

近年の農業気象災害に係る総観・グローバルの視点

山川修治

(日本大学文理学部・自然科学研究所上席研究員；気象予報士)

1. はじめに

世界の平均気温が 2024 年 5 月まで 12 か月連続して記録更新、地球の気候は未知の領域に入ったようだ。筆者は、1990 年 10 月に農林水産省・農業環境技術研究所に地球温暖化を見据えて発足した地球環境研究チームに加わった。間もない 1991 年「野菜の不作・高騰」、1993 年「大冷害」など、農業気象災害が相次ぐ時代であった。農環研任期の後半、地球温暖化対策、環境保全、永続的農業に重点を置いた『環境アグロ情報ハンドブック』³²⁾の執筆機会に恵まれた。26 年を経過したが、今日の SDGs (持続可能な達成目標)に通じる具体策、アイガモ農法 (近年、カモはロボットも登場)、天ぷら油の燃料再利用 (当時はトラクター限定、近年は航空燃料 SAF にも活用) など成果を挙げ、ドローンの普及もあり、時の流れを感じる。激しい気候変動⁴²⁾の時代を迎え、近年の農業気象の動向をみていこう。

2. 近年の気象災害の動向

2.1 地球温暖化禍中の豪雨災害

地球温暖化は気象に多大な影響を及ぼしている。IPCC 等で示されているように、温暖化は対流圏と海洋表層で進行しているが、成層圏では低温化傾向がみられ、対流圏界面が上昇傾向で、対流圏の積雲対流活動の活発化、積乱雲 (Cb) の雲頂高度の上昇に繋がる。近年の豪雨多発の背景には、対流圏気温の上昇による飽和水蒸気量の増大、海面水温 (SST) の上昇による蒸発量の増大、水循環の活発化がある。平均地表気温が 1°C 上昇するごとに水循環は 2.6% 強まる¹²⁾。

異常気象の多くには、近年、ブロッキング高気圧 (BH) と寒冷渦 (CV; 反時計回りの循環) が共通要因として係わっている。ここでは梅雨季初期・晩期の 2 事例を挙げる。2019 年 5 月 18 日、屋久島豪雨²⁶⁾が起きた。梅雨前線は南西諸島北部に位置した。その北東側にはオホーツク海から南下した高気圧 (1032hPa) があり、700hPa で Ω 型 BH を呈し、東シナ海北部に南下した CV をほぼ停滞させた。前線の北側からは湿潤な東風、南側からは高温多湿な南西風が入り対流不安定³¹⁾ (相当温位が下層ほど大) となり、豪雨を発生させた。

2019 年 7 月 4 日の球磨川豪雨は、極東に居座る BH 西側を CV が梅雨前線北縁となる黄海西岸まで南下したことと、北太平洋高気圧の西を巡る縁辺流「大気の河」により生じた。東シナ海南部の暖水域 (SST: 約 28°C; 平年より 1~2°C 高い) が水蒸気の供給源となった。西南西-東北東走向の「線状降

水帯」を構成、地形効果により、Cb の雲頂高度は 14~15km に達し、豪雨を生じた。なお、近年注目されようになった「線状降水帯」に関して、温暖化以前の 1982 年 7 月 23~24 日の長崎豪雨の事例においては「線状降水系」として認識されていた¹⁹⁾。

台風と秋雨前線の相互作用による豪雨の典型例としては、2000 年 9 月 11~12 日の東海豪雨が挙げられる。ポスト La Niña のもと、南岸に停滞する秋雨前線に台風 14 号東側のアウトバーンドが掛り引き起こされた。近年の降水激化のメカニズムにシーダー・フィーダー相互作用 (SFI)¹⁴⁾の関与が指摘された。2013 年 26 号台風接近時の伊豆大島豪雨は、明瞭な気温の南北勾配をなす沿岸前線²⁷⁾に伴い SFI が発生した。台風に伴う Cb と前線に伴う乱層雲 (Ns) などの相互作用は注目に値する。

