

時間・空間スケールを考慮した異常降雨の グローバル解析に関する基礎的研究

A BASIC STUDY ON GLOBAL ANALYSIS OF ABNORMAL RAINFALL IN
VARIOUS SPATIOTEMPORAL SCALES

中北英一¹・義本欣司²

Eiichi NAKAKITA and Kinji YOSHIMOTO

¹正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²学生員 工学士 京都大学修士課程 工学研究科 (〒606-8509 京都市左京区吉田本町)

It is important to analyze what kind of abnormal rainfall has been occurring in the Globe. This research shows the followings. Spatiotemporal distribution of abnormality of maximum daily rainfall is a little different than maximum rainfall with longer time durations. Increases in time series of global percentage of area of abnormal rainfall has relation with ENSO. However, we can not say that global averaged rainfall is increasing. In case of Mississippi floods in 1993, seasonal abnormality gradually increased from spring to summer, and then, suddenly decreased in autumn. This kind of seasonal abnormality may also occur only by shifting of timing of rainy season such as monsoon. This would be vital for even those who are familiar with every-year large floods such as in the area of Mekong Delta. Also, in this case, averaged rainfall over 2-degree mesh showed more abnormality than that point rainfall. This clearly implies that we must analyze abnormal rainfall considering spatiotemporal scales depending on size of target river basin.

Key Words : abnormal rainfall, extreme rainfall, global warming, ENSO, spatiotemporal scale

1. 研究の背景と流域を考慮した降雨の異常さ

近年世界各地で洪水などの異常降雨災害が発生している。2002年には8月中旬にドイツ、チェコ、オーストリアで、9月初旬にはフランスで大規模な洪水災害が発生した。この年は中国、メコンデルタ、バングラデシュ、ロシア、韓国といった他の世界各地でも深刻な洪水災害が発生している。社会基盤がより整備されていると考えられるなか、西欧地域での大災害には多くの人々が衝撃を受けた。また2000年にはメコンデルタにおいて、1999年12月にはベネズエラにおいても大規模な洪水災害が確認されている。このように近年世界各地では異常降雨災害が報告されており、これらを客観的かつ総括的に解析する必要性が出てきた。

降雨の異常には、(1)「局地的」な「豪雨」の異常と、(2)「広範囲」な「持続的降雨」の異常の、2種類が考えられる。

日本では、(1)の「局地的」な「豪雨」の異常が問題となる。特に梅雨時や台風時には各地に大きな被害をもたらしている。大陸大河川においては主要都市の存在する地域を流れる大河川の支川流域や、わが国の中

小河流域に「局地的」な「集中豪雨」が発生した場合、外水・内水氾濫が起こり、都市に多大なダメージを与える。

(2)の「広範囲」な「持続的降雨」の異常が問題になるのは、大陸河川の本川などである。すなわち、大陸河川のように流域面積が我が国のものより1~2オーダー大きな河川流域の本川では、たとえ強度が弱くても広い流域に異常に持続的に降雨がもたらされれば大河川本川からの越水により洪水が生じる。

2002年のドレスデンの洪水は、(1)、(2)の複合型である¹⁾。またメコンデルタの洪水は(2)の典型である²⁾。

このように、降雨の異常さを評価するためには、降雨の強度だけでなく、降雨の持続期間や降雨の範囲を含めて評価する必要がある。

中北・花房^{3), 4)}は、降雨の「強度」と降雨持続期間という「時間的スケール」の2つに対する異常降雨指標によって、いくつかの洪水災害時の降雨の異常さを評価している。

本研究では、中北・花房の異常降雨指標をベースに、全球における異常降雨に対する検証をさらに進める。すなわち、降雨の「強度」と「時間スケール」からな

るその指標に、さらに「空間的スケール」を考慮する。そのために、中北・花房らが地点雨量を対象としていたのに対し、本研究では地点雨量値を様々な空間スケールのメッシュ値に変換してその異常さを評価する。

2. 降雨の異常さ指標

降雨継続期間を考慮した降雨の異常さ指標については、まず中北・花房らによって地点雨量に対して導入された指標、すなわち年最大 D 日雨量としての異常降雨指標を使用する。

