

極端な気象に対する気候変動の影響を解析した事例

(1) 平成 30 年 7 月豪雨

平成 30 年 7 月豪雨（前線及び台風第 7 号による大雨等）

【気象庁 HP 災害をもたらした気象事例】

<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180713/20180713.html>

「平成 30 年 7 月豪雨」及び 7 月中旬以降の記録的な高温の特徴と要因について

【平成 30 年 8 月 10 日 気象庁 報道発表】

<https://www.jma.go.jp/jma/press/1808/10c/h30goukouon20180810.html>

地球温暖化が近年の日本の豪雨に与えた影響を評価しました

【令和 2 年 10 月 20 日 気象庁気象研究所、東京大学大気海洋研究所、国立環境研究所、海洋開発研究機構、(一財)気象業務支援センター 共同プレスリリース】

https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R02/021020/press_021020.html

気象庁気象研究所、東京大学大気海洋研究所、国立環境研究所及び海洋研究開発機構の研究チームは、文部科学省「統合的気候モデル高度化研究プログラム」の一環として、最新の数値シミュレーションを用い、平成 29 年 7 月九州北部豪雨及び平成 30 年 7 月豪雨に相当する大雨の発生確率に地球温暖化が与えた影響を定量的に評価することを初めて可能にしました。

この結果、上記 2 事例における大雨の発生確率は、地球温暖化の影響がなかったと仮定した場合と比較して、それぞれ約 1.5 倍および約 3.3 倍になっていたことが示されました。

(2) 平成 30 年夏の記録的な高温

7 月中旬以降の記録的な高温と今後の見通しについて

【平成 30 年 7 月 23 日 気象庁 報道発表】

https://www.jma.go.jp/jma/press/1807/23a/20180723_kouon.html

「平成 30 年 7 月豪雨」及び 7 月中旬以降の記録的な高温の特徴と要因について

【平成 30 年 8 月 10 日 気象庁 報道発表】

<https://www.jma.go.jp/jma/press/1808/10c/h30goukouon20180810.html>

平成 30 年 7 月の記録的な猛暑に地球温暖化が与えた影響と猛暑発生の将来見通し

【令和元年 5 月 22 日 気象庁気象研究所、東京大学大気海洋研究所、国立環境研究所、(一財)気象業務支援センター 共同プレスリリース】

https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R01/010522/press_010522.html

気象庁気象研究所、東京大学大気海洋研究所、国立環境研究所の研究チームは、平成 30 年 7 月の記録的な猛暑に対する地球温暖化の影響と猛暑の発生回数の将来見通しを評価しました。

その結果、工業化以降の人為起源による温室効果ガスの排出に伴う地球温暖化を考慮しなければ、昨年のような猛暑は起こりえなかったことが明らかになりました。また、工業化以降の世界の気温上昇が 2 度に抑えられたとしても、国内での猛暑日の発生回数は現在の 1.8 倍となると推定されました。

(3) 令和元年東日本台風

令和元年東日本台風（台風第 19 号）による大雨、暴風等（速報）

【気象庁 HP 災害をもたらした気象事例】

<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2019/20191012/20191012.html>

令和元年台風第 19 号に伴う大雨の要因について

【令和元年 12 月 24 日 気象庁 お知らせ】

<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohokaisetu/T1919/mechanism.pdf>

近年の気温上昇が令和元年東日本台風の大雨に与えた影響

【令和 2 年 12 月 24 日 気象庁気象研究所、(一財)気象業務支援センター 共同プレスリリース】

https://www.mri-jma.go.jp/Topics/R02/021224-1/press_021224-1.html

気象庁気象研究所の研究チームは、数値シミュレーションを行い、人為起源の温室効果ガス排出の増加等に伴う気温及び海面水温の上昇が、令和元年東日本台風（台風第 19 号）に伴う関東甲信地方での大雨に与えた影響を評価しました。

この結果、1980 年以降、また、工業化以降（本研究では 1850 年以降としています）の気温及び海面水温の上昇が、総降水量のそれぞれ約 11%、約 14%の増加に寄与したと見積もられました。

(4) 令和 4 年 6 月下旬から 7 月初めの記録的な高温

6 月下旬から 7 月初めの記録的な高温及びその後の天候の特徴と要因について

【令和 4 年 8 月 22 日 気象庁 報道発表】

<https://www.jma.go.jp/jma/press/2208/22b/kentoukai20220822.html>

令和 4 年 6 月下旬から 7 月初めの記録的な高温に地球温暖化が与えた影響に関する研究に取り組んでいます—イベント・アトリビューションによる速報—

【令和 4 年 9 月 6 日 文部科学省、気象庁気象研究所 共同プレスリリース】

https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/mext_01104.html

令和 4 年 6 月下旬から 7 月初めに、東日本及び西日本で統計開始以降 1 位となる記録的な高温となりました。この研究では、今回の高温事例（イベント）に対する発生確率を見積もった結果、昨年から持続しているラニーニャ現象等の影響と地球温暖化の影響が共存する状況下では、5 年に 1 度程度の確率で起こり得たことが分かりました。これに対し、地球温暖化の影響が無かったと仮定した状況下では、同じラニーニャ現象等の影響があったとしても、およそ 1200 年に 1 度という非常に稀な事例であったことが分かりました。

変化傾向の有意性の評価について

気温や降水量等の観測値は、様々な時空間スケールの大気や海洋の運動のため、大きく変動している。自然変動を背景に地球温暖化に伴う気候系の変化傾向をとらえるためには、観測データを適切な統計量に変換し、時系列で並べた統計量にランダムな変動要因だけでは説明しにくい系統的な変化傾向が含まれている可能性がどの程度か検定を行う。この「統計的検定」の結果、経年変化がランダムな変動要因だけでは説明できないと判断することが妥当な場合には、「統計的に有意な変化傾向がある」等と表現される。

