# 平成 27 年度 卒業論文

# 赤道アフリカの乾燥化が駆動する 亜熱帯アフリカの多雨

# Heavy rain in subtropical Africa driven by drought in equatorial Africa

# 三重大学 生物資源学部

共生環境学科 自然環境システム学講座

気象・気候ダイナミクス研究室 512395

### 田川 侑季

# 指導教員 立花義裕教授

#### 概要

近年,地球温暖化の影響は深刻である.その影響は1970年代から顕著に現れており, 北半球と南半球では,その進行が異なることが知られている.中でもアフリカは砂漠化や 洪水などその影響を大きく受けている地域の一つである.

現在,アフリカの降水量に関する研究は数多く存在するが、特にサヘル地域へ着目した ものが多い.これは,サヘル地帯は砂漠化が深刻であるといわれているにも関わらず近年 降水量が増加しているためである.例えば,サヘルの長期的な降水量変動は全球の海洋上 における蒸発が影響しているという研究がある.

しかし、同じアフリカの中でも降水量の長期変化には大きな違いがある.このことに着 目しその変化の原因を明らかにすることを本研究の動機とした.以上のことから、本研究 では赤道アフリカの降水量減少に着目し,南半球の亜熱帯アフリカの多雨との相互関係につ いて解明することを最終目的とした.

そこで、本研究では 1970-1984 年までを過去、2000-2014 年までを現在と設定し 15 年平 均の現在と過去の比較を行った.また、赤道アフリカに着目した降水量インデックスを作 成し、相関回帰を行った.

その結果, 亜熱帯アフリカ付近での SST 上昇が原因で上昇気流が活発になり低気圧が強 化されることが示唆された. この低気圧の強化によって水蒸気フラックスが亜熱帯アフリ カから赤道アフリカまで流入しづらくなることから亜熱帯アフリカでは降水量が増加し, 赤道アフリカでは降水量が減少したことが示唆された.

2

目次

概要	
第1章 序論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
第2章 解析期間と使用データ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
2-1 NCEP/NCAR 再解析データ	
2-2 JERA-55	
2-3 HadISST データ	
2-4 ジオポテンシャル高度	
2-5 潜熱	
2-6 水蒸気フラックス	
第3章 解析手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3
3-1 15 年平均	
3-2 相関回帰	
第4章 解析結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
4-1 15 年平均結果	
・降水量	
<ul> <li>気温</li> </ul>	
・ジオポテンシャル高度,風速	
• SST	
<ul> <li>         ・潜熱         </li> </ul>	
・水蒸気フラックス	
4-2 相関回帰	
・降水量	
<ul> <li>気温</li> </ul>	
・ジオポテンシャル高度,風速	
• SST	
• 潜熱	
・水蒸気フラックス	
第5章 考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・25	
謝辞	

#### 第1章 序論

近年,地球温暖化により世界各地の砂漠化が深刻である.中でも砂漠化が顕著な地域の 一つにアフリカが挙げられる.現在アフリカの降水量の増減に関する研究が存在する.特 にサヘル地帯(Fig.1)は,地球温暖化による砂漠化が深刻であるといわれているにも関わら ず,近年降水量が増加しているという点から注目されており,多くの研究がなされてい る.



Fig.1 サヘル地帯



その一つに[Diawara et al., 2015]による長期的な降水量変動は全球の海洋上における蒸発 に影響されるという研究がある.

また、サヘル地帯の降水量の増加には大西洋数十年規模振動(Atlantic Multidecadal Oscillation : AMO)が影響しているといわれている[Mohino et al., 2011].

AMO とは、北大西洋の平均海面水温が 60~100 年程度の周期で上昇、下降を繰り返す 変動のことである[Kerr, 2000]. 水温の観測データでは 2 周期程度の変動しか確認できてい ないが、数値モデルによる数百年のシミュレーションでも AMO が再現されており、長期 間に渡って持続的に存在する変動であると考えられている[Knight et al., 2005]. そのため、 AMO は大西洋に近い南北アメリカ大陸や、ヨーロッパ、アフリカに直接影響が表れると 考えられている.



Fig.2 2000-2014 の 15 年平均と 1970-1984 の 15 年平均の降水量差 [mm/day]

しかし, Fig.2 に示すように, サヘル地帯以外にも南半球亜熱帯アフリカの降水量の増加 が, 赤道アフリカでは降水量の減少が確認された. このような赤道アフリカの降水量減少 に関する研究は, [Nozawa et al.,2010]のように熱帯北アフリカ全体を対象として行われてい る. しかし, 南半球亜熱帯アフリカの降水量増加との関係性を示した研究例はない.

