

## 論文の内容の要旨

論文題目 気象要因で分類した全球降水量分布とその将来変化に関する研究  
氏名 内海 信幸

水は人間社会にとって必要不可欠の資源であり、その不足は人間社会に大きな影響を与える。一方で過剰な水も水害を引き起こす原因になる。資源としての水、災害の原因としての水、どちらを考える場合も地球の水循環の把握が重要である。水文学は都市や小流域から地球全体まで様々なスケールでの水の循環を扱う学問である。水は循環するものであるが、伝統的な水文学では流出、地下水涵養、蒸発など降水が地表に落ちてからのプロセスが主として扱われてきた。降水は様々な気象システムによってもたらされる。降水の空間分布や変動は水文学における最重要の情報であるが、全球の降水分布や変動に対する種々の気象システムの相対的な寄与は（各地域における経験的、場合によっては科学的・統計的な知見の蓄積はあるものの）全球や半球といったスケールでは明らかになっていない。また気候変動が水資源の利用可能性や水災害の発生確率に及ぼす影響の評価も近年の水文学に求められる大きな役割の一つであるが、将来の降水変化を考える上での各気象システムの相対的な重要性といったものも、定量的に評価が十分におこなわれているとは言えない。全球の降水分布や降水の将来変化に対する種々の気象システムの相対的な寄与度を理解・評価することは、以下の点で重要である。

- 個々の気象システムに関しては気象学の分野で大規模な大気・海洋の循環から種々の気象システムの発生頻度や空間分布、降水メカニズムなどを結ぶ様々なプロセスについて知見の蓄積が進んでいる。世界の降水分布やその将来変化を降水の原因となる各気象システムと直接結び付けることができれば、水文学と気象学それぞれで蓄積された知見を橋渡しし、流出量などの水文変数の分布や変化から大規模な大気・海洋の循環まで一連のプロセスを翻って理解することができる。
- 異なる気象システム（例えば局地的な降水と熱帯低気圧）では予測手法も予測のリードタイムも異なる。将来の降水変化に対する各気象システムの寄与度、言い換えれば重要性を明らかにすることは、気候変動への適応策としてどういった気象システムに注目すべきかを定める判断材料を提供する。
- 降水は水蒸気の凝結による潜熱の放出を伴う。全球の降水の分布や変化に対する各気象システムの寄与度を明らかにすることは、地球のエネルギー循環における各気象システムの役割の理解にもつながる。

そこで本研究では原因となる気象システム別に降水を分類するアルゴリズムを開発し、全球の降水量分布や降水量極値に対する各気象システム由来の降水の割合や、将来の降水量変化に対する各気象システムの寄与度を評価した。なお本研究では熱帯低気圧に伴う降水と温帯低気圧（温帯低気圧中心および温帯低気圧に伴う前線）に伴う降水を明示的に扱いそれ以外の降水を「その他」の気象システムによる降水とした。

降水の原因となる気象システムのうちでまず温帯低気圧に伴う前線に着目すると、前線の全球分布を明らかにすることのできるほぼ唯一の手法は前線の客観検出手法である。前線の客観検出手法を扱う研究ではこれまで、客観検出手法のパラメータ決定や検証に地上天気図が用いられてきた。しかし地上天気図の読み取り作業や処理には膨大な労力を必要

であった。そこで本研究ではまず、気象庁発行の地上天気図（アジア地上解析図：ASAS）に基づく前線のグリッドデータを作製した。計算機による処理が容易な前線のグリッドデータを作製したことで、前線の客観検出手法のパラメータ決定や検証の自動化を可能にした。また作成した前線グリッドデータを用いて、これまで定量的にはほとんど検討されることのなかった地上天気図の特性（前線の主観解析に由来する人為起源のバイアスなど）を評価した。ASAS 上に解析された前線の数には主観解析に由来する人為起源のものと考えられる前線数の不連続が 2000 年代中頃に見られた。

次に気象システムの客観検出手法と熱帯低気圧ベストトラックデータを用いて全球の降水をその原因別に熱帯低気圧、温帯低気圧中心、温帯低気圧に伴う前線、その他による降水に分類するアルゴリズムを構築した。これには熱帯低気圧の客観検出アルゴリズムも同時に実装しており、ベストトラックデータが利用できない将来気候に対しても適用可能である。

