

地球規模の水循環における人間の役割と気候変動への影響

投稿日: 2024年8月4日 投稿者: curryja コメント: 203

ブルース・ピーチーと前田信夫

最新の気候モデルでは、温暖化に対する正のフィードバックとして水蒸気の影響のみが考慮されており、人間による水蒸気の直接排出の影響は真剣に考慮されていません。

背景

近年の気候変動とますます不足する淡水資源は、人類が直面する 2 つの大きな環境問題である。水蒸気は最も豊富な温室効果ガスである。現代の気候モデルでは、温暖化に対する水蒸気の影響は正のフィードバックとしてのみ考慮されており、人為的な水蒸気排出による直接的な影響は真剣に考慮されていない。

私たちの最近の論文では、NCEP/NCAR 再解析データセットを使用して、クラウジウス・クラペイロンの式が、現代の気候モデルで一般的に想定されているような正のフィードバックの基礎となり得るかどうかを検証しました[1]。その結果、以下のことが判明しました。

(1) 定性的にみると、クラウジウス＝クラペイロンの式の対数線形性 ($\ln P_v$ 対 $1/T$) は、地球上の特定の緯度帯のような広大な地域で平均化すると、かなりの整合性を示す。(2) この整合性は、 $\ln P_v$ 対 $1/T$ のプロットが非線形になる個々の場所には当てはまらず、時間とともに変化する大幅な過飽和を示す。(3) (3) 定量的に、局所的に観測された $\ln P_v$ 対 $1/T$ の傾きの値と期待値との間に大きな相違があること、(4) 1960年から2020年の間に、北半球の人口密集地や農業地域では水蒸気の絶対量が大幅に増加したが、海洋の表面積がはるかに大きい南半球では増加していないこと、である。これらの調査結果は、水蒸気の直接的な人為的排出が、その地域の水蒸気含有量に影響を与える重要な要因であることを示唆しています。

私たちの論文では、正の水蒸気フィードバックを計算する基礎としてクラウジウス・クラペイロンの式を使用することは、根拠が揺らいでいるように見えると結論づけました[1]。 $\ln P_v$ vs $1/T$ の傾きの観測値と予測値の間に大きな相違があるため [1]、一般的に想定されているように、大気中の水蒸気量が 1°C の温暖化ごとに本当に 6~7%も増加するのかどうかは依然として不明である。

本稿では、以下の点に焦点を当てる。(1) 地球規模の水循環における人間の役割と気候変動への影響、(2) 「地球規模」の温暖化の多くの側面が地域的な性質を持つこと、(3) 今後の

研究努力は、関連データの収集に緊急に取り組むべきであるという提案。

水循環

人間の活動は確かに気候に影響を与えているが、その主な要因のほとんどは、二酸化炭素とは対照的に、水に関連している[2-6]。北半球の大気中の水蒸気は、10年あたり数パーセントの割合で増加している。一方、南半球ではほとんど変化が見られない。水とは異なり、二酸化炭素は単一の相であり、大気中ではほぼ均一に分布している。したがって、現在の気候変動の原因がCO₂であり、非水温室効果ガスによる温暖化1°Cにつき約6~7%増加すると考えられている水蒸気の供給源が海洋であるとすれば、海洋面積がはるかに大きい南半球では、北半球よりも大きな影響が現れているはずだ。それどころか、北半球の陸地では、過去100年間に平均して年間約2Ttに相当する2%の降水量の増加が観測されているが、南半球の陸地ではそのような増加は観測されていない[7]。北半球の陸地における降水量の増加は、過去50年間に、やはり北半球では2~4%の割合で、南半球では増加していない豪雨の頻度を伴っている。

水は、主に北半球において、少なくとも年間3~4兆トン（貯水池の蒸発などの一部の水源を除く）という増加率で人間によって消費されています。この水消費量の増加は、灌漑や工業が盛んな地域の河川から海洋への淡水の還流量の減少を伴っており、この減少も主に北半球で発生しています。IPCCが特定したその他の主な要因は、水の排出と土地利用である。水循環の大幅な変化を地球規模の気候モデルに包括的に統合すべきという声は、新しいものではないが[8, 9]、限定的な支持しか得られておらず、その結果、これらの要因は一般的に無視され、今日に至るまで現代の気候モデルには組み込まれていない。