そのため、本研究では、熱帯北アフリカ全体の降水量減少を対象とするのではなく、赤 道アフリカと亜熱帯アフリカの降水量増減のコントラストが見られることに注目した.そ してこの2つの地域を対象地域とし、両地域における降水量増加・減少について調査し、 この変化の原因を明らかにすることを本研究の動機とした.

#### 第2章 解析対象と使用データ

本研究では、対象領域はアフリカ大陸を含む、南緯40°から北緯40°,西経20°から 東経50°とした.解析期間は地球温暖化の影響が顕著に現れ始めた1970年から2014年を 対象とする (Fig.3).また、降水量を考える際に、赤道アフリカと亜熱帯アフリカの雨季 は異なるため、双方の雨季を考慮した1月から6月の半年間を対象とする (Fig.4).

上記の解析期間において使用したデータを、2-1 章から 2-3 章にて説明する.



Fig.1 1940-2014 地球温暖化による全球の気温変化 [℃] (赤線:1940-1970までのトレンド・1970-2015までのトレンド)(気象庁のデータ使用)



Fig.4 a)赤道アフリカの雨季,b)亜熱帯アフリカの雨季 (1982 年から 2012 年の月別平均)(引用元:<u>http://ja.climate-data.org/</u>)

#### 2-1 NCEP/NCAR 再解析データ

NCEP/NCAR 再解析データ [Kanlay et al, 1996] とは (National Center for Environmental Prediction /The National Center for Atmospheric Research Reanalysis)を指し、再解析データは、1948 年から現在までのデータである.水平解像度が 2.5 度×2.5 度の気圧座標系を用いた. 鉛直方向 17 等圧面における月平均データを使用した. 期間は 1970 年~2014 年までの1月から6月の平均データを使用した.NCEP/NCAR のデータには物理量は多数あるが、本研究では Reanalysis1 にあるジオポテンシャル高度・風速・気温・比湿の 1970 年~2014年までの1月から6月の6ヶ月平均データを使用した.また、本研究では南緯40°から南緯40°, 西経20°から東経50°を研究対象領域とした.参考として、以下に2000 年6月の月平均ジオポテンシャル高度を示す (Fig. 6).



#### 2-2 JRA-55

気象庁 55 年再解析データ(JRA-55)[Kobayashi et al. 2015]は,過去半世紀以上(1958~2015年)の気候変化をより高精度に解析することを目的とした気候データセットのことであり,過去の客観解析データを統一的な手法にもとづいて再解析したデータセットである. この JRA-55 は,緯度・経度 1.25 度グリッドで全球をカバーする各種気象要素データを含んでいるが,本研究では,総降水量のデータを降水量として使用した. また,本研究では南緯40°から南緯40°,西経20°から東経50°を研究対象領域とした. 期間は1970年~2014年までの1月から6月の平均データを使用した. 例として,以下に2000年6月の月平均降水量を示す (Fig. 7)



#### 2-3 HadISST データ

HadISST(Hadley Center Sea Ice and Sea Surface Temperature data sets)は、英国ハドレーセン ターによって作成された海氷量と海面水温のデータセットである[Rayner et al.2003]. 水平 グリッド間隔は1度×1度であり、1870年から現在に至るまでの月別データである. 近年 は、AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)や SSM/I(Special Sensor Microwave / Imager)による衛星データと IABP(International Arctic Buoy Programme)などによる漂流ブイデ ータをブレンドしている. 本研究では、海面水温の月平均データを使用している. 期間は 1970年~2014年までの1月から6月の平均データを使用した. 例として、以下に2000年 6月の月平均の SST を示す (Fig.8).



Fig.8 2000 年 6 月の月平均 SST[℃]

#### **2**-4 ジオポテンシャル高度 (Geopotential hight)

ジオポテンシャルとは、地球上にある場所の高度を示す指標であり、単位質量を平均海 面からその高度まで引き上げるために必要な仕事量で示す.つまり、位置エネルギーを質 量で割った値と等しい.地球の平均海水面を基準として、鉛直方向で計算をする.

$$\phi = \int_{0}^{z} g dz \tag{1}$$

φ:ジオポテンシャル z:高度 g:重力加速度

また、ジオポテンシャル $\varphi$ を標準重力加速度 $g_0$ で割った量をジオポテンシャル高度Z と定義する.

$$z \equiv \frac{\varphi}{g_0} = \left(\frac{1}{g}\right) \int_0^z g \, dz \quad (2)$$

対流圏での重力加速度gは、標準重力加速度goの値とほぼ一定である.また、ジオポテンシャル高度Zと通常の高度zもほぼ一致する.そのため、ジオポテンシャル高度を使用した.

#### 2-5 潜熱フラックス (Latent heat flux)

潜熱は物体の状態や組成を変化するときに必要とされる熱エネルギーのこと.水蒸気フ ラックスに蒸発潜熱係数をかけたものである.また,潜熱フラックスは潜熱の単位面積・時 間あたりの通過量を示す.