本レポートでは、統計量に見られる経年変化傾向の有無の可能性について、統計的有意性を 99%、95%、90%の信頼水準で検定した結果を判断基準としており、それぞれ本文中の記述とは下表のとおり対応させている。

信頼水準	本文中の対応する記述
99%以上で有意	「増加（減少）している（信頼水準 99%で統計的に有意）」 「上昇（下降）している（信頼水準 99%で統計的に有意）」
95%以上で有意	「増加（減少）傾向が現れている（信頼水準 95%で統計的に有意）」 「上昇（下降）傾向が現れている（信頼水準 95%で統計的に有意）」
90%以上で有意	「増加（減少）しているとみられる（信頼水準 90%で統計的に有意）」 「上昇（下降）しているとみられる（信頼水準 90%で統計的に有意）」
上記以外	「有意な変化傾向は見られない」

なお、この統計的検定にあたっては次のような手法により検定している。

(1) 統計量の年々変動成分が正規分布に従うことが仮定できる場合

気温偏差の場合、トレンド成分を除去した年々の統計量の出現頻度はおおむね正規分布に従うと考えることができる。正規分布とみなしてよい統計量に対しては、西暦年と累年の統計量との相関係数を用いて、t 検定を行う。

(2) 統計量の年々変動成分が正規分布に従うことが仮定できない場合

猛暑日や熱帯夜等の階級日数、1 時間降水量 50mm 以上等の発生頻度の統計量は正規分布に従うことが仮定できない場合があるので、これらの統計量に対しては分布に依らない検定（ノンパラメトリック検定）を行う。

統計的検定では、原理的に、「統計的に有意」と判定されてもその結果が誤りである可能性が常に存在する。「信頼水準 90%（95%、99%）以上で統計的に有意」の場合には、観測値における経年変化傾向がランダムな変動要因により出現しているにも関わらず誤って有意と判定してしまう確率をそれぞれ最大で 10%（5%、1%）まで許していることを意味している。逆に、系統的な変化傾向が存在していても、それを正しく検出できない場合もある。一般に、統計年数が短い、年々の変動幅が大きい、発生頻度が稀、等の場合には、今後新しいデータが追加されることにより検定結果が変化する可能性が大きい。本レポートの分析結果は、以上の性質に留意の上で活用されたい。

用語一覧（五十音順）

IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change：気候変動に関する政府間パネル）

気候変動に関する政府間パネル。世界気象機関（WMO）と国連環境計画（UNEP）により、1988年に設立された。気候変動の（1）自然科学的根拠、（2）影響・適応策及び脆弱性、（3）緩和策について評価を行う3つの作業部会と、温室効果ガス目録（インベントリ）に関するタスクフォースを設置し、各国の科学者や専門家の協力の下、報告書を取りまとめている。その報告書の内容は、気候変動に関する条約交渉などにおいて、様々な議論に科学的根拠を与える重要な資料として利用されている。

異常気象

一般に、過去に経験した現象から大きく外れた現象のこと。大雨や強風等の激しい数時間の現象から数か月も続く干ばつ、極端な冷夏・暖冬なども含む。また、気象災害も異常気象に含む場合がある。気象庁では、気温や降水量などの異常を判断する場合、原則として「ある場所（地域）・ある時期（週、月、季節等）において30年に1回以下の頻度で発生する現象」を異常気象としている。

エアロゾル

大気中に浮遊している固体あるいは液体の微粒子。地表や海面から舞い上がるものや、工業活動によって排出されるばい煙、気体（前駆物質）から生成される二次生成粒子などがある。太陽光の吸収・散乱や凝結核として雲の生成などに影響する。エアロゾルのうち、粒子の大きさ（粒径）が $2.5\mu\text{m}$ 以下と非常に小さいものを微小粒子状物質（PM_{2.5}）という。PM_{2.5}は、髪の毛の太さの1/30程度と非常に小さいため、吸引による健康への影響が懸念されている。

温室効果に関する用語

温室効果：地球の大気には二酸化炭素などの温室効果ガスと呼ばれる気体がわずかに含まれている。これらの気体は赤外線を吸収し、再び放出する性質があるため、太陽からの光で暖められた地球の表面から熱放射として放出された赤外線の多くが、大気に吸収され、再び射出された赤外線が地球の表面に吸収される。これらの過程により、地表面及び地表面付近の大気を暖めることを温室効果と呼ぶ。仮に温室効果が無い場合の地球の表面の平均温度は -19°C と見積もられているが、温室効果のために世界の平均気温はおよそ 14°C と推定される。大気中の温室効果ガスが増えると温室効果が強まり、地球の表面の気温が高くなる。代表的な温室効果ガスには、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素などがある。なお、水蒸気は最も大きな温室効果を持つが、大気中の水蒸気量の主な変動要因は気温であり、人間活動に伴う水蒸気排出量ではない。水蒸気は気候変動に対する強制力というよりフィードバック因子と考えられるため、地球温暖化問題を議論する際には一般的に人為起源温室効果ガスとは区別して扱う。

二酸化炭素：地球温暖化に及ぼす影響が最も大きな温室効果ガス。工業化時代の始まり（18世紀半ば）以降、人間活動に伴う化石燃料の消費、森林減少などの土地利用の変化、セメント生産などによる二酸化炭素の排出により大気中の濃度が増加しつつある。工業化以降に人間活動によって排出された二酸化炭素量のおよそ半分が大気中に残留しており、残りは大気から取り除かれ、海洋や陸上生物圏に蓄積されている（IPCC, 2021）。

