減することが付け加えられた。また、2003年にフランスのエビアンで開催された主要国首脳会議（G8）では、水行動計画が採択され、2008年夏のG8北海道洞爺湖サミット首脳宣言にはそのフォローアップの必要性が盛り込まれている。

このように、国際政治レベルでは、水問題は従来から大きな課題であり、その解決へ向けてさまざまな取り組みが検討されてきている。これは、やはり、水問題が保健衛生・健康や食料生産、エネルギー生産や生態系保全、貧困と経済発展、さらには水汲み労働に費やされる機会費用を通じて、教育やジェンダー問題にまでつながっているからであろう。逆に、その間口の広さが水問題をわかりにくくし、また、縦

割りの行政、学問、社会の関心のはざまで、水問題に対する関心は、その重要さの割には世界的にも高くなかったのかもしれない。

日本でも、つい数十年前、高度成長期には産業の発展が水資源の不足によって阻害されるのではないかと懸念されており、下水道普及率も1970年時点では20%にも満たなかった。しかし、その後、増加する人口と経済発展に伴う需要の増加、なかでも都市へ集中する需要の増大を支えるべく水資源開発が行われたため、現在の日本では水問題を意識する機会は少なくなり、社会の関心も低くなっている。那覇市や福岡市など、20世紀の終わりになっても慢性的な水不足で苦しんでいた都市にも大規模な海水淡水化施設が導入され、ほかの多くの都市のように、水に関して悩まずにすむようになっている。

しかし、いわゆる地球温暖化に伴う気候変化によってもたらされると懸念されるさまざまな悪影響が広く世間に知られるようになり、さらにその多くが水循環の変化に関係していることもあってか、ここ1～2年の間に世界の水問題への注目が非常に高まっている。そうしたなかで、科学雑誌*Nature*も水特集を組んだのは、まさに時宜を得ている。

ただ、「水問題の解決」というと、遺伝子組み換えのバイオテクノロジーによって、少ない水や多少塩分の混じった水でも多くの収量が期待できる作物の開発であるとか、ナノテクノロジーである膜技術などによる海水淡水化など、ついハード系の先端的な技術開発に目が向いてしまうのは、産業革命以降のイノベーション（技術による社会の変革）経験をいまだに引きずっているからだろうか。

もちろん、そうした技術開発は、効率化を通じて社会に暮らす我々市民の人生を豊かにする原動力であり、水循環の量と質のモニタリング、現象の理解と予測などには先端的な情報通信技術が応用でき、水質処理や水量調節などにかかわるハードな技術開発と共に、望むべき統合的な水マネジメントの実現に役立つことであろう。「水問題解決に必要な技術は既に実用段階にあってこれ以上の技術開発はいらず、水問題解決にはもう理系の研究者は不要だ」とか、「どういう政策が適切かわかっているの、あとは解決策を実行に移すだけの問題だ」といった意見が述べられることもあるが、それは極論過ぎるように思われる。安価なエネルギーの利用可能性の減少や食料価格の上昇といった変化に対応する必要があることを考えると、まだまだできること、やらねばならないことは数多くあるはずである。むしろ、科学技術開発 vs. 政策実現、といった対立軸で考えるのではなく、両者相まって水問題の解決につながると構想するべきなのであろう。

筆者も執筆グループに参画した気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第4次報告書第2作業部会第3章「淡水資源とそのマネジメント」では、水分野における気候変化対策のうちの適応策として次のような項目を挙げている。

- ・貯水池とダム建設による貯留容量の増加
- ・地下水の探査と汲み上げ
- ・海水淡水化
- ・雨水貯留の普及
- ・水輸送
- ・再生水利用による水利用効率の改善
- ・穀物作付け時期、品種、かんがい手法、植え付け面積の変更によるかんがい用水需要の削減
- ・従量料金導入や水市場拡大など経済的手法の導入
- ・農作物輸入によるかんがい需要の削減 (仮想水 [バーチャルウォーター] 輸入)

