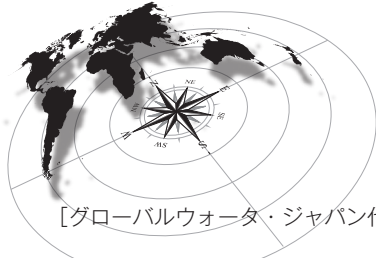




グローバル・ウォーター・ナビ ■■■■■■■■■■ 81

地球温暖化と深層大循環 ～下水処理水は宝の山～



[グローバルウォーター・ジャパン代表 国連環境アドバイザー]

吉村 和就



地球温暖化が進むと、現在の地球の天候が大きく変化すると予測されている。例えば緯度の低い地中海沿岸、中近東、アフリカ南部、アメリカの中西部では、降水量が減り、年間の河川流量も減ると予測されている。逆に緯度の高いロシアやカナダでは河川流量が増える予測も出ている。当然のことながら、雨の強度や大雨の頻度も増し、「洪水のリスク」の増大、逆に水が足りない「干ばつのリスク」も増えるなど、いずれも「温暖化の影響で水資源の偏在が顕著になり地域の不安定さが増すことになる」と、「国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」が第5次評価報告書で明らかにしている。

特に、この評価報告書の中で海洋学者が注目しているのが「深層大循環」の記述である。深層大循環とは水温と塩分濃度の違いから「熱塩大循環」とも呼ばれ、南極や北極付近で起こる強大な温度差を持つ水の輪による熱移動である。報告書では「大西洋の深層大循環の顕著な変化傾向を示す観測上の証拠はないが、3000mから海底まで温暖化した可能性が極めて高い」と指摘している。深層大循環は熱や水蒸気の移動を伴うため、地球規模での気温や降水量の分布に大

きな影響を及ぼし、熱帯性低気圧やハリケーンなどが定常的に発生する要因にもなっている。

1. 地球上で最高齢の流体は深層大循環

地球上で短期的な水資源の変化を考える「水文大循環サイクル」によると、地球に降り注ぐすべての太陽エネルギー17万7000TW（テラワット）のうち、4万1000TW（全体の1/4）のエネルギーが地球上の水や空気を動かし、いわゆる気候・気象の駆動源となっている。

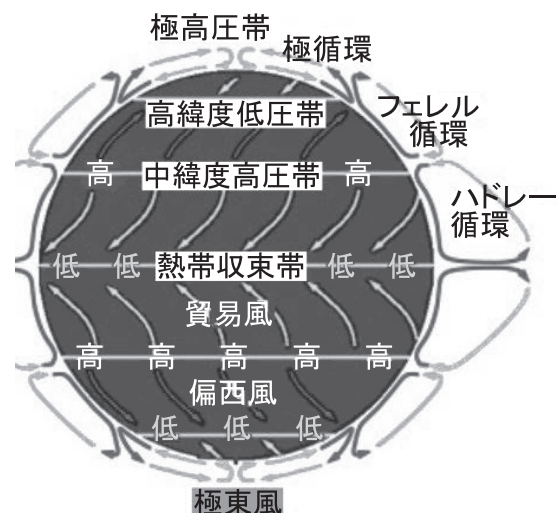
1) ハドレー循環

深層大循環の代表的な考え方は「ハドレー循環」である。18世紀に英国人の気象学者ジョージ・ハドレーが提唱した説で、「赤道付近で温められて上昇した空気は、上空を北と南に分かれて進み、北極と南極で冷やされて下降し、再び赤道付近に戻ってくる」というものである。

