

20 世紀の夏季アフリカの降水変動に及ぼした人間活動の影響

川瀬 宏明・野沢 徹・阿部 学(国立環境研究所)

1. はじめに

観測データと気候モデルを用いた研究から、人為的な温室効果ガスの増加による 20 世紀の気温上昇が指摘されている (IPCC, 2007)。また、陸域の降水量においても、過去の観測データの解析から、両半球中高緯度で増加、北半球低緯度で減少したことが分かっている。Zhang et al. (2008) は気候モデルを用いた 20 世紀気候再現実験の結果を解析することで、20 世紀の降水変化が人為的な要因で起こった可能性が高いことを明らかにした。

北半球低緯度の降水減少の代表として、熱帯アフリカの降水減少が挙げられる (Hoerling et al., 2006; Chappell and Agnew, 2008; Ting et al. 2009)。過去の研究から、熱帯アフリカの降水減少の要因として、南北大西洋の海面水温 (SST) の変動やインド洋の SST の変動が指摘されている (Giannini et al., 2003; Hoerling et al., 2006)。一方、熱帯アフリカの降水減少と人為的な温室効果ガスの増加やエアロゾルの増加との関連を調べた研究も多く存在する (Rotstayn et al., 2000; Takemura et al. 2005; Paeth and Feichter, 2006)。Paeth and Feichter (2006) は産業革命以前の状態を仮定した数値実験を行い、温室効果ガスとエアロゾルの増加がアフリカの気候に与える影響が逆であること、熱帯アフリカの降水減少にはエアロゾルの増加の影響が大きいことを示唆した。Rotstayn et al. (2000) は数値実験から、熱帯アフリカの降水減少がエアロゾルの増加による南北半球間で不均質な SST の低下によって起こった可能性を指摘した。

熱帯アフリカの降水減少に関しては多くの議論がなされているが、人為的な影響との関連やメカニズムに関してはまだ理解が不完全である。東京大学気候システムセンター (CCSR)、国立環境研究所 (NIES)、地球環境フロンティア研究センター (FRGC) によって開発された全球大気海洋結合モデル (MIROC) では、20 世紀再現実験に加え、人為強制力と自然強制力を個別に与えた複数の実験を実施している (Nozawa et al., 2005)。本研究では、これらの実験結果を解析し、温室効果ガスやエアロゾルの増加が熱帯アフリカの降水に及ぼした影響を調査し、そのメカニズムを考察する。

2. 観測された熱帯アフリカの降水変化

20 世紀の熱帯アフリカの降水減少を確認するために、次の 3 種類の観測データを用いた。The Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)、The Global Historical Climatology Network (GHCN)、The Climate Research Unit (CRU)。

表 1 に 3 種類の観測データから得られた 1902 年から 1998 年の熱帯アフリカの年降水量と、季節別降水量の長期トレンドを示した。降水量は図 1 の黒線で囲まれた領域の陸域で平均している。3 種類のデータのいずれも年降水量の減少を示しており、GHCN と GPCC は t 検定で有意水準 1%、CRU は有意水準 5% で有意な降水減少トレンドが確認された。季節別にみると、夏季の降水減少トレンドが顕著であり、すべての観測データで有意水準 1% で有意な減少トレンドを示した。

表 1: 熱帯アフリカの降水トレンド

	CRU	GHCN	GPCC
Annual	-0.119	-0.158	-0.144
DJF	-0.088	0.061	-0.023
MAM	-0.019	-0.040	-0.108
JJA	-0.333	-0.461	-0.312
SON	0.003	-0.093	-0.132

*太字は t 検定で有意水準 1%、斜体は 5% で有意なトレンドを示す。

CRU の観測データから得られた熱帯アフリカの 1961-1990 年の平均夏季降水量と、1902 年から 1998 年の夏季降水トレンドを図 1 に示す。赤道付近に帯状に降水量の多い領域が見られ、熱帯収束帯 (ITCZ) に対応している (図 1a)。降水減少は主に熱帯アフリカの北半球側で観測され、ギニア湾の周辺と熱帯アフリカの東部で顕著に見られる。

観測された熱帯アフリカの夏季降水量の時系列 (点) とトレンド (直線) を図 2a に示す。期間の前半は観測データ間のばらつきや年々のばらつきが大きいですが、いずれのデータも減少トレンドを示した。1920 年から 1935 年と 1940 年から 1960 年にかけては、降水量が増加した時期があり、数十年規模の変動が見られる。

