Event Attribution実験を用いた 2012年アマゾン川洪水の要因分析

木村 雄貴¹・田上 雅浩²・今田 由紀子³・平林 由希子⁴

¹非会員 東京大学学生 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:kimura@hydra.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学研究員 大学院工学系研究科付属総合研究機構 (〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16)

E-mail:masatano@sogo.t.u-tokyo.ac.jp

³非会員 気象研究所研究官 気候研究部第二研究室 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1)

E-mail:yimada@mri-jma.go.jp

⁴正会員 東京大学准教授 大学院工学系研究科付属総合研究機構 (〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16)

E-mail:hyukiko@sogo.t.u-tokyo.ac.jp

地球温暖化が近年の異常気象や極端現象に与える影響を定量化することを目的に、大気大循環モデル (AGCM) を用いた過去の多数アンサンブル実験を行い、極端現象の発生確率を求める Event Attribution (EA) という解析手法が開発されてきた。しかし、既存のAGCMでは河川氾濫の再現性があまりよくないため、河川の洪水に対してEAが実施された例はこれまでに無い。そこで、本研究はEA実験を入力値とした河川氾濫モデルの多数アンサンブル実験を行い、2012年にアマゾン川上流で発生した洪水の要因分析を行った。その結果、人為的な地球温暖化が同洪水に35-48%寄与していること、アマゾン上流域で洪水が発生する際には、太平洋北部と大西洋北部における高気圧偏差の卓越と、太平洋や大西洋北部からの水蒸気の流入がカリブ海からアマゾン上流域にかけて収束する傾向にあることが判明した。

Key Words : Event Attribution, global warming, flood, Amazon, AGCM

1. 背景

最新の気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書^①では、地球温暖化の進行により、豪雨や洪水といった極端現象の発生確率が增大する可能性が指摘されている。近年の極端現象についても、すでに温暖化の影響が現れている可能性があることから、過去の極端現象に対する地球温暖化の寄与度を定量的に調べることを目的としたEvent Attribution (EA) という解析手法がPallら^②によって提案された。この手法は、極端現象が観測されたある特定の期間を対象に、境界条件は同一で初期値をわずかに変えた多数のアンサンブル気候実験を行うことで、極端現象の発生確率を求める手法である。近年、大気大循環モデルModel for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC5) Atmospheric General Circulation Model (AGCM) ^③によるEAを目的とした大規模アンサンブル実験が行われ、2010年アマゾンの渇水^④や、2010年パキスタン豪雨^⑤、2010年ロシア熱波^⑥などの要因特定に用いられてきた。

しかし、このEA実験からはMIROC AGCMの出力値、例えば風速や降水量、気温、流出といった大気や陸面の変数は得られるが、MIROC5 AGCMに導入されている河川モデルは比較的簡易に上流からの流出量を積算するものであり、大気大循環や海洋に淡水フラックスを返すという大循環モデルの機能としては十分だが、河川の氾濫を解析する目的に使えるような出力値を得ることができない。そのため、過去の洪水に関する要因特定は、MIROC5 AGCMの降水量を用いた豪雨のEA解析に留まっている。

そこで本研究では、まず、EA実験で得られる陸面流出量を河川氾濫モデルCaMa-Flood^⑦に入力値として与えた大規模アンサンブル実験を行い、近年の河川流量に見られる渇水や洪水に対する地球温暖化の寄与を定量化するためのEA流量データセットを作成した。次に、作成したEA流量データセットを用いて、2012年にアマゾン川上流域で生じた洪水を対象とした要因分析を実施した。2012年にアマゾン川上流で生じた洪水は、2012年4月19日にペルーとブラジルの国境近くのTamshiyacu観測所において1970年以降の観測史上最大の流量 (55,400 m³s⁻¹) を記