メタン：二酸化炭素に次いで地球温暖化に及ぼす影響が大きな温室効果ガスであり、1分子あたりの温室効果が二酸化炭素の約27.9倍と大きい。大気中に放出されるメタンのおよそ40%は自然起源（湿地やシロアリなど）であり、人間活動（畜産、稲作、化石燃料採掘、埋め立て、バイオマス燃焼など）によるものはおよそ60%である（WMO, 2022）。メタンは、主に大気中のOHラジカ

ル（ラジカルとは非常に反応性が高く不安定な分子のこと）と反応し、消失するために大気中の寿命は 11.8 年と短い。

一酸化二窒素：1 分子あたりの温室効果が二酸化炭素の約 273 倍と大きく、対流圏では極めて安定しているため大気中の寿命が 109 年と長い気体である。大気中に放出される一酸化二窒素の約 57% は自然起源（海洋や土壌など）であり、人為起源（バイオマス燃焼、施肥及び各種工業過程など）によるものは約 43% である（WMO, 2022）。これらは成層圏において主に太陽紫外線により分解されて消滅する。

ハロカーボン類：塩素、臭素等のハロゲン原子を含む炭素化合物の総称であり、その多くは強力な温室効果ガスであり、人工的な生産により、その大気中濃度は 20 世紀後半以降急速に増加した。その大気中濃度は二酸化炭素の 100 万分の 1 程度であるが、単位質量あたりの温室効果は二酸化炭素の数千倍を超えるものもある。クロロフルオロカーボン類（CFC-11、CFC-12、CFC-113 など。これを日本では一般に「フロン」と呼ぶ場合がある）、四塩化炭素、ハイドロクロロフルオロカーボン類（HCFCs）、1,1,1-トリクロロエタン、塩化メチル、ハロン類、臭化メチルなどは、温室効果ガスであると同時にオゾン層破壊物質でもある。この他、ハイドロフルオロカーボン類（HFC-134a、HFC-152a など。）などがある。

モントリオール議定書：オゾン層を破壊するおそれのある物質を特定し、当該物質の生産や消費の規制とそのスケジュールを規定するために 1987 年にカナダで採択され 1989 年に発効した国際条約。我が国は 1988 年に締結した。採択後もオゾン層の破壊状況について各国で検討を行い、規制措置の強化のための改正がなされた。正式名称は「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」。

ppm, ppb, ppt：対象物質がどの程度大気中に存在しているかを表す割合。ppm (parts per million) は 10^{-6} （乾燥空気中の分子 100 万個中に 1 個）、ppb (parts per billion) は 10^{-9} （10 億個中に 1 個）、ppt (parts per trillion) は 10^{-12} （1 兆個中に 1 個）。

海面水温の変動に関する用語

エルニーニョ／ラニーニャ現象：エルニーニョ現象は、太平洋赤道域の日付変更線付近から南米沿岸にかけて海面水温が平年より高くなり、その状態が一年程度続く現象である。逆に、同じ海域で海面水温が平年より低い状態が続く現象はラニーニャ現象と呼ばれ、いずれも数年に一度発生する。エルニーニョ現象やラニーニャ現象は、日本を含め世界中の異常な天候の要因となり得ると考えられている。

気象庁では、エルニーニョ監視海域（北緯 5 度～南緯 5 度、西経 150 度～西経 90 度；図 A 中の NINO.3 の領域）の月平均海面水温の基準値（その年の前年までの 30 年間の各月の平均値）との差の 5 か月移動平均値が、6 か月以上続けて $+0.5^{\circ}\text{C}$ 以上／ -0.5°C 以下となった場合をエルニーニョ／ラニーニャ現象としている。

図 B は典型的なエルニーニョ現象及びラニーニャ現象が発生している時の太平洋における海面水温の平年偏差の分布を示している。日付変更線（経度 180 度）の東から南米沿岸にかけての赤道沿いで、赤あるいは青の色が濃く、海面水温の平年偏差が大きくなっている。

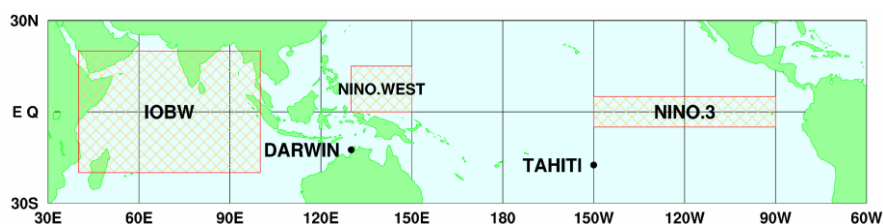
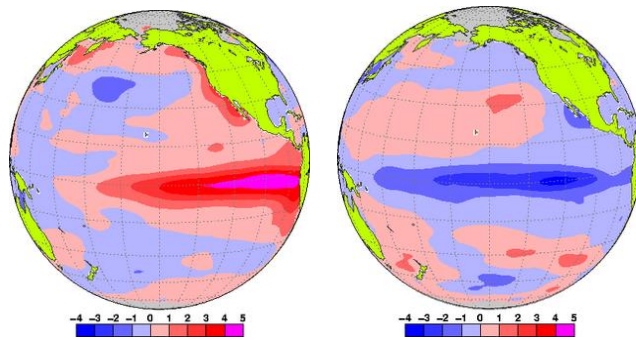


図 A エルニーニョ監視海域（NINO.3）の位置



図B エルニーニョ現象時(1997年11月)の月平均海面水温平年偏差(左)及び、ラニーニャ現象時(1988年12月)の月平均海面水温平年偏差(右) 赤が平年より高く、青が平年より低く、色が濃いほど平年偏差が大きいことを表す。左の図は、1997/1998 エルニーニョ現象が最盛期にあった1997年11月における海面水温の平年偏差、右の図は1988/1989 ラニーニャ現象が最盛期であった1988年12月における海面水温の平年偏差。単位は℃。