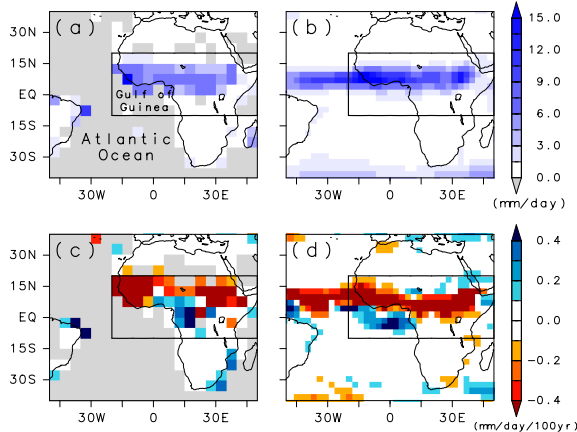


図 1: (a,b) アフリカの夏季平均降水量 (1961 年から 1990 年) と (c,d) 長期トレンド (1902 年から 1998 年) . (a,c) CRU の観測データ . (b,d) FULL 実験の結果 .

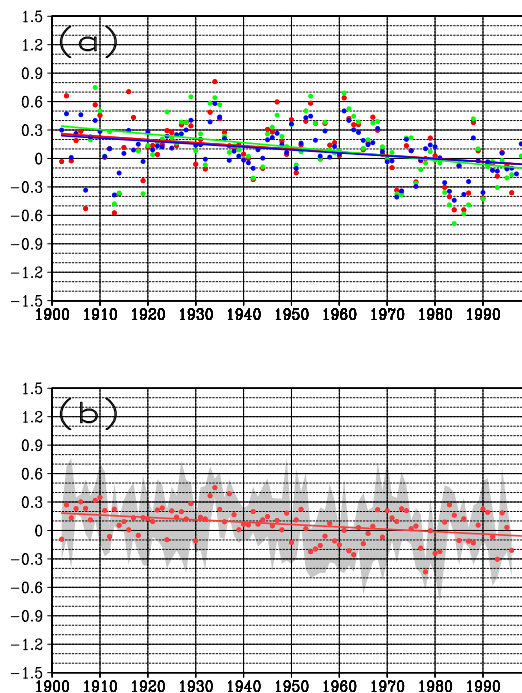


図 2: 図 1 の黒線で囲まれた領域の陸域で平均した夏季降水量の時系列と線形トレンド . 1961-1990 年の平均値で標準化している . (a) 観測データ . 赤が CRU , 緑が GHCN , 青が GPCC を示す . (b) FULL 実験の結果 . 赤丸は 4 アンサンブル平均した降水量 , シェイドはアンサンブル間の最大値と最小値の幅を示す .

3. モデルで再現された 20 世紀の降水量の変化

3.1 実験設定

数値モデルとして , CCSR/NIES/FRCGC で共同開発された MIROC version 3.2 中解像度版 (T42) を用いた . MIROC は複数の自然強制力と人為強

制力を外部強制力として与えることで 20 世紀の気候を再現している . またこれらの外部強制力を個々に与えた実験も行っている . すべての自然強制力と人為強制力を考慮した FULL 実験 (20 世紀再現実験) . 自然強制力のみを考慮した NTRL 実験 . 人為強制力のみを考慮した ANTH 実験 . 人為的なエアロゾルの変化のみを考慮した ARSL 実験 . 人為的な温室効果ガスの増加のみを考慮した GHGS 実験 . オゾンの変動のみを考慮した OZON 実験 . いずれの実験も , コントロール実験の異なる初期値を用いた 4 本のアンサンブル実験を行っており , 以後の結果は 4 本のアンサンブル平均値を示す .

3.2 再現された 20 世紀の降水変化

FULL 実験は , 観測された熱帯アフリカの夏季降水の分布や絶対値をよく再現している (図 1b) . また , 観測された熱帯アフリカの夏季降水減少トレンドも再現されていた (図 1d) . 図 2b に FULL 実験で再現された熱帯アフリカの夏季降水の時系列 , 及び線形トレンドを示す . 観測データと同様の降水減少トレンドが再現されており , モデルの年々変動の幅も観測の年々変動の幅とほぼ同等であった . 一方 , 観測で見られた数十年規模の変動は FULL 実験では再現されなかった .