自然の陸水フラックスは、海洋から陸地に到達する水蒸気、降水として降下する水、その一部が地形から再蒸発し、残りの流れ（年間約40Tt）が海洋に再び流れ込み、海洋からの水蒸気の流れとバランスする、というものである。海洋水蒸気フラックスは陸地水蒸気フラックスの6倍であるが、地球上の水面積は陸地の面積の3倍程度しかない[2]。これは、(1)海洋表面は暗く、そのため太陽エネルギーをより多く吸収し、(2)海洋表面は常に濡れており、時々濡れたり乾いたりする陸地表面と比較して物質移動が促進されるためである。大気中には常に約13兆トンもの水が含まれており、これが温室効果の大部分を占めている。また、水分子が大気中を循環する期間は平均で約10日間である[10]。

地球全体の水収支は、水の利用可能性に関する多くの出版物で示されており、使用されている数値には多少のばらつきがあるものの、妥当な範囲内に収まっており、概ね一致している。本分析では、Houghton 著『Global Warming - The Complete Briefing』[11]の数値を使用

し、図 1 に世界的な水収支を模式的に示している。ここでは、温暖化によって水蒸気含有量が増加するにもかかわらず、1 年という短期間（1 年間のすべての季節の後）では大気中の水の総量はほとんど変化しないと仮定する。

より最近の文献 (<https://www2.whoi.edu/site/globalwatercycle/>) では、単位を m^3/s から Tt/yr に換算した後の数値が、陸から海洋への水平方向の水フラックスで 40 ではなく 41、陸から陸上大気への水フラックスで 71 ではなく 69 図 1 の陸から海洋への水フラックスは 110 (111 ではなく)、海洋から海洋大気への水フラックスは 426 (425 ではなく)、海洋大気から海洋への水フラックスは同じく 385 (385 のまま) となります。これにより、読者は変動の程度を把握することができます。どのバージョンの数値を使用しても、私たちの結論は変わりません。

スクリーンショット 2024 年 8 月 4 日午前 10 時 28 分 24 秒

図 1 [2]より引用した水塊の地球規模での保存。数字は年間テラトン単位での水塊の動きを示している。これは、最近の温暖化が問題となる前の基本ケースである。

図 1 の数値は、最近の温暖化以前の年間水の移動量 ($1 \text{ Tt} = 10^{12} \text{ t} = 10^{15} \text{ kg}$) を示している。質量保存の法則を満たすためには、「陸地」、「海洋」、「陸地上空」、「海洋上空」の各貯水池における水の流入量と流出量がバランスしていなければならない。これら 4 つの要素は、幾何学的に連続している可能性はあるが、連続している必要はない。

水の取水および使用に関するデータは、多数の情報源や研究から入手できます。ほとんどの推定では、世界全体で人間による水の取水量は年間 4~5 兆トンとされており、そのうち 60%以上が灌漑用水、20~30%が工業用冷却水、残りが生活用水として使用されています。例えば、IPCC が推定した人為的な取水によるナイル川、コロラド川、黄河、リオ・グランデ川、その他灌漑に多く利用されている河川の海洋への流出量の減少は、海洋への還流量の減少（「陸」から「海」への 40 トン）は約 10%、または 4 トン/年であると報告している[7, 12]。Houghton は、「米国では、ミズーリ川流域では 30%、リオ・グランデ川では 64%、コロラド川下流では 96%である。コロラド川の水のほとんどは海に到達しない」[11]。つまり、総流出量に占める割合として、このような河川システムにおける水消費量は相当な量になる可能性がある。さらに最近では、2021 年の IPCC 気候変動に関する最新報告書で、人間が陸上の水循環に与えた影響の大きさが次のように報告されている。「人間活動による家庭、農業、工業用途への水の直接再分配は年間約 $24,000 \text{ km}^3$ であり、これは世界の河川流出量の半分、または地下水の年間再充電量の 2 倍に相当する」[13]。したがって、この $24 \text{ Tt}/\text{yr}$ は、海洋への推定総還流量 $40 \text{ Tt}/\text{yr}$ の約 60%に相当する。