南方振動：エルニーニョ／ラニーニャ現象は、太平洋の赤道付近で吹いている持続的な東風（貿易風）と密接な関係がある。貿易風は、エルニーニョ現象時には弱く、ラニーニャ現象時には強い傾向が見られる。貿易風の強さを決める要因は太平洋の東部と西部の間の海面気圧の差だが、この気圧差は大小を交互に繰り返しており、これを南方振動という。エルニーニョ／ラニーニャ現象と南方振動は、それぞれが独立に起きているのではなく、大気と海洋が相互に影響を及ぼしあっている一つの現象の異なった側面であり、これらを総合的に捉えて「エルニーニョ・南方振動 (El Niño - Southern Oscillation)」、略して「エンソ (ENSO)」という。

太平洋十年規模変動 (Pacific Decadal Oscillation: PDO)：北太平洋で大気と海洋が連動して十年から数十年の時間規模で変動する現象。海面水温が北太平洋中央部で平年より低く（高く）なるとき、北太平洋東部や太平洋赤道域の中部から東部で平年より高く（低く）なる変動。このとき、海面気圧が北太平洋の高緯度で平年より低く（高く）なる傾向がある。このような大気循環の変化に伴い、北米を中心に天候への影響が見られる。

インド洋ダイポールモード現象：北半球の夏から秋（6～11月）にインド洋熱帯域の海面水温が、南東部（スマトラ島沖）で平年より低くなり、西部で平年より高くなる現象。このとき現れる海面水温偏差の東西二極の構造によりダイポール（双極子）モードと呼ばれる。これとは逆に海面水温がスマトラ島沖で平年より高くなり、西部で平年より低くなる場合を負のインド洋ダイポールモード現象と呼び、先に説明した現象を正の現象として区別している。海面水温が平年より高く（低く）なる海域で大気の大気対流活動が平年より活発（不活発）になることによる大気循環場の変化に伴い、インドネシアや東アフリカのほか、日本付近やオーストラリアの天候への影響が見られる。

海水の性質に関する用語

北太平洋亜熱帯モード水 (NPSTMW; North Pacific Subtropical Mode Water)：黒潮続流南側の亜熱帯循環北西部海域において形成される冬季の深い混合層の水が海洋内部に沈みこむことで形成された等温層として定義される。137度定線においては、20°～30°N の100～400m 深にみられる16～18℃の等温層がこれにあたる。

北太平洋中層水 (NPIW; North Pacific Intermediate Water)：本州東方において、黒潮系の海水と親潮系の海水が混合することで形成される中層塩分極小で特徴付けられる水。137度定線においては、20°～30°N の800m 深を中心に塩分34.2以下の領域がこれにあたる。

気候変動

ある地点や地域の気候が変わること。ある時間規模から見て一方向に変化することを「気候変化」、可逆な変化を「気候変動」として区別することもある。地球の気候システムの内部変動に起因する数年規模の変動から、外部強制力による数万年以上の規模の変動までを含む。

極端現象

気候的な平均状態から大きく離れた現象。異常気象は 30 年に 1 回以下の発生頻度の現象を指すが、極端現象はこれより発生頻度が大きい現象も含む。台風のように年に複数回起こる現象でも気象災害を起こしたり、社会経済に大きな影響を及ぼすことから、統計上の発生頻度に関わらず極端現象と呼ぶ。

黄砂

中国大陸を発生源とする土壌粒子エアロゾルがもたらす現象。東アジアの砂漠域（ゴビ砂漠、タクラマカン砂漠など）や黄土地帯から吹き上げられた多量の砂じん（砂やちりなど）が、上空の強い風によって東方へ輸送され、徐々に降下する現象。日本における黄砂現象は、春先から初夏にかけて観測されることが多く、空が黄褐色に煙ることにより、一般にもよく知られた現象である。現象が著しいときは、視程の悪化により交通機関へ影響を与える場合がある。

人為起源

ある現象の原因のうち、人間活動に帰せられるもの。気候変動の場合、気候システムの内部変動等は自然起源であるのに対して、人間活動に伴う温室効果ガスやエアロゾル等の排出に起因する変動について人為起源と呼ぶ。

長期変化傾向

年々の値から短周期の変動を取り除いた際の変化の方向、又はその量。10 年や 100 年あたりの変化量として表すことが多い。

平年値

その地点での気候を表す値で、その時々々の気象（気温、降水量、日照時間など）や天候（冷夏、暖冬、少雨、多雨）を評価する基準として利用される。気象庁では、西暦年の 1 の位が 1 の年から続く 30 年間の平均値をもって平年値とし、10 年ごとに更新している（現在は 1991～2020 年の平均）。

北極振動

高緯度域と中緯度域における海面気圧が、シーソーのように一方が高いと一方が低くなる現象である。北極地方の海面気圧が平年より高く、中緯度帯の気圧が平年より低い場合を「負の北極振動」と呼び、北極地方から中緯度に向かって寒気が流れ込みやすくなる。逆に、北極地方の気圧が平年より低く、中緯度帯の気圧が平年より高い場合を「正の北極振動」と呼び、中緯度への寒気の南下が弱くなる。