算出の手順としては、まず30年以上データのある場合のみ、各地点それぞれについての年最大 D 日雨量の従う確率分布モデルを推定する。ただし、データの最大長は100年を超える。降雨継続期間については、 $D = 1, 3, 7, 15$ 日とした。 $D = 31$ についても調べたが確率分布の強雨側の裾野のfittingが不良だったため除外している。確率分布モデルとしては、正規分布、対数正規分布、Gumbel分布、対数Gumbel分布、指数分布の5種類を対象とし、そのうち各地点の年最大 D 日雨量が最も良く従う確率分布モデルをその地点の年最大 D 日雨量の従う確率分布モデルとする。各地点の年最大 D 日雨量が従う確率分布モデルの推定に当たっては図式推定法(graphical method)を用い、プロットインゴジション公式としてワイブル公式を用いた。また、観測点数が多いため全てに関して目視で判断するのは困難であるので、寶ら⁵⁾によって提案された確率分布モデルの適合性の評価基準であるSLSC (標準最小二乗規準)を用いて、各地点について最適な確率分布モデルを自動的に採択する。

次に、 T 年の地点 i における年最大 D 日雨量としての異常降雨指標 $P_{D,i,T}$ を次のように定義する。

$$P_{D,i,T} = \int_{r_{D,i,T}}^{\infty} f_{D,i}(x) dx \quad (1)$$

ここで、 $f_{D,i}(x)$ は地点 i における年最大 D 日雨量の従う確率密度関数、 $r_{D,i,T}$ は地点 i における T 年の年最大 D 日雨量である。すなわち $P_{D,i,T}$ は T 年の地点 i における年最大 D 日雨量としての異常さであり、様々な時間スケールを考慮した地点降雨の超過確率である。

3. データのメッシュ化

本研究に用いたデータは、Global Daily Climatology Network, Version 1.0という、全球32857ヶ所の観測点における日雨量データである。解析するにあたっては、各地点のデータを緯度経度 0.5° メッシュごとに置き換えたものを最小空間スケールのメッシュ値とした。データをメッシュ化するにあたっては、1つのメッシュ内に複数の観測点がある場合は観測値の平均値をその

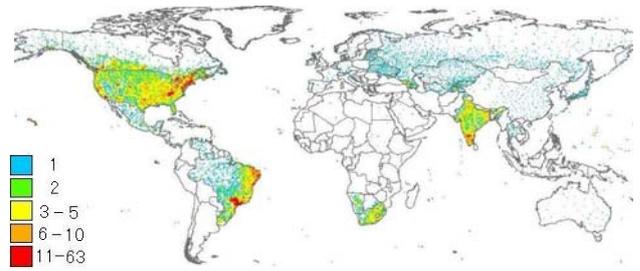


図-1 0.5° メッシュ内の観測点数

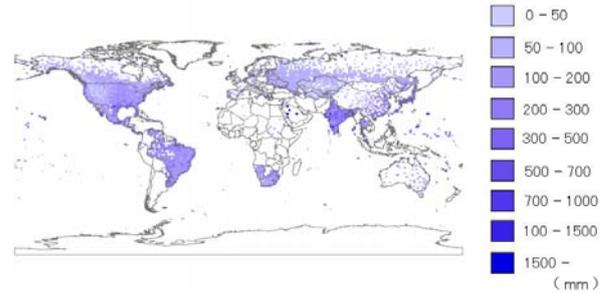


図-2 100年確率年最大日降雨量 (地点データ)

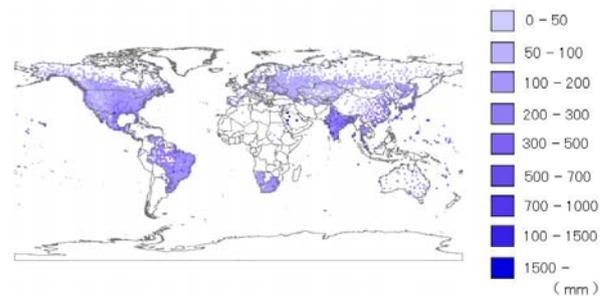


図-3 100年確率年最大日降雨量 (メッシュデータ)