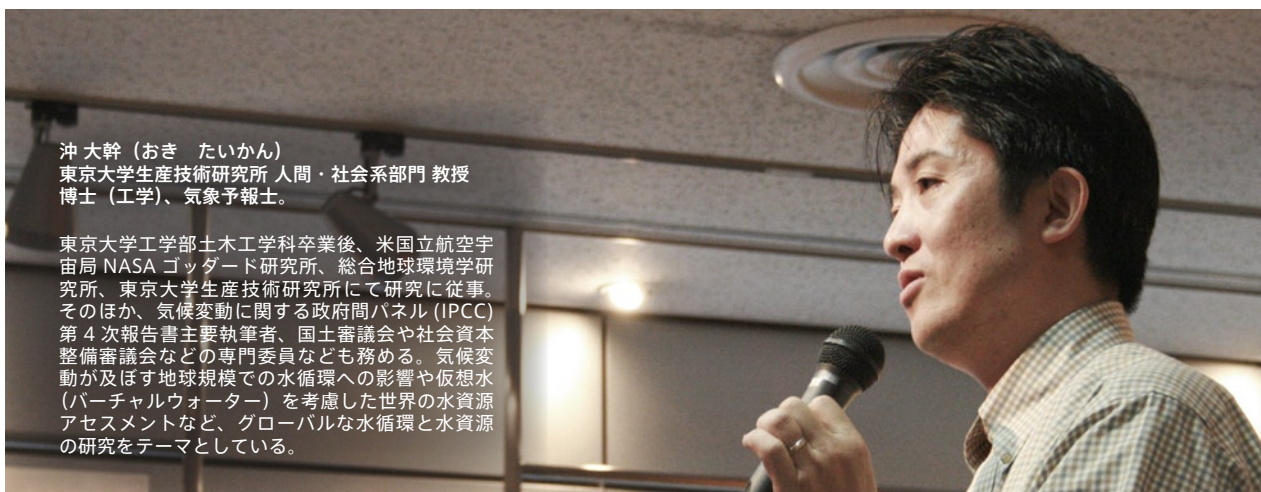
適応策は、現状の問題解決が将来温暖化した際の被害を減らすことにも役立つ、という側面があるので、これらの項目の多くは地球温暖化に伴う気候変動の有無にかかわらず、現状の水問題解決に資することが期待される。ハードな技術面では、海水淡水化だけではなく、再生水利用や農業、工業分野の水利用効率の改善、地下水探査などの可能性が指摘されている。

仮想水輸入 (virtual water trade) は今回の記事にも散見されるように、かんがい用水が足りないような国や地域にまで水を輸送して食料生産をするよりは、水が豊富な地域で食料を生産して製品を輸送するほうがはるかに経済合理性がある、という観点から、水不足気味の国にとって食料輸入がど

の程度の水資源輸入に相当しているかを算定する概念である。Arjen Hoekstra の推計、牛肉1キログラムに1万5500リットルの水が必要、という値は世界平均を想定した結果であり、例えば、日本に関してはよりぜいたくに育てていることもあってか、肉牛乳牛どちらの場合も牛肉1キログラムに約2万リットルの水が必要だというのが筆者らの推計である。

エネルギー使用やモノの消費をやめれば、その分たえわずかながらも大気中への排出量が減る二酸化炭素の問題とは異なり、水の場合には日本で節水してもアフリカで水が使えるようになるわけではなく、ローカルな活動がそのままグローバルな環境問題の解決につながるとはかぎらない。また、石油や石炭のように、いったん使ってしまう基本的には失われてしまう化石エネルギー資源とは異なり、水は循環している資源であり、上手にえば未来永劫に利用可能である。

そういう意味では、水資源確保、生態系保全、洪水被害軽減などをバランスよく達成するためのソフト系的手段を含めた社会資本整備に必要な技術や知恵、人材や資本を、それらを必要としている国や地域に提供することは、まさに仮想的に水を輸出しているのと同じことである。そうした海外支援を通じて、日本など先進国が多少経済的利益などをあげるにしても、途上国をはじめとする世界の水問題解決につながるのであれば、今後推進していくべきだと考えられるし、実際に政治、行政、民間企業はそうした方向で動き始めている。これからの日本の支援活動においては、科学研究や技術開発による後方支援だけではなく、時には前面に立って世界に打って出ることが、大学などの研究機関にも求められているように思われる。



