

# 補遺

## A1 地球温暖化予測とは

### A1.1 気候モデルによる予測

地球の気候は図 A1.1-1 に示すように、大気、海洋、海氷、雪氷、陸面などの要素から構成されるシステム（気候システム）と捉えることができる。地球温暖化に伴う気候変化の予測では、現実の大気や海洋の運動、それに伴う気象の時間発展を、気候モデルを使って、コンピューターによるシミュレーションを行うものである。気候モデルは、日々の天気予報の作成に使われている数値予報モデルと同じ物理法則に基づくコンピュータープログラムで、大気や海洋の流れ、気圧や気温の変化を現実に近い形で再現する性能を持っている。この気候モデルに、気候変化をもたらす外部強制力（温室効果ガス濃度の変化など）を与えた上で気象の時間発展を計算し、気候がどのように変化するか予測することができる。

日々の天気予報は、概ね2週間程度先までの天気が予報の精度の限界と言われているが、気候モデルによる地球温暖化予測は、こうした日々の天気の時間発展そのものを遠い将来にわたって予報することを目指すものではない。コンピューターの内部で大気や海洋の状態の時間発展を計算している点は天気予報と同じであるが、日々の天気のような短い周期の変動そのものは、予測の対象にはならない。しかし、計算された気温や降水量の変動を十分長い時間にわたって平均あるいは積算した状態として得られる気候値は、温室効果ガス濃度の変化などの外部強制力が加えられたことに対する応答としての変化を反映している。このように、気象の変動の長期にわたる平均や積算としての気候値が、現在と比べて今後どの程度変化するかを調べるのが地球温暖化予測の目的である。