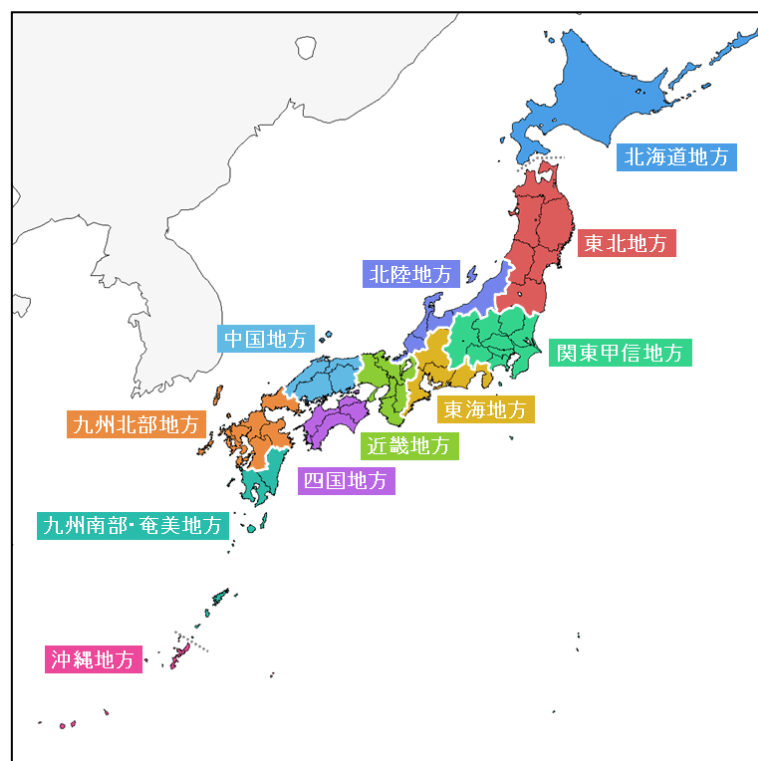
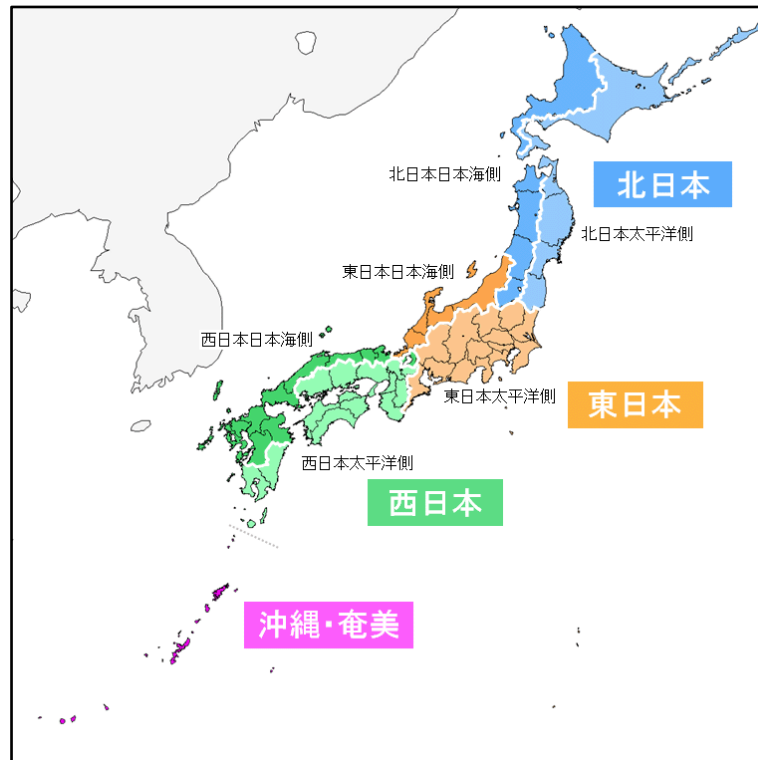
モンスーン

季節風（季節的に交替する卓越風系）を意味し、広い意味では、この季節風に伴う雨の変化（雨季・乾季）も含めてモンスーンと定義される。季節風が卓越する地域はモンスーン気候帯と呼ばれ、アジア大陸からオーストラリア北部にかけては最も典型的なモンスーン気候帯である。