沖 大幹 (おき たいかん)
東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門 教授
博士 (工学)、気象予報士。

東京大学工学部土木工学科卒業後、米国立航空宇宙局 NASA ゴッダード研究所、総合地球環境学研究所、東京大学生産技術研究所にて研究に従事。そのほか、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第4次報告書主要執筆者、国土審議会や社会資本整備審議会などの専門委員なども務める。気候変動が及ぼす地球規模での水循環への影響や仮想水 (バーチャルウォーター) を考慮した世界の水資源アセスメントなど、グローバルな水循環と水資源の研究をテーマとしている。



nature
café

nature
café 科学の夕べ



Nature Café は、どなたでも参加いただけるサイエンスカフェです。Nature から発信できる様々な分野のサイエンスをテーマに、参加者とトップクラスの科学者、Nature で働くスタッフ（編集者や記者等）と一緒に、コーヒーやワインを片手に、カジュアルな雰囲気の中、気軽に語り合います。
最新情報は、NPG ネイチャーアジア・パシフィックウェブサイト、メールマガジンにて随時ご案内いたします。

2008 年実績

第 1 回「気候変動」（2008 年 7 月 11 日開催）

第 2 回「グローバルな水循環と世界の水資源」（2008 年 11 月 8 日開催）

Nature Café 詳細は

www.naturejpn.com/nature_cafe

nature café

科学のタベ 第2回



「グローバルな水循環と世界の水資源 ～科学と技術と社会～」レポート

主催：NPG ネイチャー アジア・パシフィック
共催：ブリティッシュ・カウンシル
協賛：伊藤忠商事株式会社
協力：サイエンス映像学会

水文学研究者と水問題に詳しいジャーナリストが 世界の水循環を語る

第2回 Nature Café は、「グローバルな水循環と世界の水資源 ～科学と技術と社会～」をテーマに、2008年11月8日（土）、ブリティッシュ・カウンシル（東京）にて開催されました。

今回は、日本を代表する水文学研究者である、東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門教授の沖大幹氏、世界の水供給や保健衛生の国際協力などを取材してきた科学・環境ジャーナリストの佐藤年緒氏、そして Nature の気象科学エディター、Michael White 氏の3氏をパネリストとして迎えました。司会進行は前回に引き続き、サイエンスライターで早稲田大学大学院政治経済学術院客員教授の青山聖子氏です。

最初に、「水文学 (hydrology)」「水ストレス」「IPCC (気候変動に関する政府間パネル)」「国連ミレニアム開発目標」という水問題に関する4つのキーワードについて、パネリストが解説した後、各パネリストが10分間のプレゼンテーションを行いました。

沖氏は、波長2センチメートルのマイクロ波を発信する衛星搭載降雨レーダーを使い、地表面からの反射データより世界の土壌水分を測る自身の研究を紹介し、同じ年の同じ地域でも2月と8月

では土壌水分の分布が変わるようすを紹介しました。また、「世界人口の5分の1が、1人当たり1日20リットルの水を居住地から1キロメートル以内で確保できず、水汲みに時間を費やすため、経済的にも大きな損失があります。さらに不衛生な水によって、年間200万人の乳幼児が死亡しています」と話しました。さらに、IPCC やほかのデータから、20世紀には起こらなかったような豪雨が増えるという予測に触れ、「ただ、工場の稼働や交通量の増減に起因して降雨量に週周期が現れるなど、雨の変化はすべて地球温暖化によるものとはかぎらない」と結びました。

White 氏は、グローバルな水問題は、気体や液体、固体といったあらゆる水の状態が関係し、植物や土壌、人間の活動の影響が大きいため複雑であると述べました。また、IPCC のデータから今後、北極や南極が湿潤に傾いたり、南半球で雨が増えたりするなど、地域差が大きくなることを解説しました。「水を使う人間活動のほうが気候変動よりも影響が大きく、農業生産などにおける水の利用やそのマネジメントが重要になるでしょう」と語りました。