ブラジルでは 2023 年 9 月から中北部やアマゾン川流域では厳しい熱波・旱魃が続き、森林火災もあったが、2024 年 4 月末~5 月上旬には、南部リオグランデス州ポルトアレグレで豪雨・大洪水・土砂災害が起きた。El Niño 末期に東西の亜熱帯高気圧からの気流が平年⁴⁰⁾より強く収束、南米収束帯 (SACZ) が発達、南極大陸からの寒気、寒冷前線テイル³⁷⁾が作用、Cb 群が発達した。米・大豆・トウモロコシ、ブドウ (収穫期前なら損害甚大) の主産地で、大被害が生じた。

2.2 冷害の背景を探る

1993 年には低温・日照不足による大冷夏が日本を襲った。内嶋善兵衛会長・編集長のもと『平成の大凶作』¹⁸⁾が緊急出版された。このような際立った事例発生時に特集として学会誌あるいは単行本にて纏めることは、将来を見据えて意義深い。

遡ること 2 年、1991 年 6 月 15 日、フィリピン Pinatubo 火山が大噴火した (VEI³³⁾: 6)。成層圏へ噴煙が注入、到達高度は約 40 km に及んだ。成層圏の東風 (S3.2) に乗ったエアロゾルは高緯度方面へ拡散、1991/92、1992/93 年の冬季に、エアロゾル総量が 2 極大を示した (高緯度ほど後者大)。そしてパラソル効果が進行、北極点では平年比 -8°C の北極寒気団が対流圏上部~成層圏下部に出現した。1993 年春のオゾン層破壊や、1993 年春~秋の El Niño の影響も加わり、日本は大冷夏^{33, 34, 36)}になった。オホーツク海高気圧 (近年 SST 上昇で減少傾向) が優勢な OSH 型冷害、および CV が優勢な CV 型冷害が共に現れ、梅雨明けなし、夏のない年となった。全国平均作況指数は 74³²⁾、北日本で皆無作地域も多い。急遽、タイ米が輸入された。

その 10 年後、2003 年には、ヨーロッパは数 1000 年に一度の記録的猛暑に見舞われた。対照的に、日本では 10 年ぶりの冷夏となった³⁸⁾ (全国平均作況指数: 90)。

2024 年 5 月下旬に、オホーツク海の SST が平年を下回るようになった。OSH 出現の懸念が生じ、油断大敵といえる。

<https://agrmet.jp/wp-content/uploads/2024-H-3.pdf>

2024 年 6 月 5 日 受付

Copyright 2024, The Society of Agricultural Meteorology of Japan

2.3 進行する異常高温と旱魃

高温・旱魃の具体例は近年枚挙にいとまがない。大冷夏の翌年1994年の異常高温は群を抜いていた。その要因としては、①1993年に弱かったチベット高気圧が1994年には発達、東西に張り出した(成層圏準2年周期振動QBOも関与; §3.2³⁵⁾)。②フィリピン近海のSST上昇(93年末~95年夏: ENSO中立のLa Nada³⁵⁾; §2.4), PJパターン²⁰⁾(フィリピン付近で上昇, 北北東方で下降, 小笠原高気圧が北偏強化)。③そして①・②高気圧のオーバーラップ現象が起きた。異常高温年(6~8月日本平均), 1994, 2010, 2023年には, 同様の気候系が認められる。