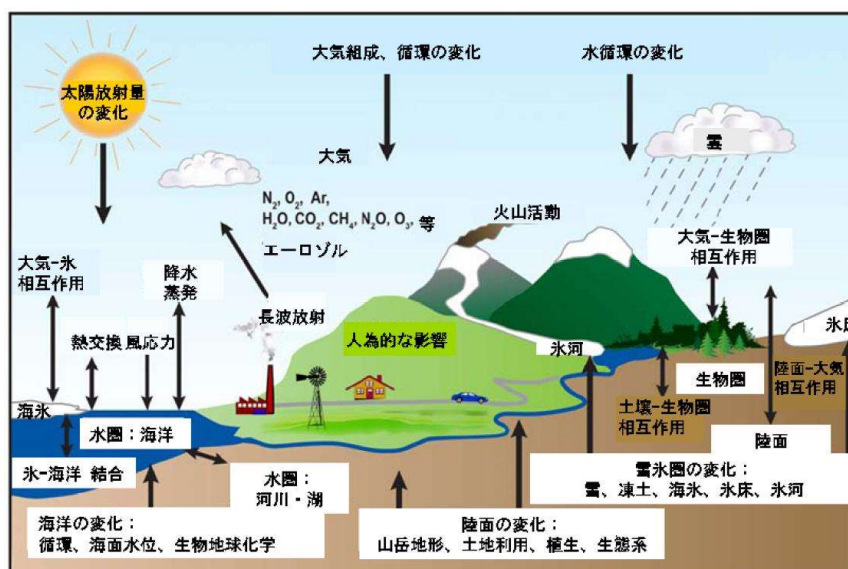


図 A1.1-1 気候システムの概念図

## A1.2 温室効果ガス排出シナリオ

人為起源の温室効果ガスの大気中濃度変化に伴う将来気候変化予測を行うためには、人為起源による放射強制力<sup>3</sup>の変化のシナリオが必要となる。本書で用いた RCP8.5 シナリオは、IPCC が第3次評価報告書及び第4次評価報告書で用いた SRES シナリオ<sup>4</sup>に代わり、第5次評価報告書で将来気候予測に用いた RCP シナリオ<sup>5</sup>のうちの1つである。SRES シナリオでは、今後の社会・経済動向に関する仮定から算出した温室効果ガスの排出シナリオにより放射強制力を求めたのに対して、RCP シナリオでは社会・経済的な将来像を仮定せず、将来予測される多様な放射強制力の経路の中から代表的なものを選択し、これに基づき気候を予測する。放射強制力に対応・比較できる社会・経済的シナリオは別途用意する。このため、放射強制力の経路ごとに緩和策を含む多様な社会・経済シナリオ（SSP シナリオ<sup>6</sup>）を作成することが可能となり、「気温上昇を2℃に抑えるためには」といった、目的主導型の社会経済シナリオになっているといえる。RCP シナリオでは、社会経済モデルから作成した多くのシナリオから、以下の4点を考慮して、RCP2.6（低位安定化シナリオ：気温上昇を工業化以前と比べて2℃未満に抑えることを目指す想定）、RCP8.5（高位参照シナリオ：現時点を超える政策的な緩和策を行わないことを想定）、及びそれらの間に位置する RCP4.5（中位安定化シナリオ）と RCP6.0（高位安定化シナリオ）の4シナリオが選択された。

- ①シナリオ間の放射強制力が明確にかけ離れていること
- ②シナリオの数が奇数でないこと（奇数であると、中位の放射強制力を持つシナリオの実現確率が最も高いと誤解される恐れがあるため）
- ③放射強制力が高／低の二通りでないこと
- ④多すぎないこと

「RCP」に付く数値は放射強制力の目安であり、RCP2.6では「2100年以前に約3W/m<sup>2</sup>でピークを迎え、その後減少し、2100年頃には約2.6W/m<sup>2</sup>となる」、RCP8.5では「2100年の時点で8.5W/m<sup>2</sup>を超え、上昇が続く」、RCP4.5とRCP6.0では「2100年以降に約4.5（6.0）W/m<sup>2</sup>で安定化する」ことを示している（図A1.2-1（左））。また、各シナリオにおける二酸化炭素排出量を社会経済シナリオと簡易炭素循環モデルを含む統合評価モデルにより算出した結果を見ると、RCP2.6シナリオでは2100年頃に負の排出量となっており、2100年頃の

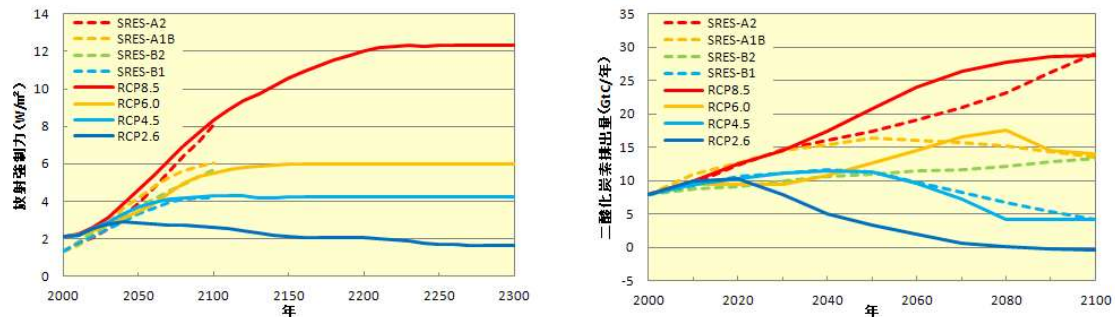
<sup>3</sup> 気候変動をもたらす温室効果ガス、エアロゾル、土地利用等の変化によって引き起こされる放射エネルギー収支の変化量。単位は Wm<sup>-2</sup>。正の放射強制力は地球を暖め、負の放射強制力は地球を冷やす傾向がある。RCP シナリオでは、1750年を基準とした、それぞれのシナリオにおけるおおよその放射強制力を示している。

<sup>4</sup> IPCC が2000年に公表した排出シナリオに関する特別報告書(Special Report on Emissions Scenarios : SRES)によるシナリオ。

<sup>5</sup> 代表的濃度経路(Representative Concentration Pathways)シナリオ。社会・経済的な将来像を仮定せず、将来予測される多様な放射強制力の経路の中から、代表的なものを選択する。