表 2 に異なる外部強制力を用いた感度実験の結果を示す . 人為強制力のみを与えた ANTH 実験では , FULL 実験と同様に降水減少トレンドが見られたが , 自然強制力のみを与えた NTRL 実験では有意なトレンドは見られなかった . 人為強制力をさらに細かく分けた実験の結果を見ると , ARSL 実験では有意な降水減少トレンドが現れたが , GHGS 実験と OZON 実験では降水減少トレンドは現れなかった . 逆に GHGS 実験では弱い増加トレンドが見られた . ゆえに , 熱帯アフリカの 20 世紀の降水減少トレンドは , 人為的なエアロゾルの増加に大きな影響を受けたことが示唆される . 一方で , 温室効果ガスの増加やオゾンの変動の影響は小さいと考えられる . これは過去の研究とも整合する .

4. 考察

Chou et al. (2009) の手法に従って , 水蒸気の連続の式を鉛直積算した水収支式から降水量の変化要因を調査した . 水収支式の各変数を基本場成分と変化成分に分けることで , 降水量の変化を次のように近似して表すことができる .

表 2: 異なる外部強制力を用いた実験によって再現された熱帯アフリカの降水トレンド

	FULL	NTRL	ANTH	ARSL	GHGS	OZON
Annual	-0.175	-0.010	-0.167	-0.301	0.110	-0.051
JJA	-0.215	0.067	-0.260	-0.326	0.042	-0.051

*太字は t 検定で有意水準 1% , 斜体は 5% で有意なトレンド示す .

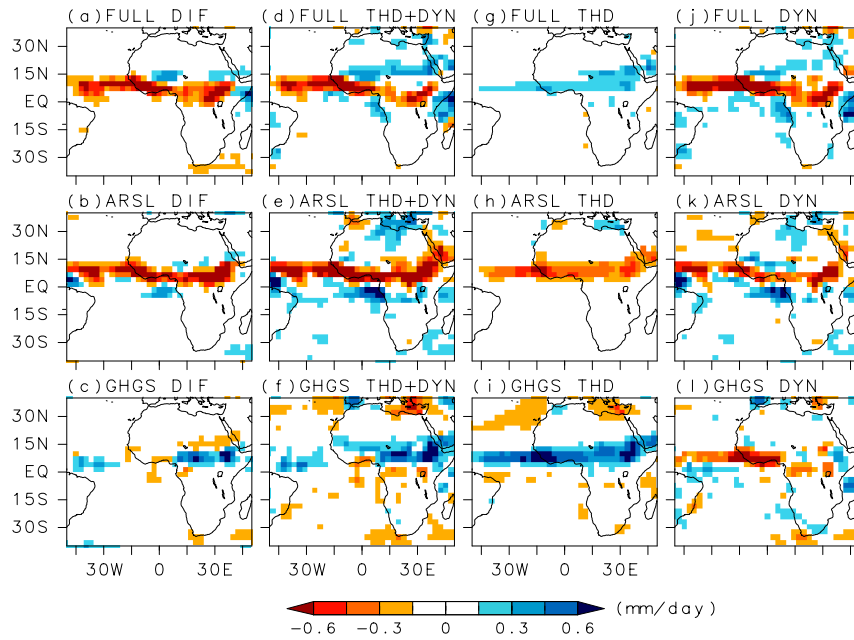


図 3: アフリカにおける 20 世紀初頭 (1901 年から 1920 年) と 20 世紀末 (1981 年から 2000 年) の夏季降水量の差 (a-c) . 水収支式から見積もった力学的効果と熱力学的効果の和 (d-f) , 熱力学的効果 (g-i) , 力学的効果 (j-l) .

$$\langle \partial_t q \rangle + \langle \mathbf{v} \cdot \nabla q \rangle + \langle \omega \partial_p q \rangle = -P + E \quad (1)$$

$$P' \approx -\langle \bar{\omega} \partial_p q' \rangle - \langle \omega' \partial_p \bar{q} \rangle - \langle \mathbf{v} \cdot \nabla q' \rangle + E' \quad (2)$$

ここで $\langle \rangle$ は鉛直積分 , $(\bar{\quad})$ は基準値 , $(\quad)'$ は変化成分を表す . P は降水量 , ω は鉛直流 , q は比湿 , \mathbf{v} は水平風 , E は蒸発を表す . 変化成分には , 20 世紀の熱帯アフリカの降水トレンドと同様の变化を示した 20 世紀初頭 (1901-1920) と 20 世紀末 (1981-2000) の差を用いる . (2) 式の右辺第一項と第二項は鉛直積算した鉛直水蒸気移流の変化による降水量の変化 , 第三項は鉛直積算した水平水蒸気移流の変化による降水量の変化 , 第四項が蒸発の変化による降水量の変化である . 鉛直流が卓越する夏季熱帯アフリカでは , (2) 式の右辺第一項と第二項が大きい . 図 3a-f をみると , 第一項と第二項の和により見積もった降水量変化は , P' と同様の傾向を示しているのがわかる . 本研究ではこの 2 つの項に注目する . ここで , 水蒸気の変化に起因する第一項を熱力学的効果 , 鉛直流の変化に