2023年夏, 北・東日本をはじめ全国的猛暑に見舞われた。本学会では, 井上 聡 氏主宰のシンポジウム「東北地方の気候変動と農業気象災害の現状・対策」が実施され, 有意義な議論が展開された。日本(特に北日本)では背の高い高気圧の下降流場となり, 1898年観測開始以来最高の気温が8月に北日本を中心に観測された。2023年は初めLa Niñaで, 春以降El Niñoへ急変した。夏にも南西諸島東方のSSTは高温を維持, Cbが発達, 7月下旬~8月上旬の台風5・6・7号後, PJパターンが数100km北偏して現れた。チベット高気圧は東縁部の北日本上空で派生的に発達, 対流圏北太平洋高気圧と順圧構造を示した。平均場でみて, 夏季モンスーンはインド北部へ進入, ヒマラヤ山脈南麓での上昇流によりCb群が発生, 降水を生ずる。その上昇流はチベット高原上空に達し, 猛暑夏にはチベット高気圧が卓越, 時計回りに大循環し, 東アジアで下降, 断熱昇温する。このような循環を「モンスーンアジアスケールのフェーン現象」⁴²⁾とみなせば, 日本の猛暑を理解できる。2023年には猛暑によるイネ高温不稔⁴⁷⁾, 果樹の高温障害(例: 山形県サクランボ「双子果」多発)等が発生, 北日本の農作物に後遺症が残った。加えて, 冬の小雪が農業用水の不足をもたらした。

2.4 台風を取り巻く環境場

台風の経路はENSO (El Niño/Southern Oscillation) によって影響を受ける⁴³⁾。El Niño時の9~11月には, La Niña時に比べ, 南東側のマリアナ近海で発生しやすく, 発達しながら西北北西へ進行後, 台湾東方沖で転向し, 日本付近を東北東へ進むものが多い。一方, La Niña時には, フィリピン東方で発生, 急発達しながら日本付近へ進むものもある。

Pinatubo噴火とEl Niñoが重なった1991年9月27~28日, 「リング台風」で知られる台風9119号は, 対馬暖流沿いに北東進し, 青森県のリングが多数落下, 以降, 防風ネットが普及した。有明海干拓地では, 高潮発生, 潮風の吹走で水稲300(ヒノヒカリ)に塩害が起きた⁴⁴⁾。その他, 塩害台風3事例を挙げる。①1999年9月24日台風18号(大潮と満潮2時間前で不知火高潮発生; 山口市秋穂二島で堤防決壊により水稲約100haが塩害^{4, 45)}), ②2004年8月20日台風15号(19日に対馬海峡を北東進し青森県に上陸; 秋田県金浦町で稲が塩風害で皆無作地も¹⁵⁾), ③2018年9月30日台風24号(東海・関東地方南部で塩風害)。以上4事例の総観場には, 北方にCVがあり台風がその方向に進み, 風台風になったという共通点がみられた。

2019年15号台風^{5, 39, 46)}は, 風台風の典型で, 「危険半円」

に入った房総半島が激しい風害を受けた。千葉市で最大瞬間風速57.5m/sを記録, 多地点で観測史上最大の風速となり, 農作物等全国被害額(A)745.3億円, 農地・農業用施設等全国被害額(F)は19.4億円に上った²²⁾。一方, 同年19号台風^{5, 39)}は, 雨台風の典型で, SFIが指摘された。Aは404.4億円, Fは2101.3億円にも達した²²⁾。

2024年夏~秋は, ポストEl Niño (PEN)となる。かつてPENからLa Nadaへ移行中に大災害を起した2台風がある。①伊勢湾台風(1959年9月26日): 前年夏までEl Niñoで, 日本における最悪の台風災害となった(929hPaで潮岬付近に上陸, 60km/hで北北東進, 高潮; 犠牲者: 5101名)。②2019年台風15・19号(9・10月): 同年春までEl NiñoでLa Nadaへ移行。それに対して, 春までEl Niño, 夏にLa Niñaへの急転事例としては, 2010年10月台風14号(年間台風発生14個と史上最少)が挙げられ, 秋雨前線との相互作用により奄美豪雨が生じた。

2.5 農業にとって脅威となる降雹²⁵⁾

以前に比べ昨今, 内外を問わず, 降雹が頻発している。2014年6月24日の三鷹降雹は, 最大径は3cm強に及び, 30cmもの積雹があった²³⁾。850hPa解析図では, 日本東方約5000kmの東太平洋にΩ型BHが出現, 沿海州~日本海北部(*)~オホーツク海にCV群をほぼ停滞させ, その(*)南方約500kmの地域で降雹が起きた。