録するなど規模の大きい洪水である⁷⁾。Espinozaら⁷⁾は、同地域の過去の洪水は赤道付近の負のSST偏差に関係があること、特に北太平洋、南太平洋、北大西洋、南大西洋の高気圧性の偏差が、北大西洋・カリブ海および南大西洋からアマゾン流域上流部に多量の水蒸気を輸送するというメカニズムがアマゾン上流域に洪水をもたらすと指摘している。そこで本研究では、EA流量データセットを用いて地球温暖化の2012年のアマゾン洪水への寄与度を定量化すると共に、再解析データならびにEA実験の3次元大気データを解析することによって、洪水が生じるような河川流量が多いアンサンブルにおける気圧配置や水蒸気輸送フラックスなどの大気循環場について解析を行い、2012年のアマゾン洪水における気候メカニズムを理解することを試みた。

2. データセット

(1) 再解析データ

アマゾン上流域に洪水をもたらすアマゾン川周辺の大気循環場の特徴を調べるため、National Centers for Environmental Predictionの再解析プロダクト (NCEP)⁸⁾ による3次元の風速、気圧、水蒸気とジオポテンシャル高度のデータを用いた。解析には1958年から2012年までの月平均値を用いて気候値を作成し、気候値からのアノマリーを計算した。空間解像度は水平方向2.5度×2.5度、鉛直方向は17層である。鉛直積算水蒸気フラックスは、1000 hPaから300 hPaまでの積分値とした。

(2) 河川流量データ

モデルによる河川流量の再現性を検証するために、Global Runoff Data Center (GRDC) による Sao Paulo De Olivenca (SPO) 観測所 (図-3、図-4 の×印に位置する) における 1973 年から 2010 年までの河川流量観測データを用いた。GRDC では Tamshiyacu 観測所のデータが無いため、SPO 観測所を用いた。ただし、データが得られたのは 2010 年までのため、洪水時の 2012 年は含まれていない。

(3) MIROC5 AGCMによるEA実験

本研究で用いるEA実験データは、東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構によって開発された大気海洋結合モデルの海洋部分を除く、大気循環モデルMIROC5 AGCM⁹⁾を使用して作成されたもので、対象期間は2010年から2014年、水平解像度は約1.4度、鉛直方向は40層である。AGCMとは、境界条件として海面水温、海水被覆率、外部強制力を与え、力学の基礎方程式及び物理法則に基づいて、地球全体の気圧や風速、気温、降水量などの大気循環場を計算する数値モデルである。

EA実験は、人為起源 (温室効果ガスなど) や自然由来 (太陽放射、火山活動など) の外部強制力と、海面水温ならびに海水分布を境界条件として与えた100メンバーのアンサンブル気候実験で、1つの実験において境界条件は全て同一であり、アンサンブル間の出力値の違いは初期値に与えられる微細な摂動の違いのみから作成される。すなわち、過去に観測された極端現象は、大気のカオス的なふるまいにより現れた1つのアンサンブルにすぎないが、その1つの極端現象が同一の境界条件下でどの程度の確率で現れうるかを、100メンバーの同一境界条件のアンサンブル実験から得ることが可能となる。また、過去の極端現象に人為起源の地球温暖化が与えた影響は、人為起源を含む過去と同一の境界条件をMIROC5 AGCMに与えた「過去再現実験 (ALL)」と、人為起源の影響を除いた境界条件下の「非温暖化実験 (NAT)」を比較することにより定量的に示すことが可能となる。

ALL実験に与える境界条件は、過去の全ての外部強制力 (温室効果ガス、太陽放射の変化、火山活動の影響など) と過去に観測された海面水温及び海水変化である。ALL実験は、人為起源の温暖化の影響が外部強制からの直接影響に加えて海面水温及び海水の変化を通して現れるという仮定に基づく実験であるが、大気観測データをAGCMに逐次入力して同化する再解析実験のように過去の気候をかなり精度良く再現できるわけではなく、例えば海面水温や海水と気候の相関が低い場所では再現性が低い場合があるため注意が必要である。

