

# 気候変動と世界の水資源

東京大学  
生産技術研究所教授

おき たい かん  
沖 大幹



急激な人口増加と経済発展、気候変動などにより、多くの国で水不足が発生しています。飲料水、生活用水にとどまらず、その影響は、農業、飼料、畜産などの食料問題や、工業用水、水力発電など広範囲にわたっています。今回は世界水フォーラムで「将来の水指導者14人」の1人に選ばれた、東京大学の沖大幹教授をお招きし、将来のビジネスへの影響などについて、お話を伺いました。

本稿は6月8日に行われた第225回日本貿易会ゼミナール講演要旨を事務局でとりまとめ、講師のご校閲をいただいたものです。

## 1. 世界の水危機

現在、安全な水にアクセスができない人が世界人口の約5分の1、つまり、約12億人いると言われている。毎年300~400万人が水に関連した病気で死亡しており、そのうち180万人が5歳未満の乳幼児である。世界の水資源取水量は、現在約4,000km<sup>3</sup>ほどであるが、2025年には4,300~5,200km<sup>3</sup>に増大すると推計されている。水を使っているのは人間だけではないので、過大な取水が進むと生態系にもダメージを与えることになる。水資源は季節による変動や場所による差などが大きい。日本はあまりそれに気付かないでいられるような状況なので、<sup>ひっばく</sup>逼迫感がないが、今後、地球温暖化や都市化が進展すると、洪水や渇水の被害は深刻化する懸念があり、その結果として水問題は、国際紛争の引き金にな

るのではないかと考えた人もいる。しかし、過去のデータを見るかぎり、戦争はコストが高すぎるので引き合わないというのが、水の専門家達の間では国際的な通説になっている。ただ、国家間の戦争までには至らなくても、川の上流と下流、右岸と左岸の地域で、水の奪い合いといった<sup>あつれき</sup>軋轢は現在でもあるし、将来もなくならないだろう。

## 2. 水ストレス指標

ある地域や国において水をどれだけ使えるかを水資源賦存量(Renewable Fresh Water Resources)と呼ぶ。これを人口1人当たりで換算した数値を用いて、「水ストレス」をアセスメントすることが多い。日本のように1人当たり年間1,700m<sup>3</sup>以上使える場合は、水ストレスがないと考えてよいが、1,000~500m<sup>3</sup>を切る場合は、水ストレスが高いと判断される。もう1つの指標として、海水の淡水化などから得られる水の量を差し引いて循環している再生可能資源に依

存している水資源取水量と水資源賦存量との比が用いられることもある。この比率が高いと水資源賦存量の時間的変動に対して不安定、逆に、比率が低いと安定して水資源を使えるということになる。

水資源賦存量については、当該地域を50km格子に区切り、そこで、どのくらい川に水が流れていて、どの程度使えるか、あるいは、どの程度、地下水に浸透していくかといったことについて日単位の値を推計し、これを用いて、その地域全体の水資源賦存量を推計することができる。一方、これに対し、どのくらい水を使っているかという水資源の利用量についても、各国の統計から格子単位でデータ化されている。

日本や欧州、米国などでは、1人当たりの使用量が非常に多いのは当たり前だが、中国やインドなどの国々ではまだそれほど多くない。ところが、人口密度が高いので、土地の面積当たりの使用量で見ると、先進国並みに水を使用していることが分かる。

一方、水ストレス分布で見ると、中国大陸の北部や西部、インドのガンジス河沿い、中近東、北アフリカ、米国の中西部などで高いことが分かる。日本でも、東京、名古屋、福岡などの人口集中地域では、そこで使える雨や水資源だけを考えると水ストレスが高いということになるが、普段、われわれがあまり水ストレスを感じないのは、例えば、東京の場合は、群馬県に多くの貯水池を造って、必要な水を賄っているからである。しかし、2ヵ月くらい雨が降らなければ、すぐ枯れるような量なので、向こう30年のうちには深刻な渇水が起こる可能性はある。また、中国大陸の北部も、今後、深刻な水不足になるだろう。北京五輪に間に合わせるために、乾燥地帯であるにもかかわらず、周辺地域のダムから収奪的に水を持ってきているが、北京に住んでいる人には、その危機感が全くないよう