2024年4月16日, 兵庫県南部でゴルフボール大の降雹となった。沿海州にCVがあり, そこから南へ伸びるトラフに沿う雲バンドが通過する直前の現象だった。トラフの南(東)縁部はCb群が集中的に発達(当例では東へ向うテーパーリングクラウド[毛筆状雲]が出現), 降雹が起きやすく要注意といえる。

大規模降雹には次の背景が考えられる。①北極圏へBHが張出し, その西側を北極海周辺で発生したCVが南下する。②CVの南東側へ下層暖湿気流が進入, 対流不安定化, Cb発生契機となる。③対流圏中上層の気温-15°C以下, 圏界面以下の気層「雹形成可能層」が厚くなり, 上下運動を繰り返すうちに雹が成長する。④エアロゾルの増加とも関連する。

2.6 初冬の寒波と晩冬の南岸低気圧で短時間に積もる雪

日本海のSSTが高い11~12月に寒波が襲来すると, 日本海側で豪雪になる。2020年12月16日09時, シベリア高気圧(1052hPa)・アリューシャン低気圧(968hPa)の気圧差は84hPa, 日本付近の気圧傾度は約2hPa/100kmに達した。日本海中央部500hPaで-40°Cに低下, SSTとの差は50°Cに及んだ。水分の多い雪が急速に積もり, 車両が立往生, 物流が滞った。

太平洋側では, 晩冬季の南岸低気圧で短時間に積雪をみることがある。2014年は関東甲信地方の2回(2/8, 2/14)の大雪で, 農作物(例: イチゴ・ブドウ・トマト・キュウリ⁸⁾)や農業施設(ビニールハウス等)に被害が生じた。BHの性質を帯びた三陸沖移動性高気圧からの北東冷気流と, 関東地方内陸部の滞留寒気層cold air damming²⁾からの寒気流の役割が注目される。

3. 広域からみた異常気象の要因

3.1 海洋からの影響

農業国際化の時代に、食料自給率の低い(2022年度カロリーベース38%)日本では、グローバル気象の把握は必須となる。

まず太平洋に着目すると、1996年12月に東アジアのコールドサージ(寒波)、西太平洋赤道沿いの西風バーストが発生し、1997~98年のEl Niño Event¹¹⁾に至った。El Niño最盛期1997年7月には、北太平洋高気圧が東北東偏し、小笠原方面への張り出しを強め、その西側の縁辺流が、インド洋からのモンスーンと収束、日本付近で梅雨前線が活発化、豪雨をもたらした。

ENSOと主要穀物生産高との関係について、近年、有効な成果が得られた。El Niño/La Niña年の偏差、および年偏差に基づき、世界の主要穀物(大豆・トウモロコシ・米・小麦)生産高の地域性が示された^{6, 21)}。関連して、El NiñoとLa Niñaの中間的存在で、熱帯太平洋中央部でSSTが正偏差となるCP-Niño²⁴⁾、太平洋10年規模振動(PDO^{16, 35)})、レジームシフト等³⁵⁾の導入で、より有益な生産予測に繋がる可能性がある。

2017年8月に始まった黒潮大蛇行は2024年5月現在、6年10か月継続(史上最長)、大きな影響を気候にもたらしている。高SSTの秋に寒波が到来すると、可降水量が増加しやすい⁴¹⁾。気圧配置の観点では、気圧の谷型が真夏を除き増加傾向となる。2020年頃から北日本の東西にSSTの高偏差域が現れ、その要因と農業への影響解明が不可欠である。

