

第4回 9月8日(火)

水資源は自然の恵み

講師：大学院地球環境科学研究所・特任助教・佐藤友徳

1. 地球の気候と水

水は地球環境あるいは気候システムに含まれる様々な過程において極めて重要な役割を果たしていることから、気候システムの潤滑油と比喻されることがあります。われわれが日々の生活で直接関わる自然界の水といえば、雨や雪、川、海、井戸水といったところでしょうか。それ以外にも生活を支えている水として、水道水、水力発電、農業用水を用いて収穫された農作物など、様々な場面で間接的に水の恩恵を受けていることになります。地球の気候においても水は非常に重要な役割を果たしています。海から蒸発した水蒸気が陸地で雨や雪として降り、その水が河川を經由してまた海に戻る、という水の循環を誰もが習った記憶があるでしょう。平均的な水の存在量をもう少し詳しくみると、地球上の水の約 **99%**は海（液相）として存在しており、それ以外の水は多い順から氷河や雪などの雪氷（固相）、地下水（液相）、湖沼や河川(液相)、大気中の水蒸気(気相)などがあります。地球上では、水は固体・液体・気体の **3** 相で存在していますが、先に述べた海→水蒸気→雨・雪→川という一つの循環系でもこの **3** 相がめまぐるしく変化した結果といえます。

地球温暖化などの気候変動においても、この水の循環系に変化が生じるといわれています。分かりやすい例を挙げれば、高緯度や山岳の氷河の減少は、**3** 相のバランスの変化ととらえることもできるかもしれません。また、雨の降り方や台風の強度や数の変化は、水の循環速度の変化という見方もできるでしょう。さて、われわれに最もなじみ深い水である降水は地理的にどのように分布しているのでしょうか？ 図 1 は平均年降水量の図です。まず目に付くのが赤道付近で、多いところでは年間 **3000 mm** 以上の降水があります。亜熱帯（緯度約 **20 度～30 度**）に目を移すと、赤道付近とは対照的に降水量が非常に少ない地域があります。ここは亜熱帯高圧帯とよばれる安定した高気圧に覆われた地域で、サハラ砂漠や中東の砂漠、チリやオーストラリアの砂漠もこれに該当します。日本の位置する中緯度帯は、亜熱帯高圧帯に比べると緯度は高いですが、降水量が多いことが分かります。これは、日々の天気図に現れる移動性低気圧のほか、梅雨前線など季節と関係した特徴的な降水システムによるものです。世界の植生分布と図 1 を比較すると、地球上の植生が降水量によってかなり規定されていることが分かります。逆に、現在の地球の気候を説明するうえでも、植生の存在は極めて重要です。植生は二酸化炭素の吸収源として近年注目されていますが、ここでは、水循環の観点から見

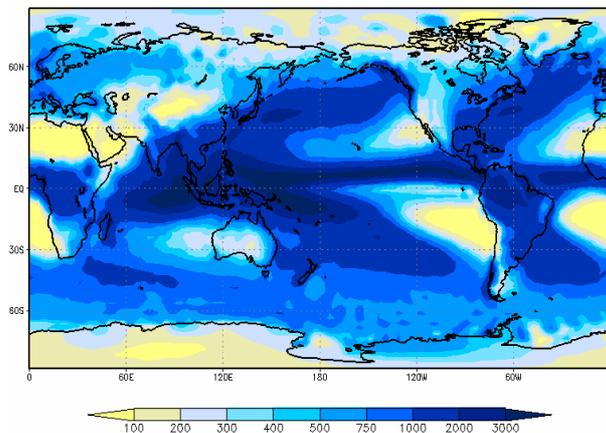


図 1：世界の平均年降水量（単位は mm）。

てみましょう。植生は蒸散や様々な過程により、地球の表層付近の水を大気に放出します。陸上植生がなく大陸が乾燥している仮想的な地球では、中緯度の降水量が大きく減少するという報告もあります。

2. 地球温暖化のメカニズムと水

自然は様々な構成要因（大気、海洋、動植物、土壌、人など）が相互に連鎖した状態で成り立っていると考えることができます。さらにそれぞれの結びつきにおいては、フィードバックと呼ばれる仕組みがあります。正のフィードバックはAという事象にある変化が起こったときに、連鎖的にBという別の変化が起こり、それによってさらにAの変化を加速するというものです。負のフィードバックはその逆で、Bの変化が起こることにより、Aの変化を抑制するという系を指します。ここでは、水の各相と関係するフィードバックについて地球温暖化を例に考えてみましょう。