NAT実験に与える境界条件は、人為起源以外の外部強制力と、海面水温と海水分布から地球温暖化のシグナルを取り除いたものである⁴⁾。ただし、地球温暖化のシグナルを除去する方法の違いによる不確実性を考慮するため、地球温暖化のシグナルをHadISSTの線形トレンドで定義したNAT-dtrとCMIP5マルチモデルhistoricalから定義したNAT-CMIP5の二通りのNAT実験を用いた。

上述のALLとNAT実験 (NAT-dtr, NAT-CMIP5) に加えて、MIROC5 AGCMの気候の再現性の検証と、各実験のアノマリーを作成するための共通の気候値を作成するために、「長期過去再現実験 (ALL-LNG)」も解析に用いた。ALL-LNG実験における境界条件はALLと同一であるが、計算期間は1949年から2013年までであり、アンサンブル数

表-1 使用したEA実験の概要.

	ALL	NAT-dtr NAT-CMIP5	ALL-LNG
期間	2010-2014	2010-2014	1949-2013
外部強制力	全て	自然由来のみ	全て
海面水温・ 海水分布	観測値	観測値からトレンドを除去したもの	観測値
メンバー数	100	100	10

は10メンバーである。以上の各EA実験の概要は、表-1にまとめた。

3. 手法

(1) 河川流量シミュレーション

MIROC5 AGCMのEA実験から得られる日単位の流出量を河川氾濫モデルCaMa-Flood⁹⁾に入力として与えることで、EA流量データを作成した。水平解像度が1.4度×1.4度のMIROC5 AGCMの流出量は、CaMa-Floodの地形データによって流域単位に集計され、0.25度×0.25度ごとの日単位の河川流量が計算される。河川流量シミュレーションの期間ならびにアンサンブル数は、各EA実験の期間ならびにアンサンブル数（表-1）と同一である。

図-1は、アマゾン川のSPO観測所における、観測流量とALL-LNGによる流量データとの比較を示す。ALL-LNG実験は過去再現実験であり、年々の時系列は現実と異なる可能性が考えられることから、過去の年最大日流量の確率分布（PD）ならびに累積分布関数（CDF）を比較した。使用したデータはいずれも1973年から2010年までの年最大日流量であり、ALL-LNGは10メンバーのアンサンブルを全て用いた。

観測とALL-LNG実験のPDならびにCDFを比較すると、ALL-LNG実験の方が少ない流量に対するCDFの裾が広がっている。一方、ALL-LNG実験の1949-2013の年最大日流量の10年確率に相当する82,429 m³s⁻¹以上の洪水をもたらすような極値に関しては、観測とALL-LNG実験の差は相対的に小さい。2012年の洪水時の観測値が得られないため、ALL-LNG実験において10年確率に相当する82,429 m³s⁻¹を閾値として、それ以上の流量を本論文では洪水と定義した。

図-1 アマゾン川のSPO観測所における、観測とALL-LNG実験による1973-2010年の年最大日流量の分布。上が累積分布関数（CDF）、下が確率分布（PD）を示す。ALL-LNGは10アンサンブル全てを用いている。点線はALL-LNGにおいて10年確率に相当する82,429 m³s⁻¹を示す。

(2) 洪水流量に対する地球温暖化の寄与度

過去の極端現象の発生頻度への地球温暖化の寄与度を定量化する方法として、浜口ら⁵⁾を参考に、以下の式で定義されるFraction of Attribution Risk (FAR)³⁾¹⁰⁾の算定を行った。

$$FAR = (P_A - P_N) / P_A \quad (1)$$

ここで、FARは2012年アマゾン洪水に対する地球温暖化の寄与度、 P_A ならびに P_N はALL実験、NAT実験における2012年春の洪水の発生確率である。ただし、ALL-LNG実験による10アンサンブルメンバーの1949-2013の年最大日流量の10年確率に相当する82,429 m³s⁻¹を閾値として、この閾値を超えた場合を洪水の発生と判定した。このFARが正（負）であったときは地球温暖化が洪水の発生を強化（抑制）したということになる。FARがゼロに近い場合は、洪水に対する地球温暖化の寄与度は小さいということになる。