#### 2-6 水蒸気フラックス (Moisture flux)

全体の水蒸気の輸送を考えるため、quと qv を鉛直積分(1000-500hPa) する.

$$Mflux = \frac{1}{g} \int_{500}^{1000} qudp$$
(3)

$$Mflux = \frac{1}{g} \int_{500}^{1000} qv dp$$
 (4)

#### 第3章 解析手法

#### 3-1 15年平均

本研究では、降水量が比較的多かった 1970 年からの 15 年間(1970-1984 年)を過去, 降水量が減少した 2000 年からの 15 年間(2000-2014 年)を現在と設定した(Fig.1).この 2 つの期間の降水量をそれぞれ 15 年平均し,比較することでアフリカの降水量の変化を評 価した.また,降水量の変化の原因を探るため,過去から現在にかけての大気場の変化を SST・ジオポテンシャル高度・風速・潜熱フラックスから評価する.



Fig.1 赤道アフリカの降水量の領域平均(1970-2014)[mm/day]

#### 3-2 相関回帰

過去と現在で降水量減少が顕著な赤道アフリカに着目し、この領域(東経 10~17 度、北 緯 0~7 度)を平均した赤道アフリカ降水量 index を作成した.また、赤道アフリカの降水 量の変化と大気場の関係性を評価するため、赤道アフリカ降水量 index と対象期間の年平 均の降水量・ジオポテンシャル高度・気温・SST などそれぞれの変数で同時回帰を行っ た.トレンドは除去していない.この結果を、15 年平均の比較と照らし合わせ、赤道アフ リカと亜熱帯アフリカの降水量の変化の関係性を探る.

# 第4章 解析結果

#### 4-1 15 年平均の比較

#### 降水量

過去と現在で降水量を比較すると(現在と過去の差),(Fig.1)より赤道アフリカでは降水量が減少し, 亜熱帯アフリカでは降水量が減少している.



気温

気温の比較(Fig.2)では、アフリカで全体的に気温が上昇している.また、北半球・南 半球とも亜熱帯アフリカで気温が低下している.これは、降水量が増加している地域と対 応しているようにも見て取れる.



#### ジオポテンシャル高度・風速

ジオポテンシャル高度と風の 15 年平均の 1000hPa 面の比較である(Fig.3). この差を見ると, 亜熱帯アフリカ付近で低気圧傾向になっている. また、低気圧が強化されたことから, 亜熱帯アフリカに流入する西風が強化されていることも確認できた.







(Fig.3)15 年平均風速・ジオポテンシャル高度 現在(左)過去(右)差(下) [m/s][m] SST

(Fig.4) より,SST はアフリカ全体で上昇している.特に亜熱帯アフリカ付近では,1 度以上上昇している.それに比べ,赤道アフリカでは亜熱帯アフリカほどのSSTの上昇は 見られなかった.



#### 潜熱フラックス

潜熱フラックスによる上方への熱輸送を見てみると(Fig.5),赤道アフリカ付近の海洋 上では潜熱フラックスが減少しており,SSTが上昇していた亜熱帯アフリカ付近で増加し ている.



#### 水蒸気フラックス

(Fig.6)より,水蒸気フラックスは,赤道アフリカに流入する水蒸気フラックスが過去から現在にかけて減少し,亜熱帯アフリカへの流入は増加している.また,比較をした差の図を見ると亜熱帯アフリカで水蒸気フラックスの収束が見られた.



#### 4-2 相関回帰

#### 降水量

赤道アフリカの降水量の変化と亜熱帯アフリカの降水量変化に関係性があるかを評価するため、赤道アフリカ降水量 index を用いて同時回帰を行った(Fig.1).赤道アフリカ降水 量が減ったときの結果を考察するため、以下、これらの図は index の正負を入れ替えている.

その結果,赤道アフリカの降水量の減少と亜熱帯アフリカの降水量の増加に関係がある ことが示唆された.



年平均の SST と赤道アフリカの領域平均を行った降水量 index との同時回帰では,15年 平均の差と同様に亜熱帯アフリカ付近で SST の上昇が確認できた(Fig.2).また,赤道ア フリカよりも亜熱帯アフリカで SST の上昇が大きい.



(Fig.2)シェード:有意水準 90%以上, コンター:回帰係数, 1000hPa 面 赤道アフリカ降水量 index と SST

#### ジオポテンシャル高度

次に、赤道アフリカにおける領域平均の降水量 index と 1-6 月の平均の 1000hPa 面のジ オポテンシャル高度を同時回帰させると、赤道アフリカ・亜熱帯アフリカともに低気圧が 強化されていることが見て取れた(Fig.3).特に亜熱帯アフリカの方がより低気圧が強化 されている



(Fig.3)シェード:有意水準 90%以上, コンター:回帰係数, 1000hPa 面 赤道アフリカ降水量 index とジオポテンシャル高度

#### 潜熱フラックス

低気圧の強化について整合性を確認するため、赤道アフリカ降水量 index と潜熱につい ても同時回帰を行ったところ、赤道アフリカ・亜熱帯アフリカともに潜熱フラックスが増 加している (Fig.4).