起因する第二項を力学的効果と呼ぶ . FULL 実験と ARSL 実験 , GHGS 実験で見られた降水変化を , 熱力学的効果と力学的効果に分けることで , 降水変化のメカニズムを考察する .

熱力学的効果と力学的効果による降水変化を図 3g-l に示す . 熱力学的効果に伴う降水変化は , FULL 実験と GHGS 実験では増加傾向 , ARSL 実験では減少傾向を示した (図 3g-i) . 一方 , 力学的効果は , FULL 実験 , GHGS 実験 , ARSL 実験ともに熱帯アフリカで降水減少を示した (図 3j-l) . 特に FULL 実験で大きな降水減少が見られる . ARSL 実験では熱力学的効果 , 力学的効果ともに降水量が減少しており , 結果的に大きな降水減少となった . GHGS 実験では , 熱力学的効果による降水増加と力学的効果による降水減少とが打ち消し合い , 西アフリカでは変化が小さかった (図 3f) . 東アフリカでは熱力学的効果が大きく , 降水がやや増加している . FULL 実験では熱力学的効果は降水増加に働いているが , 力学的効果は大きな降水減少に働き , 全体としては降水減少となった . 言い換え

ると、FULL 実験は温室効果ガスの増加に伴う降水変化に、エアロゾルの増加の効果が加わることで、熱力学的効果としての降水増加が弱められる上、力学的効果による降水減少がさらに強められ、結果的に大きな降水減少が見られたといえる。

熱力学効果による降水変化は、気温変化に伴う大気中の水蒸気量の変化に起因する。気温が上昇すると下層ほど水蒸気が増加するため、 $\partial_p q'$ が正となる。熱帯アフリカのような鉛直流の気候値が上昇流となる場所では、 $-\langle \bar{\omega} \partial_p q' \rangle$ が正になり、熱力学的効果は降水増加に働く。20 世紀に気温が上昇した FULL 実験と GHGS 実験では、熱力学的効果で降水量が増加した。一方、ARSL 実験では、エアロゾルの直接効果と間接効果により気温が減少し、熱力学的効果として降水の減少に働いた。

これに対し力学的効果は (2) 式からも分かるように下降流偏差と関連する。図 4 に 700hPa 鉛直風と 925hPa の水平風、および SST の 20 世紀初頭と 20 世紀末の差を示す。鉛直流の変化を見ると、いずれの実験においても、熱帯アフリカで下降流偏差、つまり上昇流の弱まりが見られた。これが降水減少と対応している。GHGS 実験では 925hPa で南大西洋に低気圧性偏差が見られ、南大西洋の高気圧性循環の弱まりを示唆している。高気圧性循環の弱化に伴い、南大西洋から熱帯アフリカへの湿潤空気の流入が弱まり、熱帯アフリカでは相対的に発散場、下降流偏差となったと考えられる (図 4a)。上層の速度ポテンシャルの解析から、全球規模の循環場の変化が南大西洋の高気圧性循環の弱まりに影響したとみられるが、これに関してはさらなる解析が必要である。

一方、ARSL 実験の循環場は、エアロゾルの増加に伴う大西洋 SST 変化の局所性的影響を受けていると考えられる。20 世紀の初頭と 20 世紀末の SST の差を見ると、北大西洋では南大西洋に比べて、SST が相対的に大きく低下している。これに対応する形で、北大西洋で下降流偏差、南大西洋で上昇流偏差がみられる。赤道域では SST 変化の南北傾度が特に大きく、ギニア湾周辺で SST の低下が小さい領域で上昇流偏差、SST の低下が大きい領域で下降流偏差がみられる (図 4b)。

FULL の循環場の変化は、温室効果ガスの増加に伴う大規模な循環場の変化 (図 4a) と、エアロゾルの増加に伴う南北大西洋間の温度変化の違いによる循環場の変化 (図 4b) の重ね合わせによって生じたと考えられるが、各実験における力学的効果