(3) アマゾン上流域で洪水が生じるプロセスの検証

Espinozaら⁷⁾は、2012年4月のアマゾン川の洪水をもたらすメカニズムを説明するため、洪水発生に先立つ2011年10月以降の背景の気候場について再解析データを用いて解析を行った。彼らによると、2011年の10月から12月に赤道付近にSSTの強い負の偏差が発生したことで、南北の太平洋と大西洋に強い高気圧偏差が発生しやすくなり、この高気圧偏差パターンが北大西洋・カリブ海および南大西洋からの水蒸気の輸送をもたらした。アマゾン川の上流部に多くの水蒸気フラックスが流れ込んだために強い降水量偏差をもたらしたことが洪水の原因であると説明している。そこで、本研究のEA実験それぞれにおいて、洪水が発生したメンバーを対象に850 hPaジオポテンシャル高度とアマゾン流域周辺の水蒸気輸送フラックスのコンボジット解析を行い、アマゾンで洪水が発生したメンバーにおけるAGCMの大気循環場について解析した。

4. 結果

(1) 2012年アマゾン洪水に対する地球温暖化の寄与度

各EA実験（ALL実験、二種類のNAT実験、ALL-LNG実験）における、2012年のアマゾン川上流の年最大日流量のCDFを図-2に示す。ALL-LNG実験のCDFよりNAT_dtr、NAT_CMIP5の方が全体的に右に分布していることから、地球温暖化を考慮しなくても2012年の自然の内部変動によって洪水が発生しやすくなっていることが示唆される。また、NAT_dtr実験ならびにNAT_CMIP5実験よりもALL実験が右に分布していることから、2012年の洪水の発生は人為的な地球温暖化により強化されていることが示唆される。

そこで、2012年の洪水に対してFARを適用することにより、地球温暖化の影響の定量化を行った。洪水の発生確率を計算するための閾値は、ALL-LNG実験の年最大日流量の10年確率に相当する、 $82,429 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ とした。(1)式の洪水の発生確率 P は、PDの $82,429 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ より大きい箇所面積として求められる。

図-2 EA流量データから作成した、年最大日流量の分布関数。上が累積分布関数（CDF），下が確率分布（PD）を示す。ALL, NAT-dtr, NAT-CMIP5はそれぞれ100個のアンサンブルメンバーによる2012年の年最大日流量から作成した分布関数，ALL-LNGは10メンバーの1949年から2013年のシミュレーションによる計650個の年最大日流量（ 10×65 年）から分布を作成した。

ALL実験の洪水の発生確率 P_A は17.7%，NAT-CMIP5実験の P_N は9.1%，NAT-dtr実験では11.5%である。これらから式(1)でFARを計算すると、NAT-CMIP5実験はFARが0.48，NAT-dtr実験では0.35という結果となった。この0.48とは2012年にアマゾンで洪水が発生した原因のうち、その48%が地球温暖化に起因するものであるということである。二種類のNAT実験で値が違うのは、地球温暖化のシグナルを定義する際の不確実性を示している。いずれの場合もFARは正であり、2012年のアマゾン上流域の洪水は、人為的な地球温暖化によってその発生確率が強化されたということが言える。

(2) 2012年アマゾン洪水をもたらしたプロセスの解析

次に、2012年4月のアマゾン川上流域の洪水をもたらした大気循環場を解析した。アマゾン川上流域にもたらされた降水が観測地点における河川流量のピークに到達するまでの時間差を考慮して、既往の研究⁷⁾を参考に、洪水発生前の2011年10月から12月の大気循環場について解析を行った。