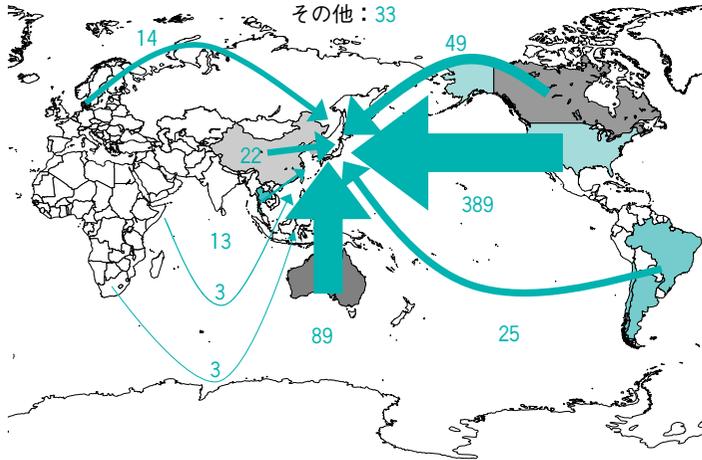
である。また、人口1人当たりの年総使用量で見ると、米国やカナダは食料を生産し、世界各地に輸出しているので、見かけ上は大量の水を使っているように見える。

### 3. バーチャルウォーターの貿易とは？

「バーチャルウォーター（仮想投入水）トレード」とは、ロンドン大学のトニー・アラン教授が1990年代の初頭に提唱した概念である。実際に農畜産品や工業製品を生産するためには、かなりの量の水が必要となるが、もし、これらの製品の輸入国（消費国）が、同量の製品を自国で生産するならどのくらいの水が必要で、その分の水を他の用途に利用可能だ、という概念である。例えば、日本が輸入しているものを日本で作るのにどれくらいの水が必要かを計算すると、小麦やトウモロコシでは、1kg生産するのに2,000kgの水が必要であり、大麦や大豆では重量当たり2,500倍、コメだと若干多くて3,600倍になる。また、畜産物では、皮や骨を除いて食べられる部分で計算すると、鶏が4,500倍、豚が6,000倍、牛が2万倍になる。飼料がたくさん必要な家畜は、水をたくさん必要とするからである。

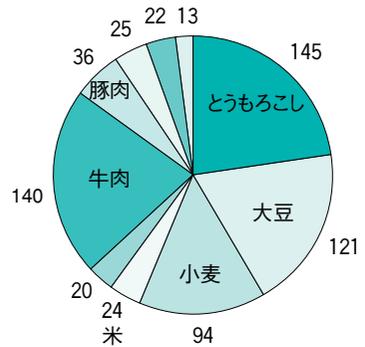
バーチャルウォータートレードにおける日本の総輸入量を計算すると、2000年時点で、640億トン<sup>かんがい</sup>の水を輸入していることとなる（図1）。日本国内の灌漑用水の使用量が570億トンなので、これはほぼ同量に匹敵する。また、日本の食料自給率は、カロリーベースで40%なので、水を半分程度海外に依存しているとみることもできる。バーチャルウォータートレードにおける日本の輸入量を国別に見ると、圧倒的に米国からが多くて400億トン、その他カナダ、豪州、中国、タイ、デンマークなどからである。このような観点から見ると、日本人が1人当たり年間に使用している水量は、合計1,250トンで、

図1 日本の仮想投入水総輸入量



総輸入量：640億 $m^3$ /年 日本国内の年間灌漑用水使用量：570億 $m^3$ /年  
(出所) 日本の単位収量、2000年度に対する食糧需給表の統計値