佐藤氏は、今年の夏も日本各地で発生した予測困難な集中豪雨、いわゆる「ゲリラ豪雨」についていくつかのケースを紹介しました。いずれも都市気象の局地性を反映しており、近くに高層ビルが建っているなどの背景があると指摘しました。また、昨年東京で下水道

作業員の死亡事故が起きたところも、昔は河川であったことも考慮すると、歴史的にも水に弱い土地であるとも述べました。

さらに佐藤氏は、日本の山岳地域、例えば富山県での積雪の減少のデータから、東京への水供給が需要期に減る可能性があることを説明しました。そして水問題の課題と目標として、見えなくなっている水の循環と生態系を足元から見つめ、森、川、都市（里）、海のつながりを回復すること、安全でおいしい食の自給とエネルギーの自立をめざす必要性を指摘しました。最後に、途上国で女性の労働改善によるエンパワメントなどを挙げ、「科学者、政治家、市民が力を合わせて、国内と国際社会での持続可能な未来をめざすべき」と締めくくりました。

世界と日本の水の問題に関して 活発な質疑応答を展開

続いて、パネリストと参加者との間でディスカッションが行われました。ここでは、主な質疑応答をご紹介します。

Q 発展途上国の水問題の現状は？ 日本ができることは何でしょうか。

A 沖氏：安全な飲み水がないことがいちばんの問題です。これは、乾燥地で物理的に水がないというより、水資源を確保して供給する社会インフラがないことが大きいのです。水質悪化も下水道の未整備の影響があります。ヒ素汚染に関しては技術的には解決可能と聞いていますが、ヒ素がない水とヒ素が多い分離物ができたとき、分離物の高濃度のヒ素をどう処理するか、その経済負担が問題になります。発展途上国の水問題は経済問題と密接にかかわっています。

A 佐藤氏：ヒ素の除去などには世界の NGO がそれぞれ個別にかかわっていますが、例えば、ヒ素中毒になった人を医療がバックアップするというような別分野からの連動や、NGO と国との間に協力がなく、援助が「点」になっています。NGO どうし、あるいは NGO と国との連携の取り組みが大事だと思います。

Q 世界各地の局地的な豪雨や水害による水のグローバルな環境への影響は？ 豪雨があると地球温暖化の影響と報道されているように思われますが、地球温暖化は豪雨や水害と関係していますか。

A White 氏：地球温暖化の水問題への影響については判断が困難です。温度が上がると、海からの水の蒸発が増えます。そして、二酸化炭素の排出によって雲ができやすくなり、雨が降ります。二酸化炭素を雲が吸収し、太陽光が反射します。地球温暖化と豪雨や水害は相互作用がありますが、今後何が起きるかははっきりとはいえません。

A 沖氏：気温が上がると大気中に含まれる水蒸気が増えるため、10 分間で 30 ～ 40 ミリメートルというような、短時間でのゲリラ豪雨が夏に全国で増える予想されています。一日中降る、大河川に洪水をもたらすような雨は、日本では台風で起こります。地球温暖化によって台風は大型になり、風も雨も強くなる

おそれがあるという研究結果がありますが、国際的には合意できていません。マスメディアも、ゲリラ豪雨は温暖化の影響とは報道していませんし、専門家もそうはっていないと思います。聞き流しているとそう聞こえるかもしれませんが。エンターテインメントとギリギリで報道がなされている部分もありますし。

A フロアの国立環境研究所地球環境研究センター・温暖化リスク評価研究室長の江守正多氏：ある年にある場所でゲリラ豪雨があり、マスメディアに「地球温暖化の影響か」と聞かれたら、「科学的にはわかりません」と答えます。ひとつひとつのイベントは偶然にも起こるのでわからないのです。「既に地球温暖化による影響である確率は高くなっているかもしれないし、これからもその確率は高くなります」とは話しますが。