メッシュにおけるデータとした。 0.5° にメッシュ化した時の観測地点の分布を図-1に示す。 $1^\circ \times 1^\circ$ のメッシュスケール、 $2^\circ \times 2^\circ$ のメッシュスケールのメッシュ値の算出方法としては、まずそれらのメッシュを4分割し、その分割した3メッシュ以上にメッシュ値が存在する場合のみ、それらのメッシュ値の平均値をそのスケールのメッシュ値とした。

異常さ指標の計算は、2. で示した方法の地点雨量をメッシュ値に置き換えることにより行う。また、メッシュ値が30年以上存在するメッシュのみ算定するメッシュ化の利点としては以下の3点が挙げられる。

- ・ 観測点の空間密度の偏りを補正できる。
- ・ 同一メッシュ内に複数の観測地点がある場合は、欠落している期間のデータを補い合える。(データ長を長く取れる)
- ・ 様々な空間分布に関する解析をする際にサイズの変更が容易である。

さて、メッシュのサイズが 0.5° であることと、雨量データが日雨量のものであることから、 0.5° メッシュ内の複数の観測データの平均値をそのメッシュにおける地点雨量とみなしても妥当であるとみなす。もちろん数時間単位の雨量を扱う場合は 0.5° メッシュ値は地点雨量とはみなせない。

地点雨量としての0.5°サイズのメッシュ化が妥当かどうかを調べるために、 $D=1,3,7,15$ 日について全球における50年確率と100年確率の降雨量を求めた。すなわち30年以上データのある場合のみ各点の超過確率 $P_{D,i,T}$ が0.02, 0.01となる雨量 $r_{D,i,T}$ を算出し、グローバルマップに描いた。これらのことを地点データをもとにした場合とメッシュデータをもとにした場合の両方を調べて比較したところ、ほぼ同じ値を示していた。このことから、地点雨量をメッシュに置き換えるにあたって特に問題がなかったことが言える。例として $D=1$ 日についての100年確率降雨量について、地点データをもとに調べたものを図-2、メッシュデータをもとに調べたものを図-3に示す。

4. 空間分布としての降雨の異常さ傾向

ここでは、各年の継続期間ごとに降雨としての異常さの空間分布をグローバルマップ上で見ていく。異常さ指標としては上で示した「年最大 D 日雨量としての異常降雨指標 $P_{D,i,T}$ 」を用い、対象期間は1980年から2000年までの21年間とした。異常さの空間分布を算出する方法は以下の手順である。

1. T 年の年最大 D 日雨量の超過確率を各0.5°メッシュで算出する。（ $T=1980\sim 2000$, $D=1,3,7,15$ ）
2. 全球を1°×1°メッシュに分割し、各メッシュに含まれる観測データの中で最も超過確率 $P_{D,i,T}$ の値の小さいものをメッシュ代表値としてグローバルマップ上に描く。

以上の手順で得られた年ならびに継続期間ごとの異常さ分布のグローバルマップのうち、1986年の $D=1,3,7,15$ 日雨量の異常さ分布を図-4に示す。特徴をまとめると以下の通りである。

（特徴1）年最大3日でも異常な場所は、年最大7日と年最大15日でも異常となる傾向にある。しかし、年最大1日に関しては他とあまり関連性のない分布をしている傾向にある。

（特徴2）年最大1日、年最大3日、・・・、年最大15日と継続期間を長くするにつれ、各地に分散していた異常さ分布は次第に塊になってくる傾向にある。これは、地点降雨の異常さの出現特性として、継続期間 D が短いほど局地的に現れる可能性が高く、継続期間 D が長いほど広範囲に及ぶ可能性が高いことを表しているといえる。洪水をもたらす降雨の異常さの種類として「局地的な集中豪雨」の異常さと「広範な持続的降雨」の異常さが考えられることを述べたが、このことを裏付ける特徴であるともいえる。