残念ながら、これらの報告書では、水が汲み上げられたり再分配された後にどこへ行くのかについての説明は提供されていません。そのため、大気中への実際の蒸発量については、あまり明確ではありません。灌漑用水の汲み上げの場合、そのほとんどが灌漑中または灌漑後に畑から蒸発しますが、家庭用水の汲み上げのほとんどは、下水として水源または別の水域に戻される可能性があります。工業用水の主な用途は火力発電所の冷却であるが、取水量と水の蒸発損失の関係は、使用される冷却プロセス（すなわち、現場での蒸発冷却または温水の大水域への戻し）によって大きく異なる。一部のデータソースでは、用途別、流域別、国別に水量を分類しているが、報告内容、報告の一貫性、測定方法、データ収集プロセスに適用される厳格さによって、精度は異なる[11, 14-21]。これらの推定値には、意図的ではない水の移動や測定不能な水の移動による損失（地下水貯水池への損失や水力発電用または灌漑用水の貯水池からの蒸発など）は含まれないことが多く、また、近年大幅に増加している帯水層からの地下水の汲み上げ分も含まれないことがある[22]。

現代の気候モデルにおける大きな課題は、IPCC の報告書で発生が報告されているものの、南半球の陸地では発生していない、北半球の陸地の降水量を 5%増加させるにはどうすればよいか、という点である[7, 12]。

北半球は地球の陸地の 67.3%を占めているため、南半球の陸地の降水量増加を単純化して無視すると、北半球の陸地の降水量が 5%増加すると、地球全体の陸地の降水量は約 3.4%増加することになる。陸地全体における 111Tt の下方水フラックスの 3.4%増加は、約 4Tt の追加下方水フラックスに相当する。現代の非水性温室効果ガスによる地球温暖化のパラダイムでは、この 4 テラトン分の余剰水分は、海洋から陸地に到達する大気中の水蒸気含有量が 40 テラトン中 10%増加することによって、海洋から供給される必要がある。しかし、海洋表面から発生した余剰水蒸気の 100%が陸地に流れ込むと考えるのは現実的ではない。大部分は海洋に再び降水するはずである。

ここでは単純化のため、図 1 に示されている割合と同じ割合で、発生した水蒸気が陸と海洋の下向きフラックスに分配されると仮定する。陸地の大気中の水蒸気含有量を 4Tt 増加させるには、海洋表面全体における上昇および下降の水フラックスも、歴史的な水準より 10%増加しなければならない。その結果、地球全体の水収支（北半球と南半球の水の分配を考慮しない場合）は、図 2 に概略的に示したようなものになるだろう。

スクリーンショット 2024-08-04 午前 10 時 29 分 46 秒

図 2 現代の気候モデルが想定する設定に対応する水塊の地球規模での保存。数字は年間テ

ラトン単位の水塊の動きを示す。非水性の温室効果ガスは、初期の温暖化が年間 42 テラトンの海洋からの蒸発増加につながるという正のフィードバックを開始する。増加した 42 テラトンのうち 38 テラトンは直接海洋に再沈殿し、42 テラトンのうち 4 テラトンは沈殿する前に陸地に運ばれる。陸地に沈殿した 4 テラトンの余剰水は、水循環を閉じるために海洋に流れ戻らなければならないが、これは観測結果と矛盾している。

陸地での降水の増加を説明するために、海洋から陸地への水の変化が想定されているが、これは大陸の陸地から流出する水の総量に大幅な増加 (+10%) をもたらすことになる (現代の気候モデルにおける想定されるポジティブフィードバックのメカニズムの一部として、海洋から蒸発した過剰な水を補うために約 4 テラトンの水が戻る 図 2 に示されているように、これは現代の気候モデルにおける正のフィードバック機構の一部として、海洋から蒸発する過剰な水分を補うために約 4 テラトンの水が還流する) ことで、大陸の陸地から流出する水の総量は 10% 増加することになる。これは、世界中の主要河川の流出量が減少しているという観測結果とは矛盾している [7, 12]。また、降水が増加している地域が北緯 30 度から 60 度の緯度帯のみであり、南半球ではほとんど変化がないという点についても説明されていない。