さらに、降水分類アルゴリズムを用いて全球の降水量をその原因となる気象システム別に分類した。また 1 時間～4 週間と異なる時間スケールの極端に強い降水（極端降水）の積算量に対する各気象システムの寄与度を定量化し、その時間スケール依存性を調べた。極端降水に対する寄与が大きい気象システムは地域によって異なるが、各気象システムの寄与の時間スケール依存性については地域間で共通した傾向が見られた。1 時間～24 時間（地域によっては 72 時間）程度までは「その他」による極端降水の割合は時間スケールが長くなるにつれて小さくなり、一方で熱帯低気圧による極端降水の割合は時間スケールが長くなるにつれて大きくなる傾向が確認された。時間スケールがさらに数日～数週間と長くなると、再び「その他」の寄与度が大きくなり熱帯低気圧の寄与度は減少する。温帯低気圧の割合には明確な時間スケール依存性は確認されなかった。中緯度では温帯低気圧中心付近や熱帯低気圧付近で極端な降水が発生しやすいが、温帯低気圧中心から遠く離れた地点までのびる前線の極端降水への寄与も無視できない。こうした前線は、例えば 1 時間極端降水（99.99 パーセンタイル値以上）の積算量に対して日本周辺で約 10%、北米では約 20% 程度の寄与を持っていた。また熱帯低気圧と前線の両者が影響する極端降水は、東アジアや北米東部など一部の地域で特徴的にみられる現象であることがわかった。さらに同地域では水蒸気量で特徴づけられる前線と熱帯低気圧の両者の影響による極端降水も、上記の前線と熱帯低気圧の両者の影響による極端降水と同程度に大きな寄与を持っていた。

降水分類アルゴリズムを複数の気候モデル（GCM）出力に適用し、RCP 8.5 シナリオ下における全球の降水量将来変化（現在気候 1980-1999 年から将来気候 2080-2099 年までの変化）に対する各気象システムの相対的な寄与度を評価した。中・高緯度では総降水量変化への温帯低気圧の寄与が大きい。極端降水の変化を対象とした場合はその寄与はより大きくなる。例えば東アジアでは降水量変化への温帯低気圧の寄与は、総降水量の増加に対しては約 25% であり、非常に強い降水（99.9 パーセンタイル日降水量以上の強度）の積算量の増加に対しては約 70% である。一方、低緯度では強い降水を考えるほどその増加率への熱帯低気圧の寄与が大きい傾向があった。東南アジア～東アジア、そして中米では気候変動によって総降水量や強い降水における各気象システム由来の降水の割合が、割合（%）の差にして 10～20% 程度変化することが分かった。例えば台湾付近では強い降水（99 パーセンタイル日降水量以上）に対する熱帯低気圧および「その他」の寄与が増加し、温帯低気圧の寄与が減少する。降水の面から見るとこうした地域はその属する気候帯自体が変化するとともに

言える。

モデル間の予測の合意度の観点から見た予測の不確実性に注目すると、熱帯低気圧に伴う総降水量変化の不確実性が大きい地域においても、その強度および頻度に関しては有意な変化が見られた。たとえ総降水量の予測に大きな不確実性が伴っていても、その降水強度や降水頻度の変化に関しては GCM が比較的確かな予測情報を提供してくれることを示唆している。水害などを考えるうえで強度や頻度の変化に関する情報は重要であり、こうした考え方は GCM が予測する情報のうちどのような情報がより確かで活用できるかを判断する一つの方策になり得る。

降水の将来変化の解析において将来の気温上昇量の大きい GCM ほど降水強度の増加率が大きい傾向が確認された。これに関連し、観測データにみられる降水量極値と地上気温の関係を調べた。日々の観測データからみた降水量極値と気温の関係に関する議論では、気温変化に伴う降水量極値の変化率が Clausius-Clapeyron の式の式で記述される飽和水蒸気量変化率 (CC 変化率) で説明可能であるかという議論が存在するが、そうした議論はヨーロッパおよびオーストラリアにおける観測データのみを用いていた。そこで本研究では全球の地上観測を網羅するデータセットである GHCN-Daily を用いて全球における日降水量極値と気温の関係を調べた。その結果、CC 変化率で説明できるような降水量極値の変化率を示す地域は中緯度の一部に限られており、中緯度 ( $20^{\circ}$  -  $55^{\circ}$  N&S) の他の地域では、高い気温範囲では気温の高い日ほど日降水量極値が小さくなる地域も多く見られた。さらに時間分解能の高い日本域の観測データを用いた解析により、高い気温範囲における降水量極値の減少は主に降水の持続時間の減少によることが示された。また、日本においては時間スケールが 10 分程度に近づくと気温変化に伴う降水量極値の変化率が CC 変化率に比較的近い値を示す傾向があった。これは例えば都市や小流域における水害にもつながる短い時間スケールの降水量極値に対しては、地上気温やそれによって規定される飽和水蒸気量が大きな説明力を持つことを示している。