5. 時系列変化としての降雨の異常さ傾向

(1) 異常降雨の面積割合

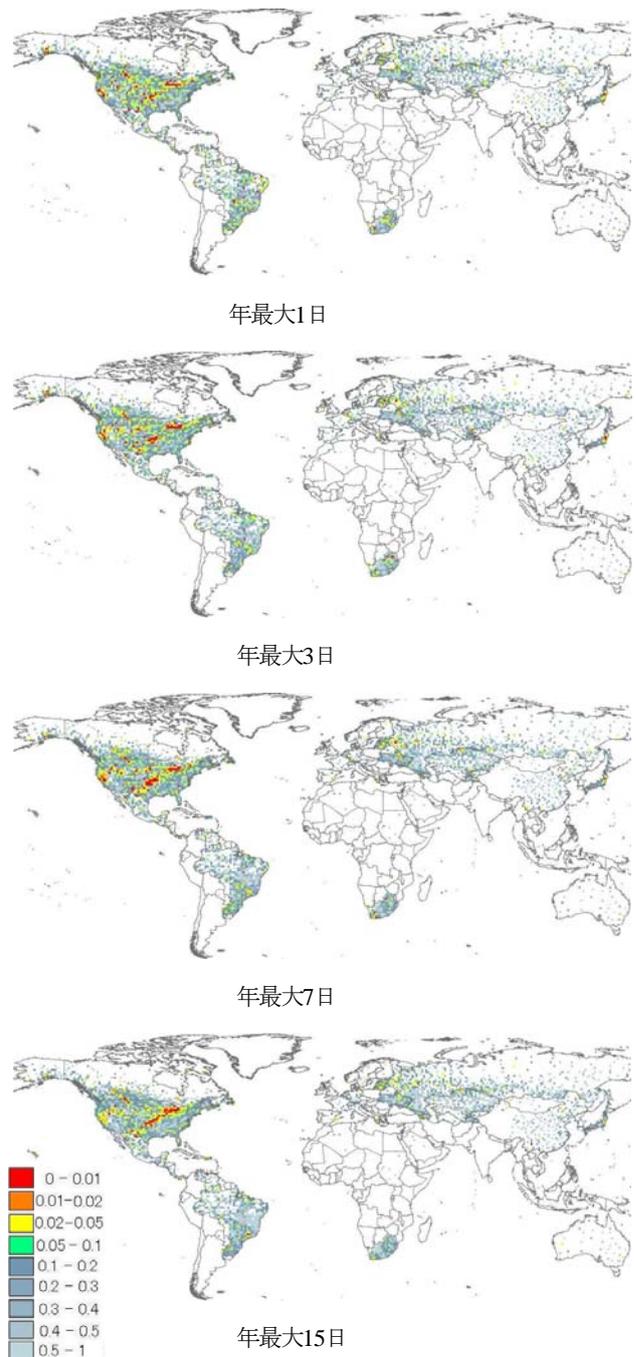


図-4 異常降雨指標のグローバル分布 (1986年)

ここでは、年および継続期間ごとの全球的な異常さの出現状況を別の指標をもって算定し、その傾向を調べる。ここでいう全球とは、地上雨量データが存在する範囲という意味での全球である。全球の特徴を表す指標として、異常な降雨があったメッシュの割合

$$R_{D,T,x} = \frac{N_{D,T,x}}{M_T} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

を定義する。ここで M_T はある T 年にメッシュ値が存在するメッシュ(0.5°メッシュ)の総数であり、 D によらず T のみに依存する。 $N_{D,T,x}$ はある T 年に x 年確率を超える年最大 D 日雨量があったメッシュの総数であ

る。すなわち、 $R_{D,T,x}$ は $N_{D,T,x}$ の M_T に対する割合として定義する。言い換えれば、各年で異常降雨が発生した全球における面積割合である。

次に、指標 $R_{D,T,x}$ の時系列的な変化を調査する。対象期間としては1900年から2000年を選定し、 $R_{D,T,50}$ と $R_{D,T,100}$ の2種類で全域を対象に調査する。図-5は対象期間内での $R_{D,T,50}$ 、 $R_{D,T,100}$ の時系列変化を年単位で各 D 毎に示したグラフである。ここで M_T は年 T に依存するので、各年の観測メッシュ数を同時に示した。これらのグラフの特徴を以下に述べる。