また、上記の水質量収支 (予算) は、エネルギー収支にも重大な影響を及ぼす。海洋からの蒸発水量を 42 テラトン/年増加させるには、大量の太陽エネルギーが吸収される必要がある。我々の推定では、海洋が吸収するエネルギーは 10 ゼタジュール/年 (42 テラトン/年 \times 2260 キロジュール/kg) か、吸収される太陽エネルギーが 10% 増加する必要がある。地球表面の放射強制力の増加分は平均で約 2W/m^2 と推定されていることを考えると、放射強制力の増加分は、海洋から海洋大気への水フラックスが約 $2[\text{W/m}^2] / 300[\text{W/m}^2] \times 425[\text{Tt/yr}] = 2.8 \text{ Tt/yr}$ 増加すると考えられます。 300 W/m^2 を地球が吸収する正味平均放射量、 425 Tt/yr を海洋上部の水フラックスと仮定した場合 (地球が吸収する正味平均放射量が 200 W/m^2 または 400 W/m^2 であったとしても、結論は変わらないことに留意してください)。次に、 2.8 Tt/yr の増加した水蒸気の約 10% (図 2 と同じ割合) にあたる 0.28 Tt/yr が陸地に移動し、残りは海洋に降水するが、その量は陸地で観測された年間 4 Tt/yr の増加した降水よりもかなり少ない。要するに、図 2 で想定されたシナリオは極めて非現実的である。

図 2 は地球規模の水質量収支に関するものであり、地域規模の詳細は考慮されていない。地域的な水質量およびエネルギー保存の観点から見ると、地球温暖化につながる非水温室効果ガスの増加は、海洋の割合がはるかに高い南半球の気候に、より大きな影響を与えるはずです。しかし、IPCC の気候データは、気候変動による降水量の増加は主に北半球で起こるという明確な偏りを見せており、南半球の陸地における総降水量は増加していません [7, 12]。最新の気候モデルシミュレーションでは、余分な蒸発のほとんどが南半球で発生して

いることが示されているため、南半球の海洋で発生したとされる水蒸気が、どのようにして北半球の陸地に優先的に移動するのかという疑問は残ったままである。

それどころか、降水量の増加が見られる地域は、冷涼で湿潤な北方地域に集中する傾向があり、高温で乾燥した地域や人口密集地域から大気塊が供給され、人為的な水排出量が高く、「地球温暖化」とは無関係である。南半球で北半球と類似した反応を示す主な地域は、灌漑とエネルギー集約型の経済を持つ南米のパタゴニアである。パタゴニアは、海洋と大気の循環パターンを通じて、南極半島に水とエネルギーを供給している。南極半島は、南極大陸で唯一「地球温暖化」の影響が認められている地域である[23]。水の蒸発潜熱は大きいため、1 トンの水蒸気は 6.7 トンの氷や雪を溶かすのに十分なエネルギーを含んでいる。パタゴニアでの水の使用と南極半島の氷塊の劣化との関係について分析を行うべきである。

南半球の他の地域、例えばニュージーランド、オーストラリアの西海岸、南アフリカでは、非水性温室効果ガスによる水蒸気正帰還増幅のパラダイムのもとで起こるとされる海からの水蒸気蒸発量の増加に伴う降水の変化はほとんど見られません。それどころか、高い山々とタスマン海に面したニュージーランドの南島では、降水量が大幅に増加するはずであるが、実際には増加していない。オーストラリアでは、西オーストラリアの海岸は依然として乾燥しており、灌漑用水としてマレー・ダーリング流域から取水された水の風下にある東オーストラリアでは、降水量の増加と極端な大雨が起こっている。

人為的な排出が最近の温暖化の主な要因であるという考えを裏付けるに足る十分な証拠や観察結果があるため [1]、人為的な水蒸気排出が最近の気候温暖化の主な要因であると仮定した場合、氷塊の保全がどのようなものになるかを検討する。上述の通り、灌漑後のより湿った地表や新たな植生は、灌漑前の乾燥した地表よりも暗く、その結果、より多くの太陽光を吸収する。また、湖や河川、地下帯水層から水田や畑に水を撒くことで吸収面積が増え、吸収される放射エネルギーが増加する。これは依然としてエネルギーの増加分であり、北半球では凝縮（雲の形成）と降水の際に水によって放出されなければならない。人為起源の水蒸気排出は、主に北半球の中・低緯度（北緯 0 度から 60 度）で発生しており、大気循環パターンを通じて水とエネルギーを北極圏へと移動させることになる。