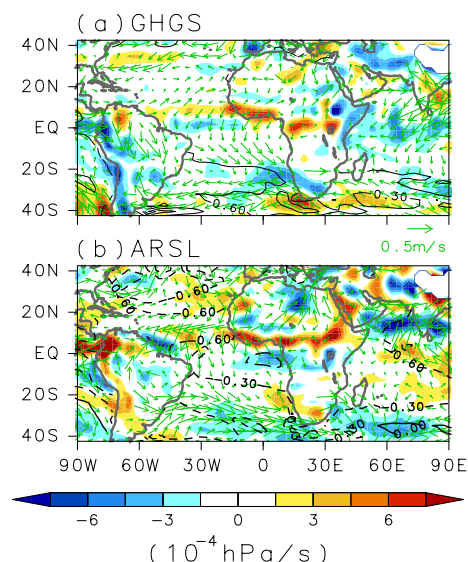


図 4: 700hPa 鉛直風 (シェイド) と 925hPa の水平風 (ベクトル)、および SST (等値線) の 20 世紀初頭と 20 世紀末の差。(a)GHGS 実験、(b)ARSL 実験。

の要因に関しては、さらなる調査が必要である。

5. 結論

MIROC の 20 世紀再現実験と複数の外部強制力を個別に与えた感度実験を解析した結果、熱帯アフリカの 20 世紀の夏季降水減少が、20 世紀のエアロゾルの増加の影響を受けた可能性が高いことが示された。さらに、水収支式の各項診断により、降水の変化要因を熱力学的効果と力学的効果に分けて考察したところ、20 世紀のエアロゾルの増加は熱力学的効果、力学的効果の両方で降水減少を示し、結果的に大きな降水減少となったと考えられる。一方、温室効果ガスの増加は、熱力学的には降水が増加する一方、力学的には降水が減少し、結果として両者が打ち消しあい、降水変化は小さくなったと考えられる。これら両方の効果の入った 20 世紀再現実験は、熱力学的効果としては降水がやや増加、力学的効果としては降水が大きく減少し、結果的に降水が減少したことが分かった。熱力学敵効果による降水変化要因は、気温変化に伴う水蒸気量の変化に依存すると考えられる。一方、循環場の変化と関連する力学的効果には、その変化要因にまだ不明瞭な点が残されており、さらなる解析が必要である。

謝 辞

本研究は文部科学省 21 世紀気候変動予測革新プ

プログラムの支援により実施された。図の作成には地球流体電脳ライブラリを用いた。

参考文献

- Chappell, A., and C. T. Agnew, 2008: How certain is desiccation in west African Sahel rainfall (1930-1990)?, *J. Geophys. Res.*, **113**, D071111, doi:10.1029/2007JD009233.
- Chou, C., J.D. Neelin, C.A. Chen, and J.Y. Tu, 2009: Evaluating the "rich-get-richer" mechanism in tropical precipitation change under global warming, *J. Climate*, **22**, 1982-2005.
- Giannini, A., R. Saravanan, and P. Chang, 2003: Oceanic forcing of Sahel rainfall on inter-annual to inter-decadal time scales, *Science*, **302**, 1027-1030.
- Hoerling, M., J. Hurrell, J. Eischeid, and A. Phillips, 2006: Detection and attribution of twentieth-century northern and southern African rainfall change, *J. Climate*, **19**, 3989-4008.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007), *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by S. Solomon et al., 996 pp, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.
- Nozawa, T., T. Nagashima, H. Shiogama, and S. A. Crooks, 2005: Detecting natural influence on surface air temperature change in the early twentieth century, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20719, doi:10.1029/2005GL023540.
- Paeth, H., and J. Feichter, 2006: Greenhouse-gas versus aerosols forcing and African climate response, *Climate Dyn.*, **26**, 35-54.
- Rotstayn, L. D., B. F. Ryan, and J. E. Penner, 2000: Precipitation changes in a GCM resulting from the indirect effects of anthropogenic aerosols, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 3045-3048.
- Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima, and T. Nakajima, 2005: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model, *J. Geophys. Res.*, **110**, D02202, doi:10.1029/2004JD005029.
- Ting, M., Y. Kushnir, R. Seager, and C. Li, 2009: Forced and internal twentieth-century SST trends in the North Atlantic, *J. Climate*, **22**, 1469-1481.
- Zhang, X., F. W. Zwiers, G. C. Hegerl, E. F. Lambert, N. P. Gillett, S. Solomon, P. Stott, and T. Nozawa, 2007: Detection of human influence on twentieth century precipitation trends. *Nature*, **448**, 461-465.