インド洋ダイポールモード(IOD)は、インド洋SST偏差が西[東]高・東[西]低のときに正[負]となる。2022年7月頃には、IOD負フェイズのもと、マダガスカル島南方500hPaにBHが現れ、地上の南インド洋マスカリン高気圧も例年より西偏、モンスーンがアフリカ側に偏移、パキスタン豪雨⁴²⁾の一因となった。

MJO(Madden-Julian Oscillation)^{13, 35)}はインド洋から太平洋西部にかけての暖水域に現れる季節内振動(30~60日周期)として捉えられ、赤道に沿って東進する。1998年El Niño Eventの終了過程で、MJOがその進行を加速させた²⁸⁾。また、2004年の台風日本上陸10個にもMJOが関与した¹⁷⁾。

近年、注目を集めている北極海では、10月に関しては2007年が史上最小の海氷面積となった(2023年まで更新されず)。ユーラシア大陸沿岸で海氷融解が進み、海面からの潜熱・顕熱で低気圧が発生、上層の極渦と連動、上空に寒気を伴うCVを形成した。2008年1月には、シベリア高気圧が南偏、華中・華南から東シナ海、日本南岸で前線・低気圧が活発化、華中や日本南岸で大雪となった(MJO関与の可能性も)。春先に大雪が降れば、ビニールハウス等の農業施設に被害が及ぶ。2024年5月の令和野菜高騰は2月高温後の3月低温が響いた。

3.2 成層圏からの影響

チベット高気圧の東西張り出しは、成層圏QBOが鍵を握る。QBOと猛暑等には関係がみられ^{7, 33)}、熱帯成層圏最下層で東[西]風時には、チベット高気圧が東西伸長型[セル型]傾向で、日本で猛暑夏[不順な夏]となりやすい。大冷夏の1993年は西風、翌94年は東風だった(他事例でもほぼ該当)。QBOには周期性があり、季節予報への活用、精度向上に有効と考えら

れる。

3.3 火山大噴火のインパクト

小氷期(ca.14~19世紀)は、火山活動活発化と低調な太陽活動により世界的に低温傾向だった。日本ではOSHの出現頻度が高く、冷夏・飢饉の発生が相次いだ。小氷期を含む気候変動研究は屋久島などの年輪分析³⁵⁾、桜の開花¹⁾等で進んでいる。

2022年1月15日には、南太平洋のトンガ諸島の海底火山Hunga-Hunga Ha apai(21°N-175°W)が大噴火した(VEI:5.7)。大気圏に入った水蒸気量³⁾は146±5Tg(T:tera=10¹²);本来大気に含まれる量の10%に達した。水蒸気は温室効果ガスの一種^{9, 29)}で、大気による温室効果の寄与率は、水蒸気が約6割とCO₂の約3割を凌ぐ¹⁰⁾。水蒸気の大気中での滞留時間は約2週間¹²⁾だが、中間圏まで到達した多量の水蒸気はどのような振舞いをみせるのだろうか。温暖化促進が憂慮される。地球温暖化モデルでは、人為起源の温室効果ガスが主体で、自然変動する水蒸気は対象外とされてきた。しかし、Tonga噴火のような突発的水蒸気注入に直面すると、再検討を要す。温暖化時代にあっても、巨大噴火が起これば冷害に繋がりがうことはPinatubo噴火が証明した。20世紀に比べ火山の活発化傾向もみられ、その気候への影響についての的確に評価すべきである。

4. まとめ

①強度のENSOに伴う気象災害が顕在化している。ポストEl Niño期に顕著な台風災害が散見される。

②対流圏高温化、成層圏低温化、圏界面の上昇、Cbの雲頂高度上昇で豪雨の危険度が高まっている。

③SST上昇は水蒸気量増大、対流不安定、豪雨・水害に至る。北日本東西の暖水域は、豪雨発生確率を高め、農業被害が心配である。黒潮大蛇行・海洋熱波など海洋環境に注視したい。