温暖化により気温が上昇すると氷河が融解し面積が減少します。もともと氷河は色が白いため、太陽光の多くを反射していますが、氷河が融解すると色の濃い海面や陸面が現れるため、太陽光をよく吸収するようになります。これにより、表面温度や気温の上昇が加速する、という説明を多くの方がご存知でしょう。これは **Ice-albedo** フィードバックと呼ばれる正のフィードバック過程です。世界の気温変化傾向の図で、高緯度ほど強い昇温が見られるのはこのためです。次に大気と陸の間の過程を紹介します。温室効果ガスの増加により、地球表面で受け取る放射のエネルギーが増加します。その結果、地表面温度は上昇しようとしませんが、植生があるか無いかによってその応答は異なります。植生がある（あるいは土壌がよく湿っている）場合には、陸面で受け取ったエネルギーの一部が水の蒸発に使用されるため、温度の上昇が抑制されることとなります。従って、植生は気温上昇を抑制する効果があると考えられます。温暖化による気温上昇が乾燥地域ほど顕著に見られる理由の一つはこのメカニズムによるもので、一般的に乾燥地域では温暖化によりさらに乾燥が強まる傾向にあります（ただし、ほかの理由により例外的な地域もあります）。最後に気相としての水の役割を考えましょう。温室効果ガスとして二酸化炭素が注目されていますが、水蒸気は二酸化炭素よりも強い温室効果を持つことをご存知でしょうか。つまり、地球温暖化によってもし大気中の水蒸気量が増えれば、さらに温暖化を強めることとなります。それでは水蒸気と二酸化炭素の違いは何でしょうか？水蒸気量は空間的・時間的に非常に複雑に変化しています。また上で説明したように、水蒸気の時空間変動は蒸発・蒸散の変化あるいは大気循環の変化などほぼ自然界のバランスで決まります。二酸化炭素の濃度も自然のメカニズムによって変化しますが、過去や将来にわたる時

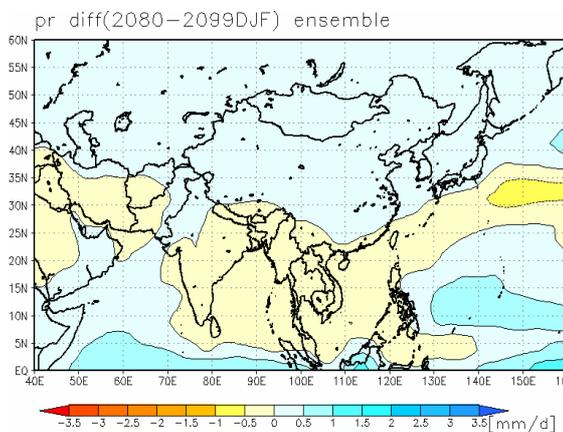


図2：地球温暖化による冬季降水量の変化。21世紀末ころに現在に対して降水量の増加が予測される地域を水色で、減少を黄色で表す。

間スケールでは、人間の活動によって濃度が大きく変化します。これが水蒸気との大きな違いです。地球温暖化の予測に用いられている気候モデルではもちろん水蒸気の温室効果も考慮されています。ほかにも水に関係するフィードバックは存在しますが、紙面の都合で割愛します。

3. 気候変動と地域の水循環

3.1 北海道の降雪

さて地球規模の水に関する話題はこれくらいにして、ここから先は我々の住む北海道と水について考えてみたいと思います。ご存知の通り、北海道では冬季の積雪が代表的な水資源の例であり、貴重な観光資源としても恩恵を受けています。寒冷な北海道でも地球温暖化に伴って気温の上昇が予測されていますが、気象庁の報告によると気温上昇は国内の他地域に比べて北海道では大きくなっています(気象庁, 2008)。一方、降雪量はどのように変化するのでしょうか? 始めに言葉の説明をしておきます。降水量とは降雨と降雪、降雪など空から降ってくる水物質の和です。直感的には、気温の上昇により降雪量は減少すると思われる。ただし、地球温暖化は気温の変化だけではなく、降水量の変化ももたらします。気象庁や IPCC の報告では、北海道や同じ緯度帯の冬季の降水量は増加する可能性が示されています。降水量が増えるということは何を意味しているのでしょうか? 昇温の程度にもよりますが、標高の高く寒冷な山岳地では、雪として降る降雪が増える可能性があることを指します。一方、低地では最寒期には降雪が増えますが、秋や春ではこれまで雪として降っていた降水が相対的に減少し、雨が増える可能性を意味します。しかし、これは寒冷な北海道のみの特徴で、本州の積雪地域の多くは、気温の上昇によりこれまで雪として降っていた降水が雨として降るようになり、雪としての水資源量は今後減少することが見込まれています。ただし、このような狭い地域の将来予測にはまだ不確実な部分もあるため、現在さまざまな研究が行われています。