(Fig.4)シェード:有意水準90%以上、コンター:回帰係数、1000hPa面 赤道アフリカ降水量 index と潜熱

#### 水蒸気フラックス

赤道アフリカ降水量 index と年平均の水蒸気フラックスの同時回帰を行った(Fig.5). すると, 亜熱帯アフリカから赤道アフリカに向かう水蒸気フラックスが減少していることが確認された. また, 亜熱帯アフリカ沿岸部で海からの水蒸気フラックスが収束していることも見て取れた.



(Fig.5)シェード:有意水準 90%以上,コンター:回帰係数,1000hPa 面 赤道アフリカ降水量 index と水蒸気フラックス

#### 第5章 考察・まとめ

15年平均の比較(期間:1970-1984 と 2000-2014)また相関回帰の結果から、赤道アフリカの降水量の減少している時に、亜熱帯アフリカでは降水量が増加しているということが示唆された.そのため、赤道アフリカと亜熱帯アフリカの降水量の変化に関係性があることが判明した.

この原因の一つとして地球温暖化による SST の上昇が挙げられる.15 年平均の比較により,過去から現在にかけて約1度亜熱帯アフリカ付近で SST が上昇していることが確認できた.



SST の上昇から、この付近で上昇気流が活発になるということが考えられる.また、熱の 上方への輸送を確認するため、潜熱フラックスを確認すると過去から現在にかけて増加し ていることが確認できた. このことから, SST の上昇により上昇気流が活発化することで亜熱帯アフリカで低気圧 が強化されたと考えられる.この低気圧強化により,亜熱帯アフリカで降水量が増加した と考えられる.



また,赤道アフリカの降水量減少の原因は,低気圧の強化により,亜熱帯アフリカから 赤道アフリカに輸送される水蒸気の流入が減少したことによるものと考えられる.

結論として、赤道・亜熱帯アフリカの降水量の変化は熱帯アフリカ付近の SST の上昇に よる直上の低気圧の強化と関連することが示唆された.また、赤道アフリカと亜熱帯アフ リカで降水量の変動の間にはこの低気圧を通して相互関係があることが示唆された.

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり,立花義裕教授には気象に関する専門知識だけでなく,解析方 法、発表の仕方など丁寧にご指導いただきましたこと,大変感謝しております.また,特 定事業研究員の山崎孝治氏,小寺邦彦氏には,研究へのさまざまなアドバイスだけでな く,気象学に関する知識を学ばせていただき,心より感謝申し上げます.

自然環境システム学講座の先生方には合ゼミでご指導いただき,さまざまな視点の専門的 な授業で多くの知識を学ばせていただきました.また,気象・気候ダイナミクス研究室の みなさまには,研究内容について相談にのっていただき,プログラムの組み方から要旨の 添削,大変お世話になりました.研究に携わっていただいたすべての皆様に,深甚の感謝 の意を表します. Diawara, A., Y. Tachibana, Y. Oshima, K. Nishikawa, and Y. Ando, 2015: Synchrony of trend shifts in Sahel summer rainfall and global oceanic evaporation, 1950–2012, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, **12**, 11269-11289, DOI:10.5194/hessd-12-11269-2015.

Kalnay, E. et al., 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471, DOI:10.1175/1520-0477(1996)077,0437:TNYRP.2.0.CO;2.

Kerr, R. A. (2000) : A North Atlantic climate pacemaker for the centuries; Science, **288**, 1984–1985. DOI: 10.1371/journal.pone.0100306

Knight, J. R., R. J. Allan, C. K. Folland, M. Vellinga and M. E. Mann, 2005 : A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate; Geophys. Res. Lett., **32**, L20708. DOI:10.1029/2005GL024233, 2005

Kobayashi, S., Y. Ota, Y, Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan.*, **93**, 5-48, DOI:10.2151/jmsj.2015-001.

Mohino, E., S. Janicot, and J. Bader 2011: Sahel rainfall and decadal to multi-decadal sea surface temperature variability; Clim. Dyn., **37**, 419-440. DOI:10.1007/s00382-010-0867-2

Nozawa,T. et al., 2010 : Geophysical Research Letters, **37**, L09706, DOI:10.1029/2010GL043038

Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent, and A. Kaplan, 2003: Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century . J. Geophys. Res, **108**, 4407, DOI:10.1029/2002JD002670.