④北極海海氷減少は気候系に多大な影響を及ぼしている。

⑤多くの天候異変に、Ω型BHとCVが係っている。前線帯が波動し偏西風がBH型になると、異常気象の危険度が増す。寒冷前線通過前に高温多湿(風下ではフェーンで高温乾燥)、前線通過時に暴風・風向急変、気温低下と激変する。CV南下は、豪雨・降雪を励起する。温暖期の大雪は農業へ大打撃を与える。雨雪判別の精度向上が望まれる。

⑥Pinatubo大噴火(1991年)は気候系に作用し、1993年大冷夏に至った。同規模以上の噴火があれば、警戒を要す。

5. 今後の課題

①ENSOに伴う世界の農業生産については、主要作物に加え、輸入に頼る多品目(カカオ・コーヒー豆、バナナ、オリーブオイルなど)に関する検討が望まれる。今後の極端気象を念頭に、高耐性の品種評価と育成は大きな課題といえる。

②農業被害の統計が地域・災害別に蓄積されている。それを全国的に統合、さらに世界を含む農業気象災害データベースを長期的に構築できれば、今後の対策に役立つ。激動の時

代を迎え、過去から学ぶ温故知新も重要な視座となる。

③ Tonga 海底火山噴火 (2022 年 1 月) は大量の水蒸気を放出、「地球による大実験」が進行中で、気象・気候への影響の継続的検証が必要である⁹⁾。海底火山は地球火山の約 70% を占め、トンガ諸島から南方のケルマデック諸島 (2012 年 Le Havre 噴火は既知の最大級) は世界中で最も海底火山活動が活発である。その熱源、暖水の移動等、関連研究の進展が待たれる。

④ 両極端な異常気象頻発の時代に入り、迅速で的確な情報提供^{30, 32)} が期待される。ALOS-4 (だいち 4 号) など衛星データの活用などは、農林水産分野で計り知れない可能性を秘めている。

謝辞

様々な気象災害に遭遇し、総観・グローバル気象気候学的探究に努めてきました。2024 年 3 月 15 日、貴学会より永年功労賞とフェロー称号授与の名誉に浴しました。ご推薦いただいた町村 尚先生、井上 聡理事、吉本真由美理事をはじめ、関係各位に感謝申し上げます。農環研時代 (1990~1999 年) の庶務幹事の折は皆様に大変お世話になりました。周囲の先生方、同僚、後輩の皆様、妻により支えられ研究人生を歩んでこられたことに心より感謝いたします。貴学会がこの激動の時代に安心・安全で持続的な農業・食料生産に多大な貢献されていることに敬意を表します。今後のさらなるご発展をお祈り申し上げます。

