

## Poisoned waters traced to source

環境科学

# 水質汚染の原因が突き止められた

Charles F. Harvey

南アジアの井戸水は広範囲にわたってヒ素で汚染されているが、ヒ素の源については特定されていなかった。このほど、メコン川流域での調査で、汚染は池の堆積物から始まり、地下水の流れによって井戸に達することがわかった。

Nature Vol.454 (415-416) / 24 July 2008

バングラデシュと西ベンガルのガンジスデルタに住む数百万人の人々は、ヒ素で汚染された地下水を飲んでいる。さらにカンボジアとベトナムのメコン川およびホン川（紅河）、そしておそらくは、ミャンマーのイラワジ川の流域でも、多くの人々がヒ素で汚染された井戸水を飲んでいると思われる。ヒ素は天然の堆積物から地下水に溶け込んで

おり、堆積帯水層内での位置はわかりにくい。汚染のひどい水が出る井戸が、安全な井戸から10メートルしか離れていないこともあるのだ。今回、Polizzottoらは、*Nature* 2008年7月24日号の505ページで、汚染源からヒ素を追跡する初めての研究を発表している<sup>1</sup>。その論文では、メコン川に近いある場所のヒ素汚染地下水が、池に

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。

ヒ素に注意。この井戸（バングラデシュ、Jhikargachha）の上に塗られた赤い塗料は、水質汚染を警告している。しかし、ほかに水が得られる場所がないことも多い。

由来することが明らかにされた。その水は、帯水層を通過して水平方向に流れ、土壌を浸透する地下水の下で、下流の井戸を汚染させている。

ヒ素を含む水を汚染源までさかのぼる方法を理解するには、帯水層を流れる地下水による溶質輸送の物理学を考慮する必要がある。自然のままの原形を保っている典型的な帯水層を通る地下水の流路は概して水平になっており（図 1 参照）、連続的に深い層ほど遠くの水源に端を発している<sup>2</sup>。こうした流路間で水が混じり合うことはほとんどないため<sup>3</sup>、帯水層内では溶質濃度も層状となり、それぞれの深い層には、遠く離れた水源に由来する水流についての生物地球化学的な情報が記録されている。

この物理プロセスを考慮することにより、Polizzotto ら<sup>1</sup>は 2 つの重要なことを認識するに至った。1 つは、地下水の流れが基本的にメコン川と直交する地点を選択すれば、その流れに沿って並ぶさまざまな深さの井戸を含む一断面で、地下のシステムのさまざまな層に由来する水が採取され、その地点の完全な三次元的システムがマッピングできるということである。もう 1 つは、さまざまな深さの地下水の化学組成が、それぞれの水の由来を反映しているということである。こうした認識に

より、溶質が帯水層の堆積物と時間をかけて反応しながら変化するゆるやかなプロセスによってのみ地下水の組成が決まるという、ありがちな誤った考えをもたずにすんだ。一般に深い地下水ほど古いのは事実だが、低深度の地下水がまっすぐ下に向かって流れるわけではない。測定現場のさまざまな深さと地点で採取した試料のヒ素含量を分析することにより、Polizzotto らは最終的に、その地域のヒ素汚染が近くの池の堆積物に由来していると結論づけた。では、この汚染源はどう説明したらよいのだろうか。

このヒ素はもともと、ヒマラヤの堆積物が浸食されて低地に流出したものであり、一般に嫌気条件で溶解して地下水に流入すると考えられている。したがって、汚染度の高い地下水が池の堆積物から出てくるという事実は何ら不思議なことではない。熱帯の池の底では、拡散や下向きの流れによって堆積物に到達する酸素が、有機物の絶え間ない沈降と分解のためにすべて利用されてしまうのである。

池の堆積物を透過する水が有機炭素を含む場合もあり、その分解が深い帯水層堆積物からのヒ素の遊離を助長して汚染に拍車をかけている可能性もある。しかし、既に高深度帯水層堆積物に含まれている有機炭素はそれ以上補給されず、残存し