<sup>6</sup> SSPシナリオ(Shared Socio-economic Pathway)と呼ばれ、緩和策と適応策の困難度を指標に SSP1~5の5種類が検討されている。各シナリオの概要は以下のとおりである。SSP1(理想的な世界)：教育水準、ガバナンスともに高水準であり、国際的に協調し、その結果技術進歩も高い。SSP2(中庸的な世界)：SSP1とSSP3の間に位置する。SSP3(望ましくない世界)：教育水準、ガバナンスともに低く、世界は分断、技術は停滞。SSP4(分裂社会)：国際的、各国内で社会的格差が開く分断された世界。技術水準は高いが貧困層は脆弱。SSP5(化石燃料依存)：教育水準は高く技術進歩も高い。しかし、エネルギーは化石燃料に依存する。

放射強制力を約  $2.6\text{W}/\text{m}^2$  に抑えるためには、大気中の二酸化炭素を吸収する必要があることを示唆している（図 A1.2-1（右））。



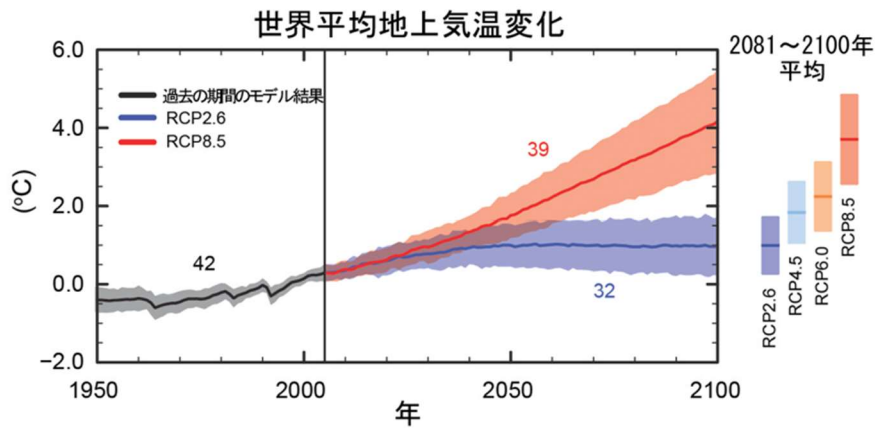
図A1.2-1 SRES シナリオとRCP シナリオに基づく放射強制力（左）と二酸化炭素排出量（右）

RCP シナリオを実線で、SRES シナリオを破線で示す。気象庁，2015 より引用。

なお、SRES シナリオと RCP シナリオでは様々な仮定が異なるため、放射強制力の違いだけから単純に比較することはできないが、van Vuuren and Carter (2013) では、SRES シナリオと SSP シナリオの社会経済発展シナリオを比較し、さらに SRES シナリオと RCP シナリオの大気組成、放射強制力、気候特徴を比較し、SRES シナリオが当てはまる RCP シナリオと SSP シナリオの最適な組み合わせを示している。これによると「地球温暖化予測情報第 8 巻」（気象庁, 2013）で用いた SRESA1B シナリオは、RCP6.0 と SSP2 の組み合わせに相当する。

今回の予測実験では、主要な温室効果ガスである二酸化炭素に関して RCP8.5 シナリオが世界的排出量の近年の増加傾向にほぼ沿っていることや、その延長上での将来リスクを明らかにする観点から、RCP8.5 シナリオに基づく温室効果ガス濃度を外部強制力としてシミュレーションを行った。このシナリオでは、現時点の温室効果ガス排出削減の取組みに追加を行わず、非常に高い温室効果ガス排出となるものであり、放射強制力が 2100 年までに  $8.5\text{W}/\text{m}^2$  以上に達することが想定されている。

AR5 によれば、2081～2100 年の世界平均地上気温の 1986～2005 年平均に対する上昇量は前提とする RCP シナリオによって異なり、RCP2.6 シナリオでは  $0.3\sim 1.7^\circ\text{C}$ 、RCP4.5 シナリオでは  $1.1\sim 2.6^\circ\text{C}$ 、RCP6.0 シナリオでは  $1.4\sim 3.1^\circ\text{C}$ 、RCP8.5 シナリオでは  $2.6\sim 4.8^\circ\text{C}$  の範囲に入る可能性が高いと予測されている（図 A1.2-2）。また、IPCC では、工業化（産業革命：18 世紀後半）以前の基準年を 1750 年としているが、当時の世界平均地上気温としては、データの不備から、より測器観測データの整った 1850～1900 年の平均値で代用している。それによれば、工業化以前から、上記予測の初期値までにすでに  $0.61^\circ\text{C}$  昇温しており、上記予測値にこの値を加えれば工業化以前からの気温上昇量が示される。