引用文献

- 1) 青野靖之, 2014: 古気候における天気ならびに植物季節的記録を用いた気候復元手法の確立. 2011 ~ 14 年度科学研究費補助金基盤研究 (C), 265p.
- 2) 荒木健太郎, 2019: 2014 年 2 月の関東甲信地方大雪事例における総観・メソスケール環境場. 気象研究ノート **240**, 299-321.
- 3) Basha G, Ratnam MV, Kumar AH, Jiang JH, Babu SR, Kishore P, 2023: Impact of Hunga-Hunga Ha'apai volcanic eruption on stratospheric water vapour, temperature, and Ozone. *Remote Sensing* **15**(3602), 1-16.
- 4) 早川誠而・張 継権・山本晴彦・鈴木賢士・林 泰一・小野本敏, 2001: 1999 年台風 18 号による西日本の農業被害. 農業気象 **57**(1), 61-67.
- 5) 平井史生, 2019: (速報) 令和元年の風水害—暴風台風 15 号と大雨 19 号. 第 71 回気候影響利用研究会予稿, 22-23.
- 6) Iizumi T, Luo JJ, Challinor AJ, Sakurai G, Yokozawa M, Sakuma H, Brown ME, Yamagata T, 2014: Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. *Nature Communications* **5**, 3712.
- 7) 井上 誠・山川修治, 2010: 成層圏 QBO とアジア域降水活動との関係. 地学雑誌 **119** (通巻 1030), 441-450.
- 8) 井上 聡・小南靖弘・根本 学, 2014: 2014 年 2 月大雪の農業影響. 北海道の雪氷 **33**, 37-144.
- 9) Jucker M, Lucas C, Dutta D, 2024: Long-term climate impacts of large stratospheric water vapor perturbations. *Journal of Climate*, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0437.1>.
- 10) 環境省 Web-site, 2008: 温室効果のメカニズム. <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/stop2008/06-07.pdf>
- 11) 気候影響利用研究会編, 1999, 2002: エルニーニョと地球環境; エルニーニョ・ラニーニャ現象 — 地球環境と人間社会への影響. 成山堂, 東京, 257p., 253p.
- 12) 真鍋淑郎・Broccoli, A.J.; 増田耕一・阿部彩子・宮本寿代 訳, 2022: 地球温暖化はなぜ起こるのか — 気候モデルで探る過去・現在・未来の地球. 講談社, 東京, 309pp.
- 13) Madden RS, Julian PR, 1971: Detections of a 40-50 day Oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.* **28**, 702-708.
- 14) 三隅良平・清水慎吾・出世ゆかり, 2016: 2013 年台風 26 号に伴う伊豆諸島の大雨—レーダーで観測された降雨の特徴について. 防災科研主要災害調査 **50**, 19-34.
- 15) 三田舜一・星崎和彦・佐々木佳明・蒔田明史・小林一三, 2004: 2004 年 15 号台風による塩害が秋田県の樹木に与えた影響. 秋田県立大学 Web-site, <https://www.akita-pu.ac.jp/bioresource/DBE/img/typhoon.pdf>
- 16) 宮本大輔・山川修治, 2018: 太平洋十年規模振動 (PDO) と総観気候系との関係. 日大文理学部自然科学研紀要 **53**, 163-175.
- 17) Nakazawa T, 2006: Madden-Julian oscillation activity and typhoon landfall on Japan in 2004. *SOLA* **2**, 136-139.
- 18) 日本農業気象学会, 1994: 平成の大凶作. 農林統計協会, 東京, 234p.
- 19) 二宮洗三, 2018: 1982 年 7 月 23-24 日の九州豪雨を伴った梅雨前線低気圧の事例解析 II 低気圧内の小規模循環系. 天気 **68**(11), 575-590.
- 20) Nitta Ts., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan* **65**, 373-390.
- 21) 西森基貴, エルニーニョ・南方振動 (ENSO) とその影響. 山川修治・江口 卓・高橋日出男・常盤勝美・平井史生・松本 淳・山口隆子・山下脩二・渡来 靖 編: 図説 世界の気候事典. 朝倉書店, 東京, pp.257-259.
- 22) 農林水産省関東農政局 Web-site, 2020: <http://www.maff.go.jp/kanto/kihon/kikaku/meguji/index.html>
- 23) 尾花麻美・山川修治・佐野清文・曾 平統, 2015: 2014 年 6 月 24 日三鷹降雹についての総観メソ解析. 気候影響利用研究会会報 **37/38**, 27-30.
- 24) 小櫃美月・山川修治・井上 誠, 2016: CP/EP エルニーニョにおける梅雨季の循環場と大雨に関する相関解析. 気候影響利用研究会会報 **39/40**, 5-9.
- 25) Omoto Y, 1967: Characteristics of hailstorms in Japan. *J. Agric. Meteorol.* **23**(3), 115-121.
- 26) 佐野清文・山川修治, 2020: 2019 年 5 月 18 日に屋久島で発生した集中豪雨についての総観解析. 日大文理学部自然科学研紀要 **55**, 37-49.
- 27) 高橋日出男・瀬戸芳一, 2016: 台風 1626 号による伊豆大