日本への品目別仮想投入水量 (億 $m^3$ /年)



その内訳は、飲み水が1トン、家庭用水が130トン、工業用水という形で110トン、同様に国内の農業用水という形で500トン、海外への依存が500トンという計算となる。つまり、日本の水資源問題を考えるときには、世界の水資源問題に目を向ける必要があるのではないだろうか。

#### 4. 世界のバーチャルウォータートレード

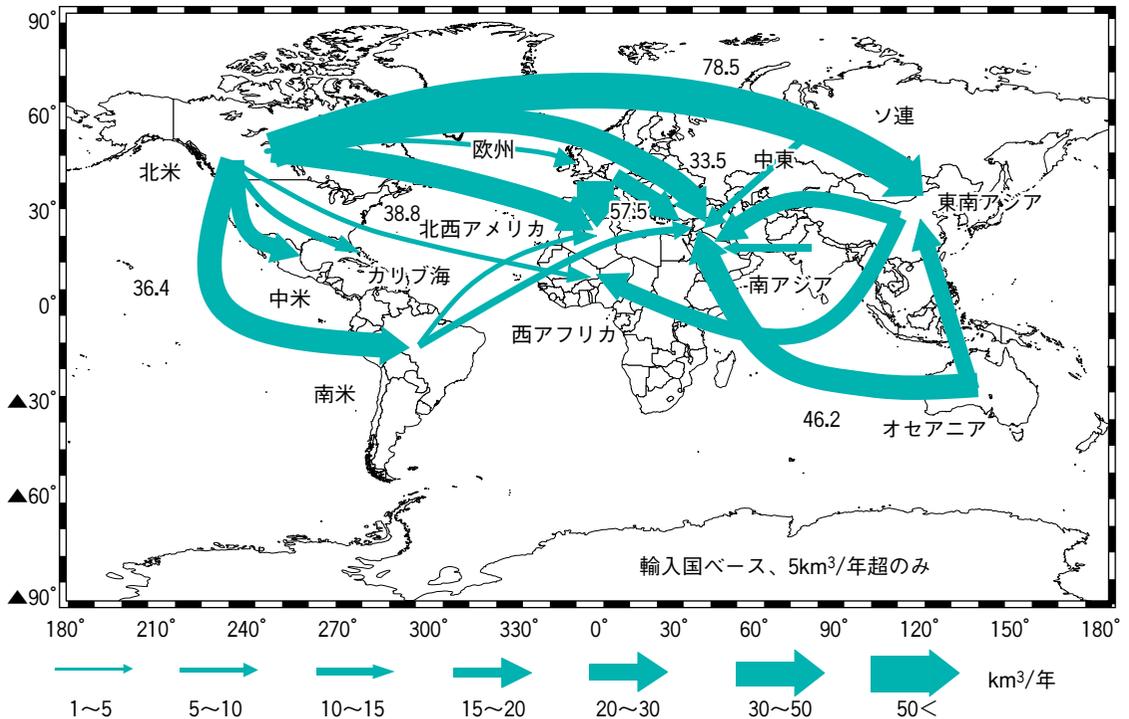
1トンの小麦を生産するのに必要な水の量は、地域や年代によって大きく異なってくる。欧州では1,000トン、日本では2,000トンでアジアとしては平均的な値で、アフリカではもっと多くの水が必要となる。これを考慮して、主要穀物について、実際に輸入国で作ったらどれくらい水が必要かを世界の百数十カ国に関して計算し、16地域間におけるバーチャルウォータートレードをまとめたものが図2である。輸出元は圧倒的に北米、続いてオセアニア、ブラジルである。行き先は、主に中近東や北アフリカである。EUからも、フランスを中心に、中近東や北アフリカに輸出されており、これは、食料の