3.2 モンゴルにおける気候変動と人間活動による水循環の変化

次にユーラシア大陸の内陸国であるモンゴルについての水循環について話を移しましょう。この国では生活に使用する水の多くを地下水に依存しています。しかし地下水は、観測するのが困難なうえ、地域ごとに地下水の量や循環の仕組みが異なるため、十分な情報があるとは言い難いでしょう。モンゴルでも一体どれくらいの地下水が存在しているのか、どうやって地下水へ水が供給されているのかは未解明な点が多いと考えられています。

ここでは大気の水循環に関する数値実験の一例を紹介します(Sato ほか, 2007)。図3はモンゴル東部に到達する水蒸気や雨がどこからやってきたのかを気候モデルによって計算した結果です。図中に示している色は水蒸気が最後に蒸発した場所を表しています。モンゴルに存在する水蒸気や雨のうち、モンゴルのごく周辺で蒸発した水は全体のおよそ3割程度です。それ以外の水蒸気はシベリア、中央アジア、あるいはさらに北西の地域で蒸発した水です。モンゴルでは海からの距離が遠いため水が届きにくい印象がありますが、

ユーラシア大陸上で何度か蒸発と降水を繰り返しながら偏西風帯の西風によって運ばれる水蒸気がモンゴルに到達すると考えられます。

さて、ご存知かもしれませんが、モンゴルでは古くから放牧が営まれてきました。家畜は草を食べて成長し、乳製品や食肉、毛製品など遊牧民にとって貴重な収入源であり生活に必要な資源です。近年では、草の食べ尽しや踏付けなどにより、草原の劣化が問題視されています。気候シミュレーションによってこの草原の劣化がモンゴルの気候に与える影響を評価することができます。図4は草原が砂漠化した場合の夏の降水量の変化の予測結果です。一部の地域では砂漠化したのに降水量

が増加する傾向を示しており不思議に思うかもしれませんが、上で述べたように多くの水蒸気がモンゴル以外の場所から運ばれてくるため、必ずしも降水が減少するとは限らないのです。ただし、他の研究では全域で降水量が減少すると述べている研究があるということも併せて述べておきます。ところで、仮に降水量が増えたとしてももう一つ大きな問題があります。図4で示したのは平均的な降水量の変化です。仮に降水が増えるとしても、豪雨として一度に降ってしまえば水資源として利用しにくいばかりか、災害にもつながります。従って、平均値の変化だけでなく、時間変化の特徴の変化にも注意する必要があります。これが水資源評価の難しさでもあるといえるでしょう。

参考文献

- ・ 気象庁, 2008: 地球温暖化予測情報. 第7巻.
- ・ Sato, T. ほか, 2007: Water sources in semi-arid Northeast Asia as revealed by field observations and isotope transport model. *J. Geophys. Res.*, **112**, D17112, doi:10.1029/2006JD008321.

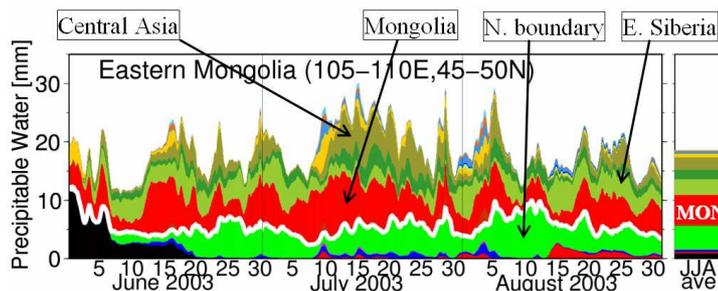


図3：モンゴル東部における水蒸気・降水起源の時間変化。各色は水蒸気が最後に蒸発した場所を表し、面積は全体に対する割合を表す。例えば赤色はモンゴルで蒸発した水、黄土色は中央アジアで蒸発した水が総水蒸気量に対して占める割合を表す。

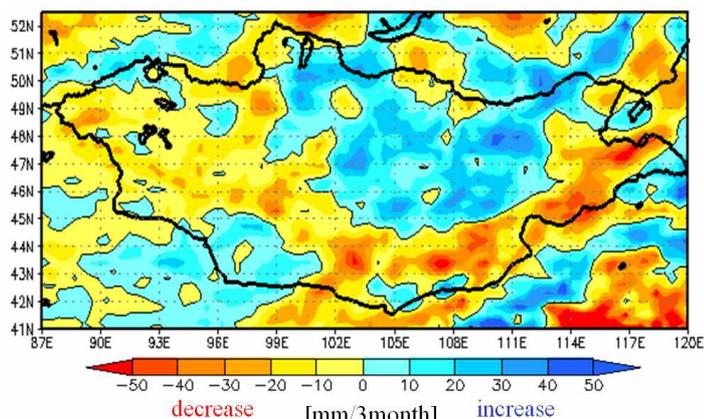


図4：草原が砂漠になった場合の夏の降水量の変化予測の結果。青色は降水量が増加する場所、赤い場所は降水量が減少する場所。