(特徴1) $R_{D,T,x}$ は、異常降雨の発生が地点間で無相関であれば各年において x 年確率を超えるメッシュの空間的な出現率は $1/x$ となるはずである。図を見てみると、一見 $R_{D,T,100}$ は1%付近にばらつき、 $R_{D,T,50}$ は2%付近にばらついているが、必ずしもそうでなく、全球規模での空間相関の存在を想定させる。

(特徴2) 各継続期間において、特に1970年代後半と1990年代後半で異常降雨の上昇傾向が見られる。したがって空間相関が強い可能性がある。

(2) エルニーニョ現象との関係

そこで、図-5の経年変化における、1970年代後半と1990年代後半における異常降雨の発生面積割合の増加と、エルニーニョ現象との関係について議論する。

異常降雨の発生が多い期間においてエルニーニョ現象が発生しているのは1977年、1978年、1997年であり、その影響が強いと思われる1977年、1978年、1997年、1998年にどこで異常降雨が発生しているかを調べた。それぞれの年について年最大1日雨量としての異常さの分布を調べたが、1977年についての分布を図-6に示す。これらよりわかった事としては、1977年、1978年についてはインドにおいて異常降雨が多くメッシュで発生しており、アメリカにおいても異常降雨の発生したメッシュが散在している。また、1997年、1998年については、アメリカにおいて異常降雨が多くメッシュで発生している。1997年、1998年のインドについてはデータが欠損しているため不明である。これらの異常降雨の発生域について調べたところ、エルニーニョ現象の影響とされる多雨域⁶⁾と同じ地域である。このことより1970年代後半と1990年代後半における異常降雨の面積割合の増加の原因として、エルニーニョの影響が挙げられるということが言える。

(3) 全球平均降水量との関係

次に、異常降雨の発生面積割合と全球における平均降水量とに相関があるのかを検証する。

全球平均降水量の算出方法としては、ある T 年において300日以上データのあるメッシュの年間降水量を求め、さらにそのメッシュにおける年間降水量を、データの

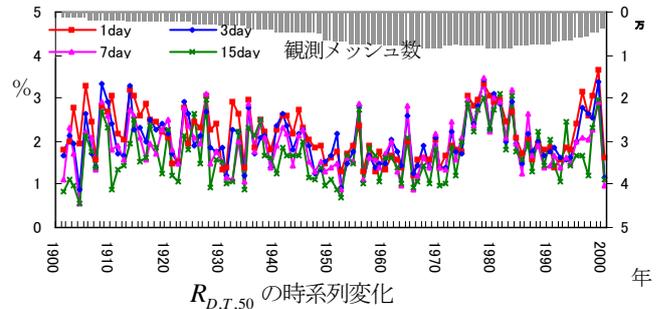
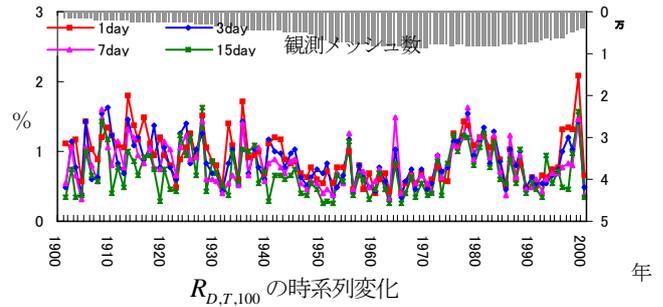


図-5 異常降雨のあったメッシュの割合の経年変化

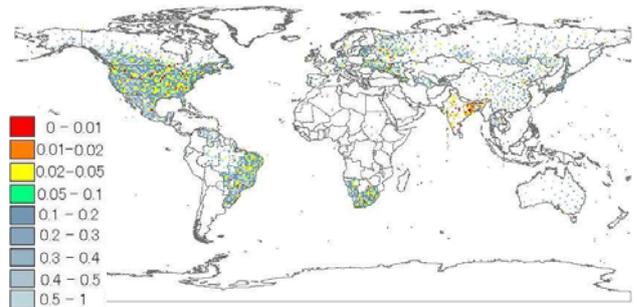


図-6 1977年の異常降雨指標の分布 (最大1日雨量)