**図A1.2-2 CMIP5の複数のモデルによりシミュレーションされた時系列 (1950年から2100年)**

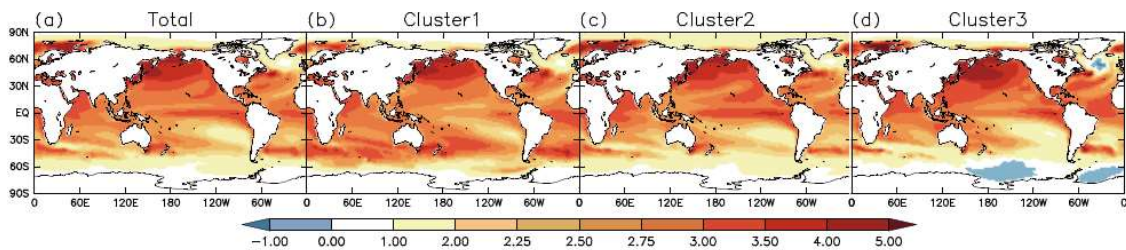
1986～2005年平均に対する世界平均地上気温の変化。予測と不確実性の幅(陰影)の時系列を、RCP2.6(青)とRCP8.5(赤)のシナリオについて示した。黒(と灰色の陰影)は、復元された過去の強制力を用いてモデルにより再現した過去の推移である。全てのRCPシナリオに対し、2081～2100年の平均値と不確実性の幅を彩色した縦帯で示している。数値は、複数モデルの平均を算出するために使用した第5次大気海洋結合モデル相互比較プロジェクト(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5: CMIP5)のモデルの数を示している。AR5政策決定者向け要約(気象庁訳<sup>7</sup>)より引用。

<sup>7</sup> <http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/index.html>

### A1.3 海面水温データ

MRI-AGCM3.2S、NHRCM05 とともに大気の変動のみを予測計算する気候モデルであるため、海面水温（Sea Surface Temperature: SST）データを別に用意し、与える必要がある。本予測計算では、Mizuta et al. (2014)に基づき、RCP8.5 シナリオ下での4通りの予測結果を用いた。

具体的には、まず、第5次大気海洋結合モデル相互比較プロジェクト（Coupled Model Intercomparison Project Phase 5: CMIP5）で行われたRCP8.5シナリオ下での各国の全球大気海洋結合モデルから28モデルを選択して、全モデルによる平均値を将来の海面水温の変化量の1つとする（図A1.3-1(a)）。次に、降水や大気循環に大きな影響を与える熱帯域のSST変化を対象にクラスター解析を行い3パターンに分類する。そして、各パターンにおいて選択されたモデルのSST分布を平均した上で、熱帯域における平均したSSTの昇温量が28モデルによる平均値と同じになるように全球のSSTの昇温量を規格化する（図A1.3-1(b)～(d)）。MRI-AGCM3.2S及びNHRCM05を用いて将来気候を計算する際は、現在の観測値（平均値及び年々変動）にこれらのSST将来変化パターンを加えたものを与えている。



図A1.3-1 SST分布の異なる4パターン（将来変化）

- Mizuta et al. (2014)より引用。熱帯域のSSTの昇温量が同じになるように規格化している。
- (a) 28モデル平均で熱帯太平洋中～東部での昇温が大きく、エルニーニョ的な変化を示す。
  - (b) クラスター1（8モデル）：熱帯太平洋中～東部での昇温が小さく、南北半球間のコントラストも小さい。
  - (c) クラスター2（14モデル）：(a)よりもさらにエルニーニョ的な変化を示す。
  - (d) クラスター3（6モデル）：熱帯太平洋中～東部での昇温が小さく、南北半球間のコントラストが大きい。