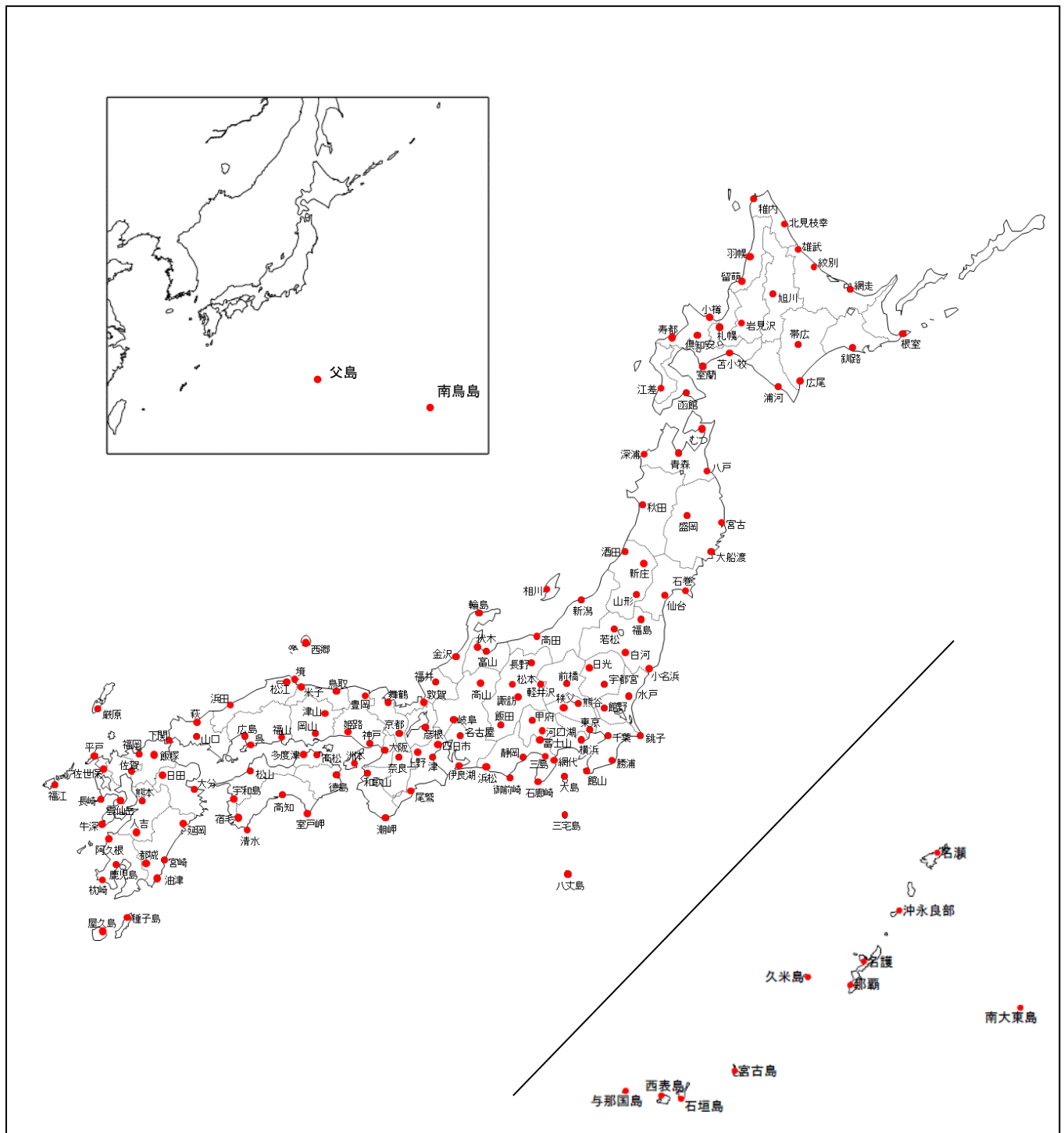
これらのほか、用語については気象庁ホームページの予報用語一覧も参考のこと。

(https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/mokuji.html)

参考図



参考図 1 日本の地域区分



参考図 2 日本の地上気象観測所分布図

引用文献

【トピックス】

- Carn, S. A. et al., 2022: Out of the blue: Volcanic SO₂ emissions during the 2021–2022 eruptions of Hunga Tonga—Hunga Ha’apai (Tonga), *Front. Earth Sci.*, 10:976962, <https://doi.org/10.3389/feart.2022.976962>.
- Feng, L. et al., 2022: Methane emissions responsible for record-breaking atmospheric methane growth rates in 2020 and 2021, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/acp-2022-425>, in review.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- Khaykin, S. et al., 2022: Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption, *Commun. Earth Environ.*, 3, 316, <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00652-x>.
- Kuroda, H. and T. Setou, 2021: Extensive Marine Heatwaves at the Sea Surface in the Northwestern Pacific Ocean in Summer 2021. *Remote Sens.* 2021, 13, 3989. <https://doi.org/10.3390/rs13193989>.
- Legras, B. et al., 2022: The evolution and dynamics of the Hunga-Tonga Ha’apai sulfate aerosol plume in the stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 14957–14970, <https://doi.org/10.5194/acp-22-14957-2022>.
- Millán, L. et al., 2022: The Hunga Tonga-Hunga Ha'apai hydration of the stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2022GL099381, <https://doi.org/10.1029/2022GL099381>.
- Miyama T, Minobe S and H. Goto, 2021: Marine Heatwave of Sea Surface Temperature of the Oyashio Region in Summer in 2010–2016. *Front. Mar. Sci.* 7:576240. doi: 10.3389/fmars.2020.576240.
- Poli, P. and N. M. Shapiro, 2022: Rapid characterization of large volcanic eruptions: Measuring the impulse of the Hunga Tonga Ha’apai explosion from teleseismic waves, *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2022GL098123, <https://doi.org/10.1029/2022GL098123>.
- Proud, S. R., A. T. Prata and S. Schmauss, 2022: The January 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcano reached the mesosphere, *Science*, 378, 554–557,

<https://doi.org/10.1126/science.abo4076>.

- Sellitto, P. et al., 2022: The unexpected radiative impact of the Hunga Tonga eruption of 15th January 2022, *Commun. Earth Environ.*, 3, 288, <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00618-z>.
- Taha, G. et al., 2022: Tracking the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai aerosol cloud in the upper and middle stratosphere using space-based observations, *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2022GL100091, <https://doi.org/10.1029/2022GL100091>.
- Witze, A., 2022: Why the Tongan volcanic eruption was so shocking, *Nature*, 602, 376–378, <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00394-y>.
- WMO, 2009: Technical report of global analysis method for major greenhouse gases by the World Data Center for Greenhouse Gases. GAW Report, 184, WMO/TD, 1473.
- WMO, 2022: WMO Greenhouse Gas Bulletin, 18.
(英語版) https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=3030
(日本語訳) https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/info/wdcgg/wdcgg_bulletin.html
- WMO, 2023: WMO WDCGG DATA SUMMARY, WDCGG No.47, GAW Data Volume IV-Greenhouse Gases and Other Atmospheric Gases, published by the Japan Meteorological Agency in co-operation with World Meteorological Organization. Available at <https://gaw.kishou.go.jp/publications/summary>. (in preparation)
- Xu, J. et al., 2022: Large amounts of water vapor were injected into the stratosphere by the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano eruption, *Atmosphere*, 13, 912, <https://doi.org/10.3390/atmos13060912>.
- Yamauchi, T., 1995: Statistical analysis of atmospheric turbidity over Japan: The influence of three volcanic eruptions, *J. Meteor. Soc. Japan*, 73, 91-103.
- Yoshida, M. et al., 2018: Common retrieval of aerosol properties for imaging satellite sensors, *J. Meteor. Soc. Japan*, 96B, 193-109, doi:10.2151/jmsj.2018-039.
- Zhang, H. et al., 2022: Potential impact of Tonga volcano eruption on global mean surface air temperature, *J. Meteor. Res.*, 36(1), 1–5, doi: 10.1007/s13351-022-2013-6.
- Zhu, Y. et al., 2022: Perturbations in stratospheric aerosol evolution due to the water-rich plume of the 2022 Hunga-Tonga eruption, *Commun. Earth Environ.*, 3, 248, <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00580-w>.
- 北島俊行・吉田真由美・村上浩, 2021: ひまわり 8 号・9 号可視・近赤外エアロゾルプロダクトのアルゴリズム更新, *測候時報*, 88, 19-28.