貿易そのものと同じである。

20世紀は石油をめぐる争いの世紀であったが、21世紀は水をめぐる争いの世紀になる、あるいは、水が戦略物資になるという言い方をする人もいる。それでは、水が安いうちにたくさん買い込み、水の値段が上がったら売って商売しようとする人がいるかもしれないが、水は単価が非常に安く、農業用水で1 $m^3$ 当たり1セント、生活用水で1ドルくらい、ミネラルウォーターになって初めてその1,000倍の価格になる。水資源としての水の価格は安過ぎて、貿易をするには経済的に引き合わないのである。

ところが、バーチャルウォータートレードという概念で考えてみると、例えば、食料をストックしておき、ある地域で干ばつが起こったときに、そこに食料を送るということは、食料という形で水をストックしておき、水がたくさん必要となったときに物資を送ったのと同じことを意味し、バーチャルウォータートレードという形で水を通じて世界にガバナンスを持っているのと同じである。各国のバーチャルウォータートレードの収支を見ると、中近東が特に大量

図2 2000年における各地域間の“Virtually Required Water” 貿易（主要穀物のみ）



（出所）2000年に対する世界食料機構等の統計に基づく

に輸入しており、石油を売って、水を買っているようなものだということがよく分かる。1人当たりの水資源量が1,000トン以下しかなくても、バーチャルウォータートレードの輸入分を足すと、水ストレスが軽減される。1人当たりのGDPで国を分類してみると、豊かな国ではバーチャルウォータートレードによって、若干の水ストレスくらいで済むが、貧しい国はバーチャルウォーターも輸入できないので、貧しいままとということがはっきりと分かる。

このように、バーチャルウォータートレードという概念によって、1人当たりの水資源量について、自然条件だけではなく、交易も考え、より現実的な水アセスメントを行うことが可能になる。また、水消費プロセスの吟味や、水資源問題の一般認識の増大にも役立つ。例えば、ハンバーガー1個で1トン、牛丼1杯で2トンの水

が必要だといった数字を示せば、一番たくさんの量を使っているのは、飲料水や水道水ではなく、食べ物であるということが分かってもらいやすい。

ただし、バーチャルウォータートレードは水の量のことしか考えていないので、土地やエネルギーなど、他の生産手段の制約などによる要素は全く考えていない。日本がバーチャルウォーターあるいは食料をたくさん輸入している理由は、水の制約ではないと考えた方がよい。肉食するための家畜のエサや、放牧するための土地が足りないのである。つまり、「バーチャルランド」を輸入し、ついでに「バーチャルウォーター」も入ってきているとみるべきだろう。

各国の比較優位があるので、水効率の良いところで作って、水効率の悪いところに輸出した方が、グローバルに見ると、世界全体の水資源

は節約できることになる。しかし、バーチャルウォータートレードは水の量しか考えていないので、どこで作るべきかは、こうした水効率だけでなく、地域の生産コミュニティや環境の影響なども考慮して決めなければならないだろう。

## 5. 地球温暖化の淡水資源への影響

筆者は気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第4次報告書の第2作業部会(影響評価、脆弱性、適応策)の主要執筆を担当し、この4月にIPCCの政策決定者向けサマリーが発表された。その中で、どのようなことが述べられているかを紹介する。まず、地球温暖化による、直接的影響としては、氷河、氷床の融解に伴って、水の流量が一時的に増加するが、今世紀末までには減少する。また、雪として降るはずであったものが雨として降るので、河川流況のパターンが変化し、水温も上昇するので、水質の変化や生態系への影響が出る。一方、間接的な影響としては、地球温暖化は気候変動そのものなので、雨の降り方や、蒸発の仕方、河川への流れ方が変化する。極域と湿潤熱帯で水資源賦存量が10~40%増加する。熱帯亜熱帯乾燥域では10~30%減少する。湿潤なところでより増え、乾燥しているところでより減るのは望ましくない。干ばつを受ける地域が増大し、激しい降水の頻度が増大するので、洪水リスクが増大することになる。