## A2 用語一覧

<p>IPCC (気候変動に関する政府間パネル)</p>	<p>世界気象機関 (WMO) と国連環境計画 (UNEP) により、昭和 63 年 (1988) に設立された。各国の科学者や専門家で組織され、気候変動の (1) 科学的評価、(2) 影響・適応策の評価、(3) 緩和策の社会的・経済的側面の評価を行い報告書にとりまとめている。その報告書の内容は、地球温暖化に関する条約交渉の際などに、共通認識の情報として取り扱われている。これまで、1990 年に第 1 次、1995 年に第 2 次、2001 年に第 3 次、2007 年に第 4 次、2013～2014 年に第 5 次の気候変動に関する評価報告書が取りまとめられている。</p>
<p>温室効果</p>	<p>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無数に含まれている。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。この性質のため、太陽からの光で暖められた地球の表面から地球の外に向かう赤外線の多くが、熱として大気に蓄積され、再び地球の表面に戻ってくる。この戻ってきた赤外線が、地球の表面付近の大気を暖める。これを温室効果と呼ぶ。</p>
<p>排出シナリオ</p>	<p>地球温暖化にともなう将来の気候変化予測を行うには、温室効果ガスの排出量予測値が必要となる。温室効果ガス排出シナリオには、IPCC が第 3 次評価報告書及び第 4 次評価報告書で用いた SRES シナリオや第 5 次評価報告書で将来気候予測に用いた RCP シナリオがある。</p>
<p>非静力学モデル</p>	<p>数値予報で用いる物理学の方程式の内、鉛直方向の運動方程式に静水圧近似を用いない数値予報モデルのこと。高い分解能で予報を行う場合、静水圧近似の精度が悪くなるので、非静力学モデルが必要である。</p>
<p>気候モデル</p>	<p>気候モデルとは、気候を構成する大気、海洋等の中で起こることを、物理法則に従って定式化し、計算機 (コンピューター) の中で擬似的な地球を再現しようとする計算プログラムのことである。気候モデルでは、世界全体を網の目に区切り、その格子点ごとに気温、風、水蒸気の時間変化を物理法則 (流体力学、放射による加熱や冷却、水の相変化など) に従って計算することにより、将来の気候変化を予測する。</p>
<p>地球温暖化予測情報 第 9 巻および第 8 巻</p>	<p>気象庁では、日本における、地球温暖化による影響評価、地球温暖化の緩和策および適応策の検討の推進、地球温暖化に関する科学的知見の普及・啓発などに寄与することを目的に、平成 8 年度から地球温暖化予測モデルの結果を「地球温暖化予測情報」とし</p>

	<p>て公表している。</p> <p>第9巻（温室効果ガス排出シナリオ：RCP8.5）を平成29年3月に公表した。</p> <p><a href="http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/index.html">http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/index.html</a></p> <p>第8巻（温室効果ガス排出シナリオ：SRES-A1B）を平成25年3月に公表した。</p> <p><a href="http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vol8/index.html">http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vol8/index.html</a></p>
九州・山口県の気候変動監視レポート2017	<p>九州・山口県の気候の長期変化傾向について、過去のデータをもとに統計解析した結果や、前年の気候の特徴についてまとめた報告物で、福岡管区気象台のホームページで公開している。</p> <p><a href="http://www.jma-net.go.jp/fukuoka/kaiyo/chikyu/repo2017/repo2017_download/repo2017_download.html">http://www.jma-net.go.jp/fukuoka/kaiyo/chikyu/repo2017/repo2017_download/repo2017_download.html</a></p>
緩和策・適応策	<p>地球温暖化対策は、大きく「緩和策」と「適応策」に分けられる。緩和策は、省エネルギーや再生可能エネルギー導入等による温室効果ガスの排出削減や森林等の吸収源の増加などで気候に対する人為的影響を抑制する対策である。一方、適応策は、気候変動がもたらす水資源、食料、生物多様性等への様々な影響に対して人や社会、経済のシステムを再構築することで影響を軽減しようという対策である。</p>
標準偏差	<p>データ間のばらつきの程度を表す統計量。標準偏差の値が大きいと、収集したデータの散らばりの度合いが大きいことを示す。標準偏差の値が小さいと、収集したデータの平均値前後にデータが集中していることを示す。</p>
有意性検定	<p>ある期間と別の期間との平均値の違いについて、「ただの偶然」なのか、そうではなく「偶然である確率が十分に低く意味がある違いなのか」を定量的に判断するために行う統計的な処理が有意性検定である。偶然である確率が十分に低ければ、その変化は偶然であることを否定する方が合理的である。この場合、その変化には統計的に意味があるという意味で、「有意である」という言葉を使う。この「有意である」という判断基準として、「信頼度水準」を使う。ある変化が起きる確率がこの信頼度水準より大きければ、その変化は単なる偶然で起きたものではなく、統計的に意味のある変化ということになる。本誌では信頼度水準が90%以上の場合に、有意な変化と判断している。</p>
通年半旬	<p>半旬には、その期間の区切り方により、通年半旬と暦日半旬がある。通年半旬の統計は、毎年1月1日に始まる5日ごとの期間で1年を73半旬に分けた個々の期間について行う。ただし、第12</p>