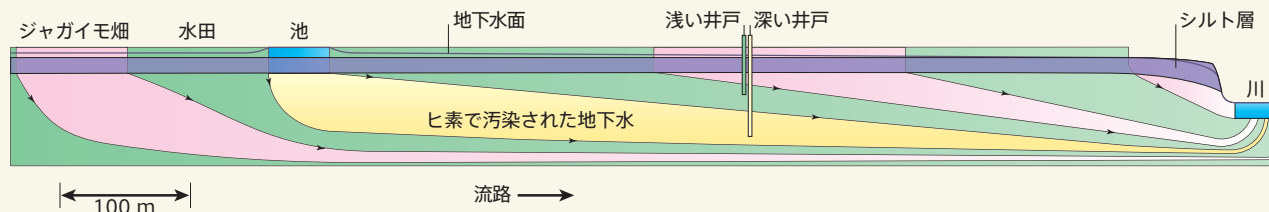


図1：南アジアの帯水層のヒ素汚染。Polizzottoら<sup>1</sup>は、メコンデルタのある場所の地下水のヒ素汚染が、帯水層の水源となっている池までさかのぼることを示した。この図は、Polizzottoらの研究に基づくシステムの断面を流れる地下水を表している。さまざまな水源（ジャガイモ畑、水田、池）に由来する地下水が、川に向かう層の中を流れている。池よりも「下流」の浅い井戸は、水田に源をもつ地下水に達している。一方、深い井戸では、池由来の汚染水が汲み上げられている。

ているものは一般に反応性が低いことから、生物地球化学的プロセスへの寄与は小さいと考えられる。Polizzottoらは炭素の年代測定を行い、観測現場の汚染水に溶解している無機炭素が新しいものであり、池の堆積物に由来すると考えればつじつまが合うとしている。

この研究結果は、南アジア全域のほかの帯水層にみられるヒ素汚染も同じプロセスによるものなのかという問題を提起している。そうだとすると、池やそのたぐいに由来する地下水の採取を避けるように井戸を掘るという対策も可能だ。この問題に答えるにはほかの場所での実地調査が必要だが、複数の観測により、ヒ素汚染に関して今回提唱されたメカニズム<sup>1</sup>が、南アジアの別の場所でも作用しているという考えが支持されている。例えば、自然の池や人工的な池はこの地域に遍在しており、それらの池の堆積物は水を常にたっぷり含んでいるため、土壌と比べて無酸素的と考えられる。というのも、稲作地ですら、土壌は年に数回は空気にさらされているからである。

もう1つの手がかりは、地下水のヒ素濃度は高深度ほど高い場合が多いということだ。これは地表水の浸透を示していると考えられる。帯水層の上部からとった井戸水は、井戸が池に掘られることはないため、ヒ素汚染の原因となる無酸素的な堆積物ではなく周囲の土壌のみを透過した地表水なのだろう。一方、深い井戸は、池やそのたぐいが水源のためにヒ素で汚染されている可能性のある地下水に達しているのであろう。

ヒ素汚染にさらされている人が最も多いガンジス

デルタでは、地理的要因と時間的要因のために地下水の流れが極めて複雑で、問題をむずかしくしている。そのうえ、この問題は人間によってさらに複雑になっている。季節的なモンスーンサイクルで変化する三次元パターンをもつ地下水が、灌漑用に汲み上げられているのだ。さらに、あちこちで池が掘られ、灌漑用の揚水も爆発的に増えているため、地下の溶質濃度は数十年の単位で変化している<sup>4</sup>。

欧米では、地下水汚染地域の調査が地下水の流れの分析から着手されることが多い。しかし南アジアの研究では、帯水層の基岩物質からのヒ素移行に関する生物地球化学が注目されてきた。この違いには一理ある。なぜなら、南アジアの水に含まれるヒ素の汚染源は、欧米のような汚染物質の流出ではなく、天然の堆積物だからだ。しかし、Polizzottoらの研究<sup>1</sup>は、堆積物に由来するヒ素の所在を地下水の流れが支配する可能性があることを明確に示している。メコンデルタよりも複雑な場所で地下水の動きを把握するには、欧米の小規模な汚染地で通常行われるような、詳しい物理水文地質学的分析が必要と考えられる。コストはかかるが、何百万人もの人々に安全できれいな飲み水を届けるというメリットの対価としては、間違いなく安いものだろう。 ■

Charles F. Harvey、マサチューセッツ工科大学（米）

1. Polizzotto, M. L., Kocar, B. D., Benner, S. G., Sampson, M. & Fendorf, S. *Nature* **454**, 505–508 (2008).
2. Freeze, R. A. & Cherry, J. A. *Groundwater* (Prentice Hall, 1979).
3. Gelhar, L. W. *Stochastic Subsurface Hydrology* (Prentice Hall, 1993).
4. Harvey, C. F. et al. *Chem. Geol.* **228**, 112–136 (2006).