水はエネルギーや食料の問題とも 深く関連している

5 分間の休憩の後も、水の観測方法や海水の淡水化技術、またそれらの技術の社会への応用に関する質問が続きました。

Q 地球観測の技術はどこまで進んでいますか。また、地球温暖化のデータ分析にどの程度貢献していますか。

A 沖氏：JAXA（宇宙航空研究開発機構）と NASA（米国立航空宇宙局）が、1997 年に熱帯降雨観測衛星の試験衛星 1 基を共同で打ち上げ、この衛星で降雨量を直接測れるようになりました。地上約 400 キロメートル上から波長約 2 センチメートルの電波を出し、位相操作で電氣的にビームを振り、雨粒からの反射を調べます。ただ、まだ観測頻度が低く、また、雨の空間的ばらつきや時間的な変化が大きいので、全世界の測定はできません。一方、雨を直接測るではありませんが、2014 年をめぐり、海上での雨粒からのマイクロ波の放射と吸収、散乱を測定することで、雨のグローバルな分布を推定する計画が国際共同研究で進んでいます。降雨量は年変動が大きく、気候モデルによるシミュレーションにも大きな差があります。雲の画像からの降雨量を予測する「ひまわり」のような気象観測衛星が使われるようになって 30 年、熱帯降雨観測衛星が 10 年で、まだまだ自然変動なのか地球温暖化の影響なのかはわかりません。また、地上の雨量計による観測ネットワークは先進国に多く、発展途上国での気象観測データは少ないため、宇宙からの観測によって補っています。

A 佐藤氏：さまざまな観測衛星のデータは蓄積されていますが、利用があまり進んでいません。日本ではリモートセンシング（人工衛星などによる遠隔からの観測）の研究者に喜ばれていますが、発展途上国では台風の進路予測や警戒警報などにも用いられていない現状です。データの利用方法やその制度づくりが新しい課題になっており、この部分にも日本の貢献が必要です。

Q ゲリラ豪雨の測定法はありますか。

A 沖氏：ゲリラ豪雨は、隣の雨量計だと観測できないくらいの程度の範囲で降ります。地上のレーダーのデータからは推計でき

ますが、リモートセンシングのデータは、雨と雪が交じる、豪雨など雨のタイプなどで推計値が変わるため、雨量計に合わせて補正します。現在、日本では地域気象観測システム「アメダス」(Automated Meteorological Data Acquisition System)を約1300地点で運用していますが、30年前は約200地点だけでした。そのため、当時のデータには取りこぼしがあったかもしれません。ただし、「アメダス」が整備されてゲリラ豪雨の観測が増えたということでもありません。気象庁がもつ東京・大手町の明治時代からの時間雨量のデータによると、1960年代には、全球の年降水量が多かったのと同様に、東京でもいわゆる「ゲリラ豪雨」が増えていました。豪雨に対する地球温暖化の影響は、21世紀後半からみえてくると思います。

Q 地下水の測定は可能でしょうか。

A 沖氏：地下水そのものは電波が届かないので、リモートセンシングは無理ですが、2002年に米国とドイツによって重力場を測定するために2つの衛星からなる「GRACE」衛星ミッションが開始され、陸地の水を推計しています。重力場は水の移動で変化し、重力場が強いと2つの衛星の間が開くため、その距離を精密に測定すると、陸地の地下水や雪、土壌水分など陸水全体の増減が推測できます。ただ、まだ500キロメートル四方のスケールでデータが粗いのですが、NASAでは地下水、土壌、川や湖、貯水池をデータ上で分離する研究が進んでいます。今後、技術の進歩によって、地下水についてわかるようになるかもしれません。

A White氏：「GRACE」では氷の表層温度なども測定できます。ただし、地下水の動きは、ローカルレベルでは井戸水の高さの変化でみるほうが正確です。井戸、地上のレーダー、衛星のデータを組み合わせてみるべきでしょう。