将来、水の流量が増えるのは、熱帯、アジアモンスーン地帯、中国などである。インドやバングラデシュの辺りは夏に水量が増えるが、水が欲しい乾季に増えないので、あまりプラスではない。一方、水量が減るのは、米国の中西部からメキシコ、ケニア、地中海沿岸、特にスペインとフランスなどである。特に、地中海沿岸は乾燥するので、食料輸出国のフランスは、必要な灌漑施設かんがいを作らなければ、干ばつのリスク

が高まる。スペインは今でもかなり乾燥しており、水と持続可能な発展に関する万博をサラゴサで2008年に開催するなど、そのリスクは十分認識していると思われる。

アフリカは、2020年までに7,500万~2.5億人の人々が気候変動によって水ストレスが高まることとなる。アジアは、ヒマラヤ氷河の融解により、今後20~30年にわたって洪水、岩雪崩によって、水資源に影響が及ぶ。また、西アジアを除くアジアでは、大河川の渇水の危険性が上昇し、2050年までに10億人以上が渇水の危険性にさらされる。今でもまだ続いている豪州での渇水は、今後、一層温暖化が進むと、2030年までに南部、東部で水問題が深刻化する。欧州は内陸の洪水が増えたり、水資源、水力発電が減少したりする。南米は海岸付近の洪水が増大し、水資源が減少する。北米は、積雪が減り、冬の洪水が増え、夏の流量が減る。極域は特に水の問題はない。カリブ太平洋では水資源が減少する。

## 6. 21世紀における世界の水資源アセスメント

水資源の供給側については、気候変動が大きな変動要因であるが、需要側については、社会の変化による影響が大きい。世界の人口が増えると、1人当たりの水資源の使用量も増える。経済発展によって、水を贅沢ぜいたくに使い出し、飼料用穀物をたくさん必要とする肉類の消費が増えるので、水資源使用量が増加する。人口増加については、さまざまな予測シナリオがある。経済発展重視で、各地域がそれぞれ経済成長をめざすシナリオでは、出生率の低下が緩やかなので、2100年には世界人口が150億人となることが予測されているが、環境保全の動向やグローバル化の影響も考慮すると、今の推計では、むしろ、2050年あたりの90億人をピークとして、

世界人口は緩やかに減少していくとみる方が、正しいのかもしれない。

食料生産の供給については、1961年から2004年までに人口は2倍になり、農地面積は10%増えたが、収穫面積は、80年代をピークに減ってきている。ところが、対面積当たりの収量は130%増加し、トータルの穀物収穫量は2.4倍になった。結果としては、1人1日当たりの摂取カロリーは25%程度増えた。成長の限界や持続可能性について悲観的な話をするとき、必ずマルサスの「人口は等比級数的に増えるが、食料の生産は等比級数的には増えないので、いずれ食料が足りなくなると人類が破滅する」という話が出てくるが、実際には、食料生産の伸びは人口の伸びを超えている。それを支えたのは、灌漑面積が人口と同様2倍になったことや、品種改良の進展、肥料の投入、あるいは農薬の利用などである。しかし、農業用水が今後どうなるかについては、灌漑面積が増えるかどうか、水の需給を増やせるかということが重要となってくる。それには、個々の川からどの程度取水できるか、どのくらいの投資が必要かということなどの積み上げが必要であり、世界レベルでは残念ながらまだこのような推計はなされていない。

一方、工業用水について、各国の統計データから、取水量と工業セクターのGDPの相関を見てみると、線形関係にあるが、日本だけは、GDPが高い割に、工業用水取水量が圧倒的に低い。これは、工業用水の再生利用率が80%と高いためである。今のままで世界各国のGDPが上昇していくと、工業分野で水使用量が増大していくが、中国や米国も、日本のように再利用に取り組んでいけば、まだまだ水使用量を下げ余地がある。日本はそういうところでビジネスを展開しつつ世界の水問題解決に貢献していくべきであろう。