【第 1 章】

- EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster, Database – www.emdat.be – Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium (米国国際開発庁海外災害援助局とルーベンカトリック大学災害疫学研究所 (ベルギー) の災害データベース) .
- 気象庁, 1997: 表紙の説明 : 夏のアジアモンスーン OLR インデックス. 気候系監視報告, 平成 9 年 6 月.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto and T. Matsumoto, 2005: Objective Analyses of Sea-Surface Temperature and Marine Meteorological Variables for the 20th Century Using ICOADS and the KOBE Collection. *Int. J. of Climatology*, 25, 865-879.
- Kobayashi et al., 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5-48.

【第2章】

- Aono and Saito, 2010: Cherry blossom phenology and temperature reconstructions at Kyoto. <http://atmenviron.osakafu-u.ac.jp/aono/kyophenotemp4/>
- Dettinger, M. D. and M. Ghil, 1998: Seasonal and interannual variations of atmospheric CO₂ and climate. *Tellus*, 50B, 1–24.
- Friedlingstein, P., et al., 2022: Global Carbon Budget 2022, *Earth Syst. Sci. Data*, doi:10.5194/essd-14-4811-2022.
- Hirahara, S., M. Ishii and Y. Fukuda, 2014: Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J. Climate*, 27, 57–75.
- Iida, Y., et al., 2021: Global trends of ocean CO₂ sink and ocean acidification: an observation-based reconstruction of surface ocean inorganic carbon variables. *J. Oceanogr.*, doi.org/10.1007/s10872-020-00571-5.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- Ishii, M., et al., 2014: Air–sea CO₂ flux in the Pacific Ocean for the period 1990–2009, *Biogeosciences*, 11, 709–734, <https://doi.org/10.5194/bg-11-709-2014>
- Ishii, M., Y. Fukuda, H. Hirahara, S. Yasui, T. Suzuki, and K. Sato, 2017: Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets. *SOLA*, Vol. 13, 163–167, doi:10.2151/sola.2017-030.
- Keeling, C. D., et al., 1995: Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, 666–670.
- Keeling, R. F., et al., 1996: Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration. *Nature*, 381, 218–221.
- Kudo, R., et al., 2012: Aerosol impact on the brightening in Japan. *J. Geophys. Res.*, 117(D07208), doi:10.1029/2011JD017158.
- Le Quéré, C., et al., 2016: Global Carbon Budget 2016, *Earth Syst. Sci. Data*, 8, 605–649, doi:10.5194/essd-8-605-2016.
- Mantua, N. J. and S. R. Hare, 2002: The Pacific Decadal Oscillation. *J. Oceanogr.*, 58, 35–44, doi: 10.1023/A:1015820616384.
- Montzka, S. A. et al., 2018: An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-

- depleting CFC-11, *Nature*, 557, 413-417, doi:10.1038/s41586-018-0106-2.
- Montzka, S. A. et al., 2021: A decline in global CFC-11 emissions during 2018-2019. *Nature*, 590, 428-432, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03260-5>.
- Niwa, Y., et al., 2014: Seasonal Variations of CO₂, CH₄, N₂O and CO in the Mid-Troposphere over the Western North Pacific Observed Using a C-130H Cargo Aircraft. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 92(1), 50-70, doi:10.2151/jmsj.2014-104.
- Norris, J. R., and M. Wild, 2009: Trends in aerosol radiative effects over China and Japan inferred from observed cloud cover, solar “dimming,” and solar “brightening,”. *J. Geophys. Res.*, 114(D00D15), doi:10.1029/2008JD011378.
- Ohmura, A., 2009: Observed decadal variations in surface solar radiation and their causes. *J. Geophys. Res.*, 114(D00D05), doi: 10.1029/2008JD011290.
- Park, S., et al., 2021: A decline in emissions of CFC-11 and related chemicals from eastern China. *Nature*, 590, 433-437, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03277-w>.
- Rayner, P. J., et al., 1999: Reconstructing the recent carbon cycle from atmospheric CO₂, δ¹³C and O₂/N₂ observations. *Tellus*, 51B, 213-232.
- Rigby, M., et al., 2019: Increase in CFC-11 emissions from eastern China based on atmospheric observations, *Nature*, 569, 546-550, doi:10.1038/s41586-019-1193-4.
- Saito, T., et al., 2015: Extraordinary halocarbon emissions initiated by the 2011 Tohoku earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2014GL062814.
- Sweeney, C., et al., 2015: Seasonal climatology of CO₂ across North America from aircraft measurements in the NOAA/ESRL Global Greenhouse Gas Reference Network, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 5155-5190, doi:10.1002/2014JD022591.
- Tsuboi, K., et al., 2013: Evaluation of a new JMA aircraft flask sampling system and laboratory trace gas analysis system. *Atmos. Meas. Tech.*, 6, 1257-1270, doi:10.5194/amt-6-1257-2013.
- Umezawa, T., et al., 2018: Seasonal evaluation of tropospheric CO₂ over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 14851-14866, doi:10.5194/acp-18-14851-2018.
- WCRP, 2010: Summary Report from the Eleventh Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Scientific Review and Workshop. WCRP Informal Report No. 08/2010, 21pp.
- Wild, M., 2009: Global dimming and brightening: A review. *J. Geophys. Res.*, 114(D00D16), doi:10.1029/2008JD011470.
- Wild, M. and A. Ohmura, 2004: BSRN longwave downward radiation measurements combined with GCMs show promise for greenhouse detection studies. *GEWEX news*, 14, 4, 20 pp.
- WMO, 2009: Technical report of global analysis method for major greenhouse gases by the World Data Center for Greenhouse Gases. GAW Report, 184, WMO/TD, 1473.
- WMO, 2018a: Scientific assessment of ozone depletion: 2018. Global Ozone Research and Monitoring Project-Report, 58.
- WMO, 2018b: WMO Greenhouse Gas Bulletin, 14.
- WMO, 2022: WMO Greenhouse Gas Bulletin, 18.
- (英語版) https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=3030
- (日本語訳) https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/info/wdchg/wdchg_bulletin.html