NCEP再解析データによる850 hPaのジオポテンシャル高度と鉛直積算の水蒸気フラックスを図-3と図-4に示す。いずれの結果も既往研究⁷⁾と一致しており、太平洋北東部・南東部、大西洋北部・南部において、30 mを超える

高気圧偏差が見られ（図-3），速度ポテンシャルの分布からアマゾン川上流域で収束している様子が見られた（図なし）。そのため、カリブ海、太平洋、大西洋南部から輸送された多量の水蒸気がアマゾン上流域にて収束していた（図-4）。

図-3 NCEP再解析データによる2011年10-12月平均の850 hPaにおけるジオポテンシャル高度（m）と風速（m/s）の偏差。×印はSPO観測所の位置を示す。

図-4 NCEP再解析データによる2011年10-12月平均の鉛直積算水蒸気フラックスの偏差（矢印）（ $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ）と収束発散の偏差（ m^1 ，青が収束，赤が発散）。×印はSPO観測所の位置を示す。

EA実験において閾値以上の洪水が発生したメンバーを対象に、図-3と同様の850 hPa高度の合成図を作成したものを図-5に示す。いずれの実験も、太平洋北部と大西洋北部において、30 mを超える高気圧偏差が見られ、図-3と同様の傾向を示した。ただし、図-3で確認された太平洋南部と大西洋南部の高気圧偏差は見られず、代わりに低気圧偏差が卓越していた。さらに、カリブ海を中心に-20 m程度の低気圧偏差が見られた。同様に、洪水が発生したEA実験のメンバーから合成した鉛直積算水蒸気フラックスの分布図を図-6に示す。いずれの実験でも、太平洋や大西洋北部からの水蒸気の流入が認められ、カリブ海からアマゾン上流域にかけて収束していた。

図-5 図-3と同様で上からALL, NAT_dtr, NAT-CMIP5実験の洪水が発生したメンバーにおけるコンポジットを示す。

以上の結果から、太平洋北部と大西洋北部における高気圧偏差の卓越、それに伴う太平洋と大西洋北部から輸送された多量の水蒸気がカリブ海からアマゾン上流域にて収束することがアマゾン上流域の洪水発生に関係していることがわかった。実験間の境界条件の差（温暖化の影響）はコンポジットを取る際のサンプル数（100アンサンブル中、ALLで18, NAT_dtrは9, NAT-CMIP5では10）、すなわち、洪水の発生確率として現れるが、洪水の発生メカニズムはほぼ同じであるといえる。いずれの実験でも境界条件として与えたSSTに2011年の10月から12月に赤道付近で負の偏差があることが、2012年にアマゾンで洪水が発生しやすくなる原因の1つであると思われる。

図-6 図-4と同様で上からALL, NAT_dtr, NAT-CMIP5実験の洪水が発生したメンバーにおけるコンポジットを示す。

5. おわりに

本研究では、EA実験による流出量を入力とした河川氾濫モデルの多数アンサンブル実験を行い、河川洪水に対するEA実験を可能とするEA流量データセットを作成した。同データを2012年アマゾン川洪水の要因分析に適用したところ、境界条件から人為的な影響を除いたNAT実験よりも過去の天候を再現したALL実験による2012年の洪水の発生確率が高く、2012年のアマゾン上流域の洪水には地球温暖化が35-48%寄与していることが判明した。

次に、アマゾン上流域に洪水をもたらした大気循環場を理解するため、再解析データとEA実験の大気場を解

析した。2012年の再解析データと共に、アンサンブルメンバーのうち、ALL-LNG実験における年最大日流量から作成した10年確率流量を超える洪水のメンバーのみを解析したところ、アマゾン上流域で洪水が発生する際には、洪水に先立つ2011年の10~12月に太平洋北部と大西洋北部で高気圧偏差が卓越すること、太平洋や大西洋北部から輸送された多量の水蒸気がカリブ海からアマゾン上流域にかけて収束する傾向にあることが判明した。