## 7. 21世紀の水ストレス

先ほど、世界人口の増加について、極端なシナリオと、そうではないシナリオもあるということ述べたが、比較的もっともらしいシナリオでも、2050年までのことを考えると、水ストレスにさらされる人口は増え続けるであろう。現在、世界の中で、安全な水にアクセスできない人口が12億人いると述べたが、2050年には、30億人くらいに増えていくことは間違いなさであろう。

ところが、今世紀の後半を考えていくと、トータルで見た水資源は、温暖化によって若干増えるだろうと予測されている。また、グローバル化が進み、価値観が共有化されてくれば、技術移転も進み、エネルギー効率や、水の使用効率も上がるので、人口増加にもかかわらず、水の使用量は、横ばいになっていく可能性がある。天気予報については、人間がどのようにがんばっても、将来の天気を変えることはできない。しかし、気候や水問題の将来予測は、人間社会の変化の影響を大きく受けるため、どのような仮定を置いたら、どのようになりそうかということを示して、今後、社会をどのようにしていくべきかを考える際の大事な判断材料としてもらうことに意義がある。

今世紀の中ごろくらいまでの変化を見ていくと、水ストレスが深刻になる地域は、今後、人口が増加していく中近東や、人口の伸びが激しい中国やインドであるが、水資源の絶対量の少ないアフリカでも、これから生活用水の需要は増大していくので、これらの地域では水資源が逼迫することが予測される。しかし、中国やインドでは、過去2,000~3,000年の間、水が必ずしも十分ではない状況にもかかわらず持続的に水を利用してきているため、施設も管理技術もそれなりにあって、水資源が足りない年でも資

源配分していく社会的なノウハウがあると考えられるが、これからそのような状況になっていくアフリカでは、混乱が生じるかもしれない。

## 8. 今後の適応策

昨年度、日本の外務省は、気候変動への適応に対するODAの指針をとりまとめたが、国際社会では人間の安全保障と持続可能な開発との連携が必要となってくるので、気候変動対策のODAをそれだけ別枠で実施するのは得策ではない。貧困削減や農業開発、個別の地域的、社会的状況を考慮して、その枠内で気候変動対策も実施するという方策が望ましい。わが国に期待される役割は、発展途上国に対して、どのようなリスクを背負っているかということから認知させ、その適応策の立案を支援することも大事である。

もう1つ、気候変動への適応策の出発点として大事なことは、現在の課題への対応である。現在の脆弱性<sup>ぜいじやく</sup>に対応するというのが、将来の気候変動に対する備えとなる。

## 9. 地球温暖化はなぜ問題か

地球史的に見ると、地球温暖化、CO<sub>2</sub>濃度、気温の上昇は、前例がある。また、温暖化が悪いのならそれでは寒冷化の方が良いかと言うと、寒冷化は作物が採れなくなるなど、もっと悪い影響が考えられる。つまり、温度が上昇することが悪いというよりは、現状の気候に適応している社会に変革が迫られるから温暖化は問題なのである。気候が変われば社会が変わらなければならない、気候変化のスピードに社会の適応が追いつかないと問題が生じるというのが温暖化問題の本質であろう。

途上国では今すでに問題が生じており、それを解決していきたいと思っている。しかし、日本も含めて先進国の多くの人達は、現状の生活

に満足しているので、不便になりたくない、このままの生活を続けたいとして国際的な枠組みの変化も嫌う。ところが、途上国は、これから生活も、国際社会での地位も高めていきたいと思っていて、彼等にとっては温暖化というのは、これから起こるであろうさまざまな変化の中の一つにすぎず、目の前のリスクに比べると、将来のリスクについては、まだまだ関心が薄いという実態がある。このあたりの意識の差というものを考えないと、中国やインドが、なぜあそこまで温暖化対策に乗ってこないのかということが理解できないと思う。