WMO, 2023: WMO WDCGG DATA SUMMARY, WDCGG No.47, GAW Data Volume IV-Greenhouse Gases and Other Atmospheric Gases, published by the Japan Meteorological Agency in co-operation with World Meteorological Organization. Available at <https://gaw.kishou.go.jp/publications/summary>. (in preparation)

気象庁, 2011: 衛星データによる積雪域解析. 気候系監視資料 2010.

藤部文昭, 1999: 日最低・最高気温の統計値における日界変更の影響. 天気, 46, 819-829.

気候変動に関する情報リスト

ジャンル	名称	概要
特定の現象に関する見解	日本の異常気象の状況と要因 https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/longfcst/extreme_japan/index.html	社会的に大きな影響をもたらした異常気象や天候について、その特徴と要因をまとめたもの。異常気象分析検討会の見解も掲載。
	世界の異常気象の状況と要因 https://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/monitor/extreme_world/index.html	世界の異常気象の発生状況に関する情報や、社会的に大きな影響をもたらした異常気象や天候について特徴と要因をまとめたもの。
	災害をもたらした気象事例 https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bo-sai/report/index.html	過去に発生した主な気象災害事例の詳細を掲載。
観測・監視	温室効果ガス https://www.data.jma.go.jp/ghg/info_ghg.html	大気中の二酸化炭素など温室効果ガス濃度の観測結果やシミュレーションにより解析した二酸化炭素の濃度分布などを掲載。
	大雨や猛暑日など（極端現象）のこれまでの変化 https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html	気象庁の観測データに基づく、大雨や猛暑日など（極端現象）のこれまでの変化を掲載。
	気温・降水量の長期変化傾向 https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/index.html	世界及び日本の気温や降水量の経年変化を掲載。
	海洋の健康診断表定期診断表 https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/index.html	海水温、海流、波浪、潮汐などの要素に加え、地球温暖化や海洋酸性化、海洋汚染など海洋に関する環境について診断するとともに、今後の見通しに関する情報や過去のデータを提供するもの。
	海洋の健康診断表総合診断表 https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/shindan/sougou/index.html	気候変動に加え、気候より短い時間スケールの現象、海洋汚染、診断項目に関する過去文献のレビューや海洋に関する基礎知識を提供するもの。
国際機関による報告書等	ヒートアイランド現象 https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/index_himr.html	都市化の影響による気温上昇等について分析したもの。
	IPCC 第6次評価報告書関連情報 https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/index.html	気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第6次評価報告書（AR6）第1作業部会（WG1）報告書の政策決定者向け要約（SPM）の和訳などを掲載。
	WMO 温室効果ガス年報の和訳 https://www.data.jma.go.jp/env/info/wdcgg/wdcgg_bulletin.html	世界気象機関（WMO）が発行する、世界の温室効果ガスの状況の取りまとめを気象庁が和訳したもの。掲載されている解析は気象庁が行っている。

ジャンル	名称	公表年	概要
報告書	気候変動監視レポート https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/index.html	平成 8（1996）年 より毎年	その年までの地球環境・海洋の観測・監視情報を、報道機関や政策決定者向けに横断的に提供するもの。
	日本の気候変動 2020 ―大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書― https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/cj/index.html	令和 2（2020）年	日本及びその周辺における大気中の温室効果ガスの状況や、気温や降水、海面水温などの現在までに観測されている変化と将来予測される変化をまとめたもの。
	気候変動影響評価報告書 http://www.env.go.jp/earth/tekiou.html	令和 2（2020）年 より 5 年毎	環境省が取りまとめて公表した報告書。「総説」は気候変動適応法（平成 30 年法律第 50 号）に基づくもので、各分野における気候変動の影響や、気温や降水量などの観測事実と将来予測、影響の評価に関する今後の課題や現在の政府の取組がまとめられている。
	気候変動の観測・予測及び影響評価統合レポート 2018 ～日本の気候変動とその影響～ https://www.env.go.jp/earth/ondanka/knowledge.html	平成 30（2018）年	日本を対象とした気候変動の観測・予測・影響評価に関する知見を掲載。環境省・文部科学省・農林水産省・国土交通省・気象庁が共同で作成。

謝辞

本書は、気象庁関係各部が作成し、内容に関する検討は、以下の先生方の協力を得た。

鬼頭 昭雄	(元) 気象庁気象研究所 気候研究部 部長
小坂 優	国立大学法人 東京大学 先端科学技術研究センター 准教授
須賀 利雄	国立大学法人 東北大学 大学院理学研究科 教授
藤部 文昭	東京都公立大学法人 東京都立大学 都市環境科学研究科 特任教授
町田 敏暢	国立研究開発法人 国立環境研究所 地球システム領域 大気・海洋モニタリング推進室 室長

(敬称略)