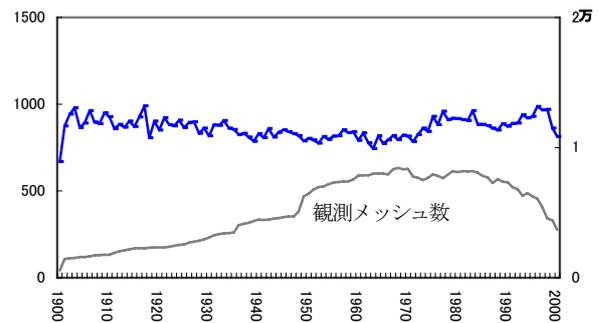


図-7 全球平均年降水量の経年変化

ある全メッシュにおいて平均する。そしてその合計値を計算したメッシュ数(観測メッシュ数と呼ぶ)で除したものを全球平均降水量とみなしている。このようにして計算された平均降水量の経年変化のグラフを、図-7に示す。グラフの縦軸は左が降水量を表し、右が観測メッシュ数を表している。

この図-7から、異常な降雨の面積割合が高かった1999年に平均降水量が下がっているなど、異常な降雨の面積割合の増加とともに平均降水量が増加している

などの相関はないことがわかる。しかし、図-7における平均降水量は計算に含まれるメッシュの変化が大きいため、計算に含まれる多雨域や少雨域割合の変化による変動に大きく左右されてしまう。そこで、次のように再計算を行った。2000年に観測値が得られたメッシュだけを用いて同様の計算を行った結果を図-8に示す。図-7と同様に、図-8からも、異常な降雨のあった地点の面積割合の時間変化と平均降雨量の変化には特に相関が見られないことが分かった。すなわち、D日雨量としての異常降雨量が発生する頻度の大小と、その年の全球での降水多寡とは相関が無く、かつ大きなトレンドもないということがここでの結論である。

6. 他の視点での異常降雨指標

(1) 空間スケールを考慮した異常降雨指標

ここでは、空間的スケールを考慮した雨量として、空間スケールの異なるメッシュでの平均値に対して異常降雨指標の特徴を調べる。

1°メッシュスケールと2°メッシュスケールに対する100年確率に対応する年最大1日降雨量を図-9に示す。1°メッシュスケールでは一部描かれない部分が存在する。その理由はそれぞれのスケールのメッシュ内での空間平均的な降雨を対象とするので、各メッシュ内に分散して位置する複数の観測点が存在する場合のみを対象としているためである。それらを地点（0.5°メッシュ）における100年確率降雨量（図-2、図-3）と比較する。気象擾乱のスケール階層構造からすると当然のことであるが、地点からスケールが大きくなるにつれて雨量の値が減っている。同様に、空間スケールが大きくなるにつれ異常さ分布が大きな塊状になること、すなわち、長期間の降雨の異常さは広範囲に及ぶことを示している結果が得られた。

次に空間スケールを考慮した事により、実際の洪水での降雨の異常性をより顕著に示せた例として、ミシシッピ川で大洪水が発生した1993年におけるアメリカでの異常降雨への適用例を図-10に示す。1993年のミシシッピ川大洪水を引き起こした降雨は広範囲な持続的降雨に分類され、0.5°メッシュにおける最大15日雨量の異常さよりも、2°メッシュスケールでの異常さの方が大きかったことを示している。注意を要するが、これは当然のことではない。残念ながら今回利用したデータセットにはデータが存在しないので解析はできなかったが、1. で述べたように、2002年8月のヨーロッパ洪水の特にドレスデン上流域全体としては、このミシシッピ川洪水と同じように、広い空間スケールの降雨の方がより異常であった可能性が高い⁷⁾。