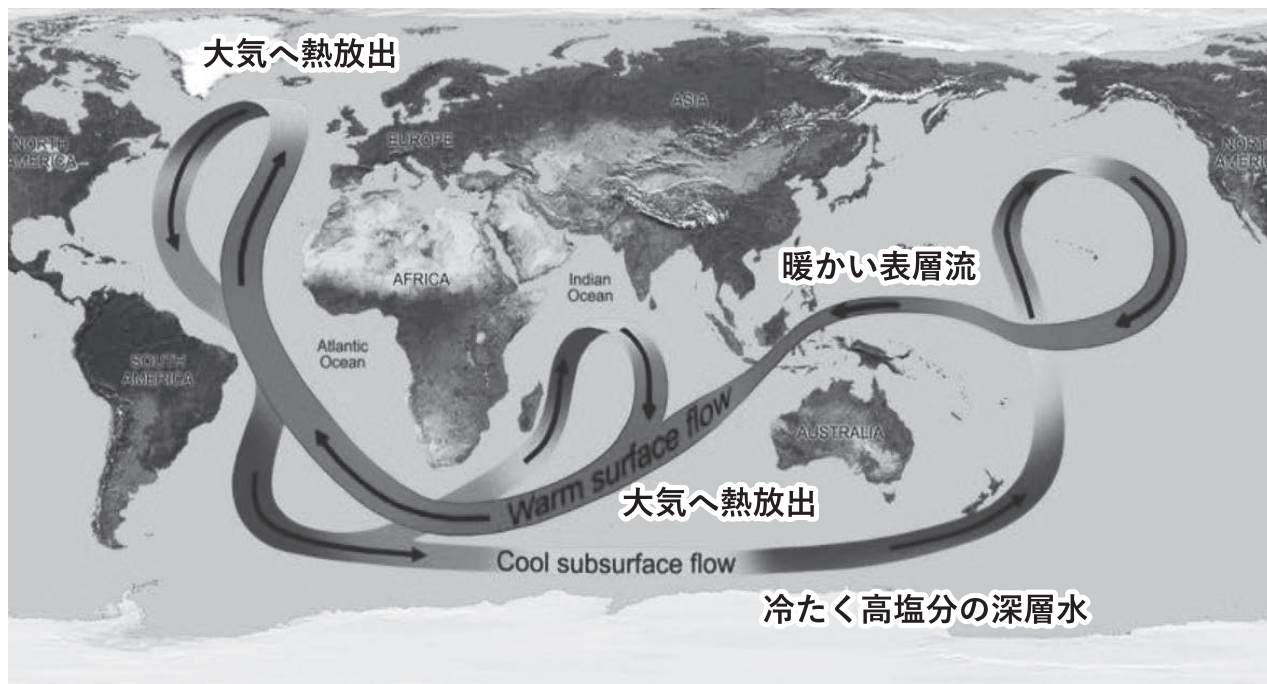
水資源移動の観点からハドレー循環を考えると、赤道付近で温められた空気は水蒸気をたっぷり含んだまま対流圏を上昇、成層圏近くまで達した気団は熱放射し、冷却された水蒸気は水や雪、最後は雨となって地球上に降り注ぐ。近年の研究により空気の流れを詳細観測すると、水蒸気をたっぷり含んだ空気は、緯度30度付近で下降しているが、その後の循環説（中緯度のフェレル循環モデル、高緯度の極循環モデル）の機構は、すべてハドレー循環説と合致している。注目すべきは、地球上の大気循環の各モデルに含まれる水蒸気中の淡水の滞留時間である。水蒸気が冷却され淡水となって地球に降り注ぐまでは、平均して10日間の滞留時間であり、いわば「高速水循環」である。まさに我々が日常的に目にする地表面付近での水循環である。

2) 深層大循環

それに比べ深層大循環は「熱塩大循環」と呼ばれ1000年以上のサイクルを持つ大きな水の輪の移動である。この大循環を引き起こす



▲地球の大気循環モデル（出所：ウィキペディア）



▲深層大循環の流れ（出所：NASA/JPL、和文加筆：筆者）

エンジンは、海水の重さである。南極や北極付近の表層海水が大気で強く冷やされるために重くなり沈んでいき、それまで深層にあった海水を押し上げて全世界の海洋の深層を巡り、最後は表層水と混じり合いながら上昇し暖かい表層水になる。問題は、その循環する時間である。海洋学者により様々な意見があるが、おおよそ深層水の平均年齢は1000歳で、深層海流が沈降してから浮上するまで1500～2000年の時間がかかるともされている。この深層大循環が地球温暖化に大きな影響を及ぼしている可能性は多くの学者から指摘されているが、あまりにもスケールが大きい課題（移動機構とタイムラグ）なので、研究が進んでいない。ぜひ流体を研究している若い人たちに解明をお願いしたい項目である。

2. 深層大循環が狂い始めると、どんな影響が出るのか

深層大循環は、海流の循環による熱移動であり、過去1000年以上にわたり気候変動の幅を、時間的にまた空間的に穏やかにし、人間が居住できる気候を造ってきた。人々は、その恩恵を受けて生命を繋いできた。仮に、この熱移動がなくなり、または移動速度が極端に遅くなれば、低緯度地域は現在よりはるかに高温気象に、高緯度地域は現在よりはるかに低温気象になることが予想されている。当然のことながら世界各国は気候変動対策として長期的な水資源確保に乗り出している。