水蒸気の凝縮により潜熱が放出され、北極や内陸の氷床が溶け、北半球の雲量が増え、降水や激しい気象現象が増加する。このような氷塊の移動は、北極、大西洋、太平洋に流れ込む水の塩分濃度が低下する傾向や、熱帯の氷塊の塩分濃度と温度が上昇する傾向を説明しており、これらの氷塊はもはや河川から冷たくて新鮮な水が戻ってくることはない。図 3 は、このシナリオにおける水収支の概略を示しています。図 1 および図 2 の場合と同様に、図 3 は、陸地および海洋の各要素の粒度や地理的広がりを一切含まない、世界規模の記述とな

っています。

スクリーンショット 2024年8月4日午前10時30分23秒

図3 人為起源の水蒸気排出が最近の気候温暖化および気候変動の傾向を推進していると仮定した場合の水塊の地球規模での保全。数字は年間テラトン単位での水塊の動きを示している。ここでは、年間4テラトンの水蒸気が陸地から発生し、そのほぼすべてが（寒冷な部分の）陸地に再び降水すると仮定する。

図2の水質量収支の計算と同様に、北半球には地球上の陸地の67.3%が含まれているため、南半球の陸地の降水増加を単純化して無視すると、北半球の陸地の降水が5%増加すると、地球全体の陸地の降水は約3.4%増加することになる。このような陸地全体における111 Ttの下方水フラックスの3.4%の増加は、約4 Ttの追加の下方水フラックスに相当し、これは寒冷な北半球の陸地に集中していることが観測されています。しかし、図2とは異なり、この4 Ttの追加分は海洋上空からではなく、その陸地の温暖で乾燥した地域、または人口密集地域から生じているのです。

地域ベースでは、人間活動による水蒸気の排出量も、中国、インド、パキスタン、米国南西部などの乾燥した人口密集地域における利用度の高い河川や湖での流量減少、および北半球の温帯地域での降雨量の増加という観測結果によりよく一致している。地域規模の「異常パターン」の例としては、以下のものが挙げられる。(1) 米国東海岸の降雨の週ごとのパターンでは、降雨量は土曜日に他の曜日よりも22%高く、日曜日から火曜日が最も少なかった[24]。(2) 平日と週末の気温の変化では、一部の水排出地域では週末に夜間の冷却が見られ、他の水排出のない地域では平日の夜間に冷却が見られた[25]。地球の公転周期や地球温暖化は、週単位や週単位のパターンを生み出すことはできないはずですが、発電や灌漑用水の排出は週末に減少する傾向があります。

また、地域規模の注目すべき問題として、メキシコ湾周辺の質量収支とエネルギー収支は、リオ・グランデ川、ミズーリ川、ミシシッピ川からメキシコ湾への流入水量の減少の影響を示すはずです。メキシコ湾への淡水の流入量の減少は、表層水の温暖化につながるはずであり、その結果、(1) ハリケーンの強度や進路に影響を及ぼす可能性、(2) メキシコ湾流の下流地域（例えば、流量は減少するものの温暖化が進む西ヨーロッパ）の気候が温暖化する可能性がある。これらは、地球規模ではなく地域的な「異常パターン」であるが、重要なのは、人為的な水蒸気排出が地域規模で顕著な影響を及ぼしているという点である。

結論と提言

人為的な水放出は、陸から大気への水フラックスを約 5~7%増加（年間 4~5 兆トン）させるのに十分なほど大きく、灌漑、蒸発冷却、貯水池からの蒸発など、人間の水利用の影響を受けた陸域の大気中の水蒸気も同様に増加する。これらの水放出は、大気中に放出される炭素質量の純増分の約 1000 倍であり、温室効果ガス排出では得られない膨大な量の潜熱を寒冷な北方地域の大気にもたらす。このような水蒸気の直接的な人為的排出は、炭素収支のみに関連する極端な行動を強いる前に、現代の気候モデルに首尾一貫した形で組み込むべきである。

著者について：ノブア・マエダは、カナダのアルバータ大学土木環境工学科准教授。ブルース・ピーチャーは、カナダのアルバータ州にあるニューパラダイム・エンジニアリングの社長。