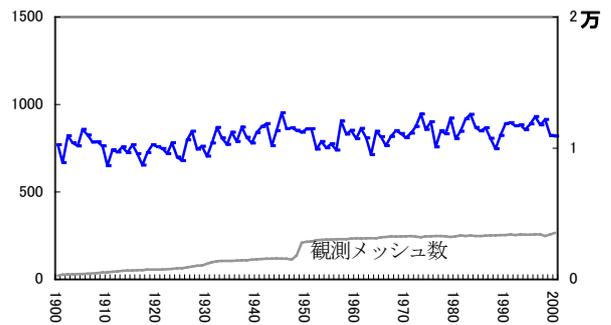


図-8 2000年に観測された点の平均年降水量の経年変化

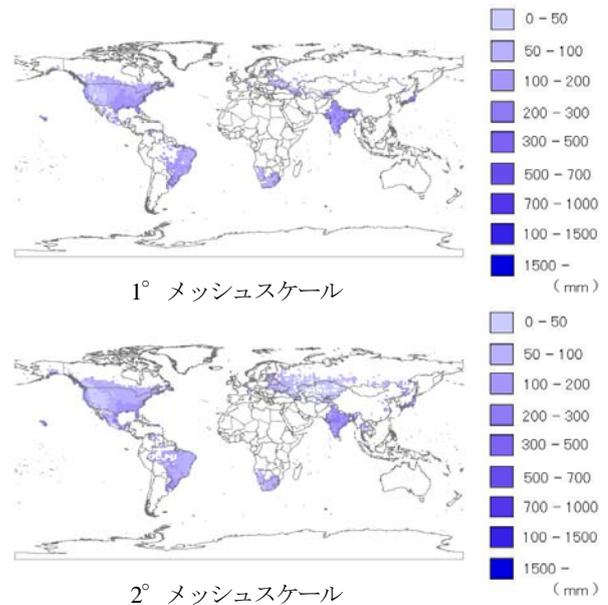


図-9 空間スケールを考慮した100年確率1日降雨量

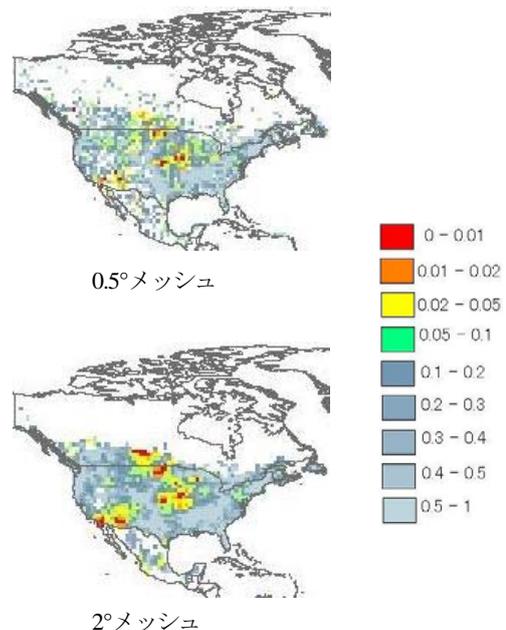


図-10 1993年の年最大15日雨量としての異常降雨指標の分布

(2) 季節ごとの異常降雨指標

ここまでは年最大D日雨量としての降雨の異常さを調べてきたが、季節ごとの異常さも重要であり、ここでは季節最大D日雨量としての降雨の異常さについて述べる。すなわち、1年を冬(1-3月)、春(4-6月)、夏(7-9月)、秋(10-12月)に分割し、季節最大D日雨量としての異常さ指標を、それぞれの季節ごとに算定する。

図-11は、この指標を1993年のミシシッピ川洪水へ適用したうち、地点としての最大7日雨量としての異常さを示す。ただし、黒線で囲んだ領域は、特に大規模な洪水となったセントルイスへの出水に影響を及ぼす上流域をおおよそ示している。この図によると春から夏にかけて徐々に異常性が増加し、秋になると突然異常さが消滅したことを表している。図-10では年最大15日雨量の異常さを示したが、これが主に、春～夏の異常さによってもたらされていることを示している。すなわち、ミシシッピ川洪水の事例にとどまらず、全球的にどの季節での異常さが出現したかの視点、解析の重要性を物語っている。

さて、季節ごとの異常さは2つの要因でもたらされることに注意すべきである。すなわち、

- (1) 年々の異常さと同様、毎年その季節に生じる多雨が異常であった場合、
- (2) 毎年ある季節にもたらされる通常の多雨が、たまたま季節的に早いまたは遅い時期にもたらされた場合、