- 島災害時における降水の時間推移. 第 64 回気候影響利用研究会予稿, 10-11.
- 28) Takayabu YN, Iguchi T, Kachi A, Shibata A, Kanzawa H, 1999: Abrupt termination of the 1997-98 El Niño in response to a Madden-Julian oscillation. *Nature* **402**, 279-282.
- 29) Tinny EN, Homeyer CR, 2023: Climatology, sources and transport characteristics of observed water vapor extrema in the lower stratosphere. *Atmos. Chem. Phys.* **23**, 14375-14392.
- 30) 浦野慎一・山川修治・文字信黄・小林哲夫・大槻恭一・平野高司・町村尚・上村賢治・鈴木晴雄・谷宏・蔵田憲次・干場信司・箕輪雅好, 2009: 生物環境気象学. 文永堂, 東京, 285 pp.
- 31) Watanabe H, Ogura Y, 1987: Effects of orographically forced upstream lifting on mesoscale heavy precipitation: a case study. *J. Atmos. Sci.* **44**, 661-675.
- 32) 山口武則・山川修治・大浦典子, 1998: 環境アグロ情報ハンドブック. 古今書院, 東京, 258 pp.
- 33) 山川修治, 1997: 1991年ピナトゥボ大噴火とその後の冷夏・暑夏との関連性. 気象研究ノート **189**, 153-164.
- 34) Yamakawa S, 1997: The impact of the Pinatubo eruption on global and regional climatic systems. *J. Agric. Meteorol.* **52**(5), 713-716.
- 35) 山川修治, 2005: 季節・数十年スケールからみた気候システム変動. 地学雑誌 **114**(3), 460-484.
- 36) Yamakawa S, Ohyoshi T, 2005: Atmospheric conditions of the Northern Hemisphere in spring followed by unusual cool summers focusing on stratospheric Ozone depletion and cold vortices. *J. Agric. Meteorol.* **60**(5), 913-916.
- 37) Yamakawa S, Suppiah R, 2008: Extreme climatic events in recent years and their links to large-scale atmospheric circulation features. *Global Environmental Research* **13**(1), 69-78.
- 38) 山川修治, 2017: 2003年ヨーロッパの異常高温現象. 山川修治・常盤勝美・渡来靖編: 気候変動の事典. 朝倉書店, p 173.
- 39) 山川修治, 2020: 令和元年の台風 15 号, 19 号. ブリタニカ国際年鑑 2020, 135-137.
- 40) 山川修治・松本 淳, 2022: 世界における各月の地上総観気候. 山川修治ほか編: 世界の気候事典, pp.4-7.
- 41) 山川修治, 2023: 風の視点からみた伊豆諸島の気象災害. 鈴木毅彦・市古太郎編著: 伊豆諸島の自然と災害. 古今書院, 東京, pp.116-137.
- 42) 山川修治, 2023: 2022年における世界的な極端気象のシステムに関する総観解析. 日大文学部自然科学研紀要 **58**, 63-84.
- 43) 山川修治・岡口柊太・三隅良平, 2024: 台風に関するエルニーニョ/ラニーニャ現象別の総観気候学的解析. 日大文学部自然科学研紀要 **59**, 19-32.
- 44) 山本晴彦, 1992: 1991年台風 17・19号による九州の農業災害. 農業気象 **48**(1), 77-83.
- 45) 山本晴彦・岩谷 潔・鈴木賢士・早川誠而・鈴木義則, 2000: 1999年台風 18号による九州・山口地方の農業災害の概要と水稲塩害の実態. **69**(3), 424-430.
- 46) 横山 仁・飯塚 聡・鈴木真一・清水慎吾, 2019: 台風 15号による農業気象災害の概要. 日本農業気象学会関東甲信越支部 2019年度例会一般講演要旨集 **16**, p 15.
- 47) 吉本真由美・戸田悠介・長谷川利拓, 2024: 気候変動と近年の猛暑によるイネ高温不稔の定量的評価. 日本作物学会第 257 回講演会要旨集, p 187.