

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。

熱波によって干上がった農業用のため池。2003年8月南西フランスで撮影。

A LONG DRY SUMMER

「特集：水」より

長く乾燥した夏

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

現在、安定した食糧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。土壌含水量の不足は、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含水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。

土壌含水量の変化は、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ない。

「私たちは、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はいう。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パーセント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、土壌含水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。

土壌含水量を把握する

土壌含水量の観測からは、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。土壌含水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、科学者たちが45年にわたって土壌含水量を測定してきたウクライナなどでも、土壌含水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）」の筆頭著者であるJerry Meehlは、「土壌含水量は、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異なる（下の地図を参照）。また、Falkenmarkらの水管理の専門家に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含水量であるが、どのモデルも、このスケールで予測ができる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、気候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。最後に、降雨、蒸発、二酸化炭素の濃度、植物の成長と土壌含水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。

土壌含水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、気温や降雨ほどは観測されていない。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、科学者は、土壌含水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、土壌含水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、土壌含水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、緑の多さを土壌含有量の代用とすることができる。

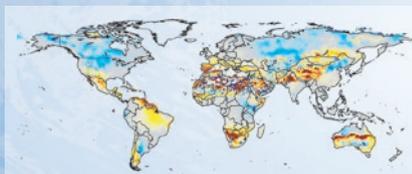
その一方で、コンピューターの処理能力の向上は、研究者がモデルを改良することを可能にしている。エクセター大学（英国）の気候モデル作成者であるPeter Coxは、現在のモデルにまだ改良の余地があることを認めている。例えば、現在のモデルには、個々の熱帯低気圧のモデルを構築できるほどのきめの細かさはない。しかしCoxは、一部の局所的モデルは、かなり細かくなってきていると指摘する。

「ポイントは、さまざまな情報源を用

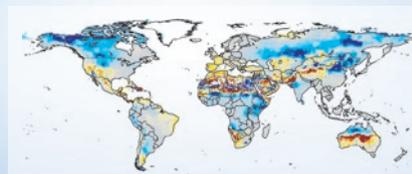
気候モデルが予測する土壌含水量

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年の土壌含水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の科学者により、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。

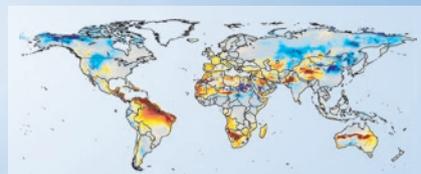
年間平均土壌含水量のパーセンテージ変化
(2068-98年対1960-90年)



マックス・プランク気象研究所



米国大気研究所



ハドリー・センター



熱を感じる：2003年にヨーロッパを襲ったような干ばつの頻度は、今後、増加していく可能性がある。

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、土壌含水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、予想される土壌含水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移行帯であると予想してい

る。極めて湿潤な地域では、土壌含水量が常に多く、蒸発と降雨は土壌含水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地-大気連結実験のマルチモデル研究は、現時点で最もすぐれた見積りの1つであるが、これによると、土壌含水量と降雨を連結するホットスポットは、北アメリカ、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パーセント未満しか占めていない。灌漑が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、干ばつが起こりやすい地域の水と食糧の安全を守るためのかぎとなります」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、中等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パーセントにすぎないと考えている。

食糧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。灌漑は、「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（下の写真を参照）。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』のことに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、すでにこの方法により

収穫量を増やしている。専門家は農民に、流去水（地中に吸収されずに流れる雨水）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に勧めている。

「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。

土壌含水量と「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、流去水、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去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、イエーナ）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、流去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って考えている。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。

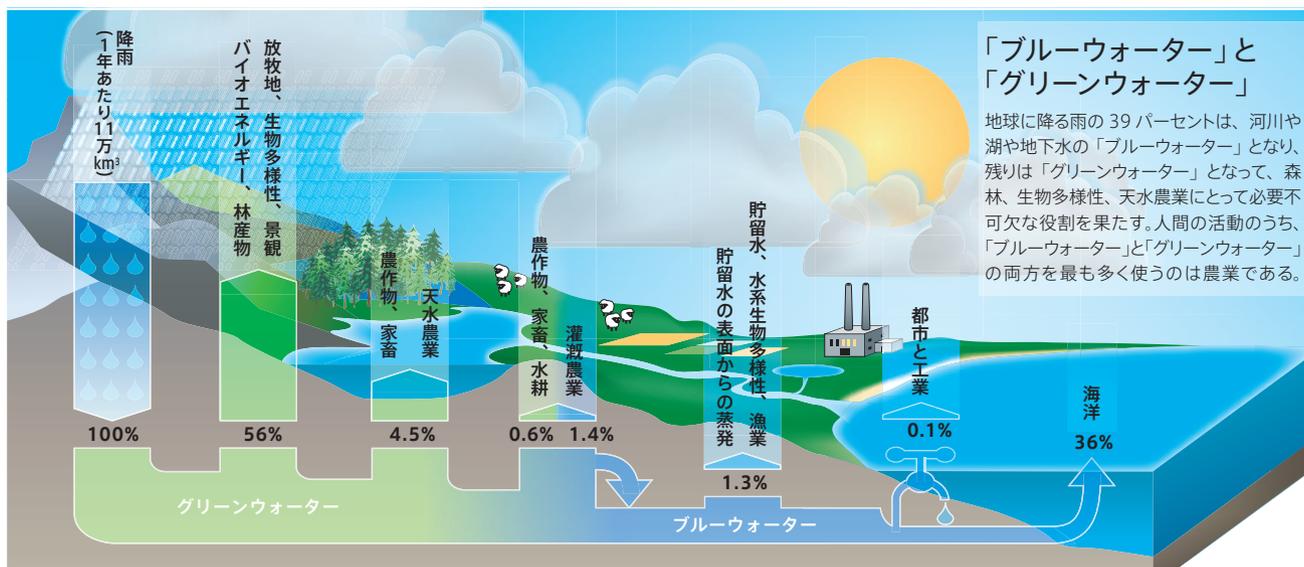
それでも、すべての乾燥気味の地域において、より極端な降雨は、作物や



タンザニアのこの灌漑システムは、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。



南アジアやアフリカ南部では気候変動によって、トウモロコシなどの作物が最も影響を受けやすい。



植生のストレスを増大させると科学者は考えている⁶。残念ながら、こうした地域は、食糧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、灌漑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パーセント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、貧しい国々の食糧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、食糧供給が不安定な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。農民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に似た農業のための国際機関である「開発のための農業科学技術国際評価（IAASTD）」の筆頭著者である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無駄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だったのです」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).

水特集についての詳細は、www.nature.com/news/specials/water/index.htmlを参照してください。