Q バイオマスの利用が増えると水や肥料の消費が増え、水の汚染も進むといわれていますが、その点はいかがでしょうか。

A 佐藤氏：エネルギー問題と水問題は表裏一体で、エネルギーを作るときに水を使うし、発電後の排熱は海に放出します。また食料も日本では世界から輸入し、それが糞尿になり、汚泥として処理されます。そして汚泥が、強い雨のとき、下水処理できずにそのまま東京湾に流れると、窒素とリンによって富栄養化が進みます。東京都の下水道では窒素をなくすためにバクテリアなどに食べさせており、そこに酸素を送るだけで東京の電力消費量の全体の1%を使っています。水を考えるときにエコロジー、生態系を考え直して、トータルでエネルギーを減らすにはどうするかを考えたいですね。

A 沖氏：バイオ燃料用のトウモロコシ栽培は肥料によるメキシコ湾の汚染を加速するとして、米国で研究されています。マレーシアのパームオイルは食用のものをディーゼルガソリンにするので、今までと変わらないでしょう。ブラジルでは、バイオエタノールの生産のために草原をサトウキビ畑に変えています。肥料とか水質はあまり懸念されていないようです。

Q 東京で起こるゲリラ豪雨は熱帯のスコールと同じものでしょうか。そうだとすれば、熱帯の都市と同様の対策を取ればいいのではないのでしょうか。

A 沖氏：自然現象が同じといえるかどうかはむずかしいところです。関東より南の地域の8月の短時間豪雨に関しては、熱帯とあまり変わりません。ただ、熱帯直下のスコールでは寒気が関係しませんが、日本の今年のゲリラ豪雨では寒気が入ることで気圧が不安定になっていました。緯度20度ほどのタイではチベットから寒気が入りますし、タイの雨がスコールだとすれば日本もスコールといえるかもしれません。日本は緯度からみれば乾燥地になりそうですが、アジアモンスーンがあるので雨が降ります。1年間に1600ミリメートルの降雨量は世界の陸地平均の2倍で、同じ降雨量があるのはシアトルと熱帯くらいです。熱帯の都市では、豪雨ですぐに冠水が起こります。日本では鹿児島で200ミリメートルの雨が降っても土砂崩れや洪水は起こりにくいのですが、北海道で同様の雨が降るとこれまでそのような雨を経験していないので、起こり得ます。気温同様、降雨量も変化することで問題が起きるのです。

Q 今日の3人のお話では水と食料、エネルギーを一体で考えるというのが共通のキーワードだったように思います。持続可能な開発には、どういった科学技術が貢献し、どのようにマネジメントすればいいのでしょうか。

A White氏：発展途上国では、先進国で可能な技術をそのままっていくのではなく、地域社会において機能する、シンプルな技術にフォーカスするべきでしょう。また、水の供給などでNGOなどが参加した後のフォローをどうするかが大事です。

A 佐藤氏：科学技術をどういう場面でどう適応するか、社会条件を専門家が考える必要があります。水の循環を技術者ひとりひとりが足元から考えることが大切です。また、地域の歴史をたどることで、水の流れや適切な活用方法がわかります。歴史や文化を学ぶことも重要です。

A 沖氏：確かに水とエネルギーと食料の問題は一体です。個々の技術としては、例えば、小水力発電という1メートルほどの水の落差でも発電できる技術、センサーで感知して作物に必要な量だけ水を入れる節水農業の技術、海水淡水化の技術などが注目されます。水が少なくても遺伝子組み換え食品は食べる人の気持ち、生態系を守ることとの間での調整が必要です。マネジメントでは、水のモニタリングの情報共有が必要となるでしょう。地球温暖化、ダム建設、都市化などの局面で、あらかじめいろいろな代替案による影響をシミュレーションして、想定されるメリット、デメリットに関する情報を共有し、選択肢を決めるのです。これは、日本や米国でできるようになってきていますが、発展途上国でも使えるようにすべきですね。一部の科学者の間では「水問題を解決するツールはそろっているので、あとは投資をするだけ」という声もありますが、まだまだ技術の発展も必要です。ローテク、古典的な技術も、最新技術でサポートされるとより信頼性が上がります。そこに夢をもちたいと考えています。