である。1993年のミシシッピ川洪水は(1)の異常さによる。図-10の年最大15日雨量の異常さ分布がそれを示している。また、2002年のヨーロッパ洪水もそうである¹⁾。翻って、2000年のメコンデルタの洪水の異常さは主に(2)の要因にて生じている。すなわち、モンスーンの雨季による出水が早目に始まったのが最大の要因である²⁾。実際、いくつかの継続時間の年最大降雨量はそれほど異常ではなかった²⁾。メコンデルタでは、毎年同じ時期に到来する洪水を前提として、農業を含めた年内の生活パターンを形成している。しかし、たとえ例年通りの規模の洪水でもそれが季節はずれのものとなればきわめて人々にとっては異常となる。そういう意味で、(2)の意味での季節異常さの出現特性の解析もきわめて重要である。

7. 結論

以上、異常降雨の解析のあり方ならびに、それをベースに定義した異常降雨指標を用いて異常降雨の解析をいくつかの側面から行い、側面ごとの異常さの特徴を定義した指標が示していること、それらが地球規模で関連している可能性があること、側面により異常さが異なることなどを示した。今後は、各側面ならび

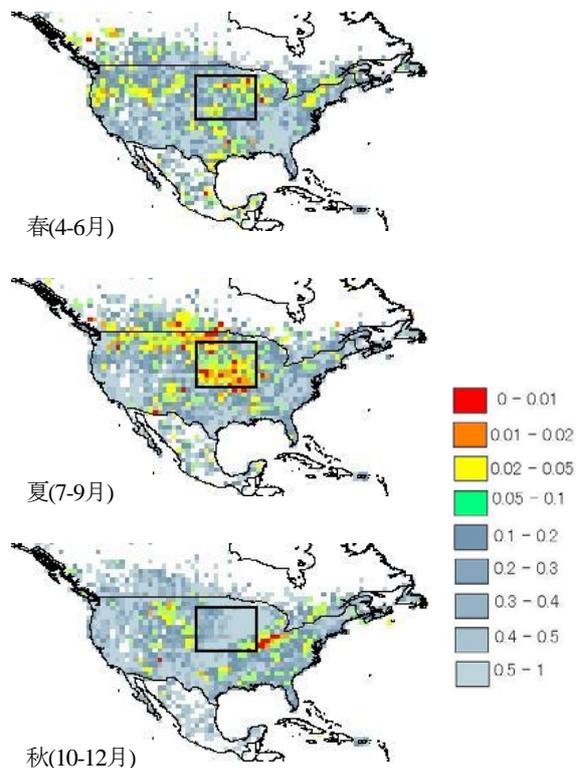


図-11 季節最大7日雨量の異常さ傾向 (1993年)

にその統合化に向けてのより深い解析を行ってゆく予定である。

参考文献

- 1) 2002年ヨーロッパ水害調査団・(社)土木学会：2002年ヨーロッパ水害調査一報告書一，112 pp., 2003.
- 2) 土木学会水理委員会：メコン河洪水氾濫調査報告書，2000年11月，84 pp., 2001.
- 3) 中北英一・花房大輔：様々な時間・空間スケールと流域特性を考慮した異常降雨のグローバル解析，第12回地球環境シンポジウム講演論文集，土木学会，pp241-246, 2004.
- 4) Nakakita, E. and D. Hanafusa: A study on global analysis of abnormal rainfall through various spatiotemporal scales and basin characteristics, Proc. of Int. Conf. on Monitoring, Prediction and Mitigation of Water Related Disasters, Kyoto, pp.7-12, 2005.
- 5) 寶馨・高棹琢馬・清水章：琵琶湖水文データの基礎的分析，京都大学防災研究所年報，第29号B2, pp.157-171, 1986.
- 6) 気候影響・利用研究会編，日本農業気象学会・気候変化影響研究部会協力：エルニーニョと地球環境，改訂増補版，成山堂書店，2001.
- 7) 中北英一：欧州災害について一気象・水文状況と災害の実態一，河川，No.679, pp.14-23, 2003.

(2005. 9. 30 受付)