もう1つの論点は、CO<sub>2</sub>排出量を1人当たりで考えるのか、国全体で考えるのかということである。米国は1人当たり20トンのCO<sub>2</sub>を排出していて世界1位である。中国は総量で見ると世界2位の排出国だが、1人当たり直すと3.7トンで、米国の5分の1以下である。インドの排出量は5番目で日本と同じ程度だが、1人当たり直すと1.1トンと日本の10分の1である。われわれは排出量を国全体で考え、現状からの変化で議論するが、例えば朝鮮戦争の時代、日本の景気が復興しようとしている時に、経済発展は環境に負の影響を与えるので、日本はこれ以上、成長してはいけないと言われていたら、多分皆かなり怒っていたであろう。それと同じことを今、中国、インドが感じているのではないかと思う。

## 10. 水関連施策の動向について

2006年3月にメキシコで第4回の水フォーラムが開催されたのに合わせ、WASABI (Water and Sanitation Broad Partnership Initiative 「水と衛生に関する拡大パートナーシップ・イニシアティブ」) が日本の外務省より発信された。日本は、水と衛生分野については、90年代から継続的に世界のトップドナーの地位を維持

しており、全体の4割を拠出している。

また、UNDP（国連開発計画）の年次報告「人間開発報告書2006年度版」でも、「水危機神話を超えて」として、水資源をめぐる権力闘争と貧困、グローバルな課題をテーマにしており、分配とガバナンスの問題が重要だといったことが極めて落ち着いた口調で書かれている。

さらに、将来に目を向けると、来年夏にスペインのサラゴサ市で開催される国際博覧会では「水と持続可能な開発」がテーマとなっている。また、アジア太平洋水サミットが今年12月に別府市で開催される。12月に首脳級の会合を行い、水に関する国際的認知度を上げようとしている。そして、来年、日本で開催されるG8サミットでも水の問題を取り上げ、第5回世界水フォーラムにつなげていくといったことが、今後の主要なイベントである。

また、6月1日に閣議決定された安倍政権の公約の一つである「イノベーション25」においても、「環境・エネルギー、水等の分野」におけるわが国が誇る技術を世界へ普及させていくと記述されており、水高度循環社会の実現のために、水処理技術や逆浸透膜、節水農業技術、シミュレーション技術の高度化など、わが国の優れた技術を普及させていくといったことが盛り込まれている。

## 11. 持続可能な社会のために

持続可能な社会を作ることは大事だが、私は水が専門なので、今日は水の話ばかりしたが、水と食料とエネルギーが相互的に考えられるようになりつつある点が大事である。例えば、水を灌漑かんがいすることによって食料ができるが、逆に、

食料があるということはバーチャルウォータートレードで水不足を軽減できる。また、水力発電によってエネルギーができるが、エネルギーと海水さえあれば淡水はいくらでもできる。あるいは、食料になり得る植物からバイオ燃料を採ることが今はやっている。忘れられがちだが、食料生産には大量のエネルギーが使われているので、エネルギーの安全保障なしには食料の安全保障はあり得ないといったことを三位一体で考えるべきであろう。

## 12. まとめ

21世紀における水需給を展望すると、温暖化によって水が逼迫ひっぼくするのは地中海沿岸欧州と米国西部である。また、社会経済変化によって水が逼迫ひっぼくするのは、中近東、西アジア、南アジアである。将来、混乱が懸念されるのは、サハラ以南のアフリカ、中南米であろう。

水問題については国際的な支援が期待されており、わが国としては、食料安全保障の観点、世界各国から広く支援を得るための国際戦略、そして純粋に地球環境倫理的な観点などから、国際的に取り組んでいく必要があると考えている。

中国に「飲水思源」という言葉があるが、「水を飲むときには、その源に思いをはせる」、つまり、世話になった人のことは忘れるなどという意味だそう。本日バーチャルウォータートレードの話で食料を作るために必要な大量の水の話をしたので、皆様も、飲食する時には世界の水のことについても少し考えていただければ幸いです。

JF  
TC