本研究は、EA実験を初めて河川洪水に適用した成果である。河川流量は流域の大きさや流域に降る降水の特性によって時間的空間的に降水とは異なるため、豪雨など降水量の解析のみでは洪水の変化特性を適切に把握することができない場合がある。本研究で作成したEA流量データセットは、今回対象とした2012年のアマゾン洪水以外の近年の洪水イベントに対しても適用可能であり、世界の近年の洪水に対する地球温暖化の寄与について理解を深めることに貢献することが期待される。

謝辞：本研究は気候変動リスク情報創生プログラム及び、環境省地球環境研究総合研究費（S-14）の成果の一部である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R. and White, L.L. : IPCC Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group II to the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32, 2014.
- 2) Pall, P., Aina T., Stone, D.A., Stott, P.A., Nozawa, T., Hilberts, A.G.J., Lohmann, D. and Allen, M.R. : Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000, *Nature* 470, 382–385 doi:10.1038/nature09762, 2011.
- 3) Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., Komuro, Y., Watanabe, S., Emori, S., Takemura, T., Chikira, M., Ogura, T., Sekiguchi, M., Takata, K., Yamazaki, D., Yokohata, T., Nozawa, T., Hasumi, H., Tatebe, H. and Kimoto, M. : Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate* 23: 6312–35, 2010.
- 4) Shiogama, H., Watanabe, M., Imada, Y., Mori, M., Ishii, M., and Kimoto, M. : An event attribution of the 2010 drought in the south Amazon region using the MIROC5 model, *Atmos. Sci. Lett.*, DOI:10.1002/asl2.435, 2013.
- 5) 浜口耕平, 今田由紀子, 塩竈秀夫, 鼎信次郎 : Event Attribution 実験を用いた 2010 年パキスタン豪雨の要因特定とプロセスの理解, 土木学会論文集 B1 (水工学), 70, No.4, I_565-I_570, 2014.
- 6) Watanabe, M., Shiogama, H., Imada, Y., Mori, M., Ishii, M. and Kimoto, M. : Event Attribution of the August 2010 Russian heat wave, *SOLA*, 9, 65-68, doi:10.2151/sola.2013-015, 2013.
- 7) Espinoza, J.C., Ronchail, J., Frappart, F., Lavado, W., Santini, W. and Guyoto, J.L. : The major Floods in the Amazonas River and Yributaries (Western Amazon Basin) during the 1970-2012 Period : A focus on the 2012 Flood, *Journal of Hydrometeorology*, 14, 1000-1008, 2013.
- 8) Kalnay, E. et al.: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470, 1996.
- 9) Yamazaki, D., Kanae, S., Kim, H. and Oki, T. : Aphysically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resour. Res.*, 47, 21, 2011.
- 10) Stone, D.A. and Allen, M.R. : The end-to-end attribution problem: from emissions to impacts, *Clim. Change*, 71, 303-318, 2005.

(2016.4.8受付)

AN EVENT ATTRIBUTION OF THE 2012 AMAZON FLOOD

Yuki KIMURA, Masahiro TANOUE, Yukiko IMADA and Yukiko HIRABAYASHI

An Event Attribution (EA) technique using a number of ensemble of past climate by an Atmospheric General Circulation Model (AGCM) have been developed to quantify contribution of human-induced global warming on recent extreme events. Due to the limitation of river models implemented in AGCMs, however, an application of EA is limited in climate variables such as surface temperature and precipitation. We therefore conducted a number of ensemble simulation of river discharge using a river and inundation model forced by runoff obtained from EA experiments and applied to the data to analyze 2012 flood event in Amazon. Result indicated that human influence on climate have increased probabilities of the 2012 flood in Amazon to 35-48%. Analysis of climatic features when flood events in Amazon are observed in the EA experiments suggests that anticyclonic circulation are dominant over North Pacific and North Atlantic from October to December, resulting a strong convergence of humidity around the Caribbean Sea and upper Amazonas basin.