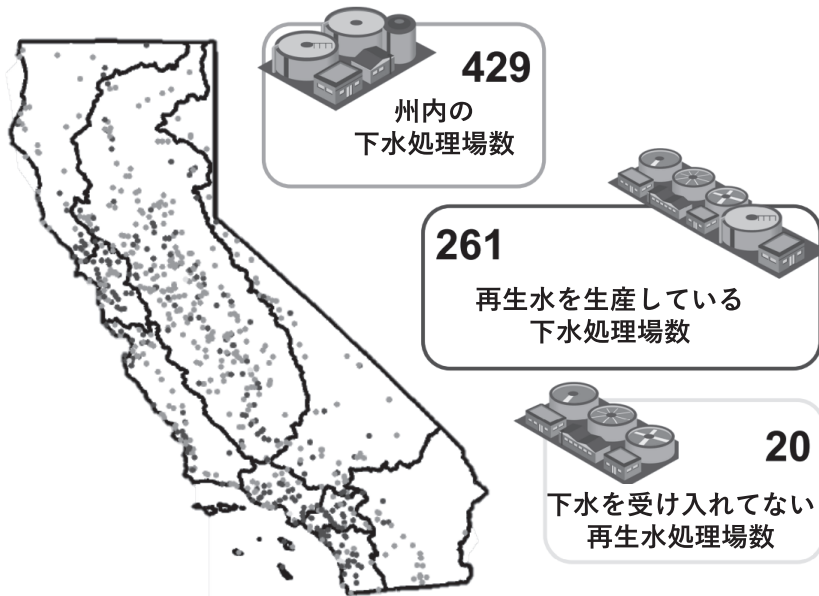
1) 日本の水資源の現状

国土交通省発行の「令和3年度日本の水資源の現況」によると過去30年間の年間降水量の平均値は世界平均の約2倍の6500億 m^3 /年で、蒸発散で2300億 m^3 失われ、国土に賦存する水資源総量は4200億 m^3 である。しかし約8割の水資源は川を下り海へ直行で、日本国

民の水資源年間使用総量は870億 m^3 （平成15年度、水資源賦存量の約20%）である。その内訳、最大需要先は農業用水で572億 m^3 （年間水使用量の66%）、工業用水134億 m^3 （同15%）、我々の生活用水は164億 m^3 （同19%）である。

2) 日本の長期的な水資源確保は

国連食糧農業機関（FAO）の公式データによると、国民一人当たりの世界平均水資源量7300 m^3 /人・年と比較すると、我が国は3400 m^3 /人・年と2分の1以下であり、首都圏だけで見ると、水不足が定常化している北アフリカや中東諸国と同程度である。またダムの保有水量を比較すると、日本国内ダムの総貯水量は約204億 m^3 で、これは米国のフーバーダム（約400億 m^3 ）の半分である。また国民一人当たりのダム総貯水量を米国（3384 m^3 /人・年）と比較すると日本は73 m^3 /人・年と米国の2%しか保有していない。中国



▲米国カリフォルニア州 再生水工場の現状（出所：California Water Boards "Volumetric Annual Report" June 11, 2021、和文加筆：筆者）

(392m³/人・年)と比べても19%以下であり、将来の水飢饉に対し、貯水量の備えが足りない極めて危険な状態である。しかし今更ダムの新設は難しく、既存ダムのかさ上げや、堆砂処理で保有水量を増すことくらいしかできない。それに対し、日本には下水処理水（年間154億m³）という宝物がある。平成17年に「下水処理水の再利用水質基準等マニュアル」が制定されたが、平成28年度で、わずか2億m³（総下水処理水の1.3%）しか活用されていない。（JS技術開発情報メールNo.226）今後は下水再利用水による温暖化対策（CO₂削減効果を定量化）とし、農業用水や地下水涵養、工業用水、修景用水等への積極的な市場開拓が求められている。

3) 米国カリフォルニア州の水資源確保への挑戦

米国経済を支える最大の州であるカリフォルニア。面積は日本より9%広く、人口は約4000万人、

州内総生産（GSP）は2兆7400億ドル（2017年実績）であり、加州を一つの国と仮定して他国と比較した場合、イギリスやインドより大きい経済規模を有している。その加州の経済を底辺で支えているのが、水資源である。近年、水不足に悩まされている加州は、水資源の確保が経済の生命線である。表流水の主役のコロラド川からの水利権問題の解決が長引く中、新たな水源確保の手段として、下水処理水の活用が待ったなしの状態に直面している。

(1) 水管理規範「タイトル22」

加州の水管理の規範「タイトル22」（2019年ガイドライン発効）は、特に消毒された下水二次処理水で使用可能な24の特定用途や三次再生水使用で許可される40の特定用途が定められている。農産物や果物への灌漑、住宅造園の灌漑、商業用ランドリー、装飾的な噴水用途、商業ビルのトイレ用水などで、州の水委員会は申請されたプ

ロジェクトの管理や提出されたエンジニアリングレポートをレビューし指導・承認を行っている。

州内には429の下水処理場が存在し、そのうち261カ所の下水処理場で再生水を生産している。2021年時点で再生水を年間約728万エーカー・フット（89億7624m³）生産しており、さらに再生水管理の一環として2030年までに年間再生水生産を200万エーカー・フット（24億6600万m³）かさ上げ増加させる目標を掲げている。短期的な再生水プロジェクトには8億ドル（約920億円）が用意され、長期的には30億ドル（約3450億円）の資金提供を準備している。さらに興味あるのは下水処理水中の栄養分の活用である。

(2) 海藻で温暖化防止……下水処理水の栄養分活用

「海藻は気候変動を緩和する希望の象徴である」として8つの州内の企業が、州の海域に海藻農場を計画している。海藻は炭素を吸収し、その生産物は食品、燃料、肥料として活用できる。海藻が成長するには、海水と日光と栄養源（下水処理水中の栄養源）しか必要としない。「青い経済と呼ばれる持続可能な海藻資源」を活用するために、海藻農場計画を州議会へ申請する準備を進めている（サンフランシスコ・クロニクル紙）。

さいごに

日本は四季に恵まれ、今のところ、短期的な水循環がうまくまわっているが、長期的な展望として「持続可能な水資源として下水処理水の活用」を、さらに推進すべきである。下水処理水は宝の山である。