	半旬は2月25日から3月1日までとし、平年では5日間、うるう年では6日間とする。なお、暦日半旬の統計は、各月を1日から5日ごとに区切った期間について行う
放射強制力	IPCC 第5次評価報告書で、「対流圏の上端（圏界面）における平均的な正味の放射の1750年に対する変化」と定義されている。平衡状態にある大気と地表とのエネルギーのバランスが様々な要因によって変化した場合の変化量を圏界面における単位面積あたりの放射量の変化 ( $W/m^2$ ) で表した指標である。
ヒートアイランド現象	ヒートアイランド現象 (heat island=熱の島) とは、都市の気温が周囲よりも高い状態のことである。一般に、気温分布図に描かれる都市を取り囲む等温線の様子が地形図の島のような形になることから、このように呼ばれる。ヒートアイランド現象は「都市が無かったと仮定した場合に観測されるであろう気温に比べ、都市の気温が高い状態」としても定義することができる。
エアロゾル	エアロゾルは大気中に浮遊する、半径0.001マイクロメートル程度から10マイクロメートル程度の大きさの微粒子のことで、人為起源あるいは自然起源のガスから粒子変換で生成される硫酸(塩)、風による巻き上げで発生する海塩、ダスト(黄砂)、化石燃料やバイオマスの燃焼によるすす(黒色炭素及び有機炭素)などがある。(1マイクロメートルは1ミリメートルの千分の1の長さ)
炭素換算	二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスに含まれる炭素の重量のこと。
海面水温	大気と海洋の境界(海面)の水温のこと。通常、数十cm~10m深の水温を観測し、海面水温としている。
九州北部地方	山口県、福岡県、大分県、佐賀県、長崎県、熊本県をまとめた地域。
九州南部	宮崎県、鹿児島県(奄美地方を除く)をまとめた地域。
奄美地方	奄美群島、トカラ列島をまとめた地域。
季節をあらわす用語	春(3~5月)、夏(6~8月)、秋(9~11月)、冬(12~2月)。
全球	地球全体
平年値	現在の気候における平均的な大気の状態を表す値。特に断りのない限り、本書では1981~2010年の30年間の平均値を平年値として使用する。
偏差	長期的な気候変化の監視のために、特定の年代を基準とした、その基準からの変化量。基準となる年代の取り方には任意性がある



	<p>が、特に断りのない限り、本書では刊行時点における平年値の期間である 1981～2010 年の 30 年間の平均値を基準とする。平年値と期間は同じだが、意味が異なる。</p>
--	---

## 参考文献

- 気象庁, 2017. 地球温暖化予測情報第9巻, IPCCのRCP8.5を用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測, 平成29年3月, 41pp.
- 気象庁, 2013. 地球温暖化予測情報第8巻, IPCC温室効果ガス排出シナリオA1Bを用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測, 平成25年3月, 88pp.
- 文部科学省研究開発局, 2016. 気候変動リスク情報創生プログラム テーマ C.. 気候変動リスク情報の基盤技術開発 平成27年度研究成果報告書, 平成28年3月, 212pp.
- Giorgi, F., E.S. Im, E. Coppola, N.S. Diffenbaugh, X.J. Gao, L. Mariotti, and Y. Shi, 2011, Higher hydroclimatic intensity with global warming. *J. Climate*, 24,5309-5324. doi:10.1175/2011JCLI3979.1
- Hirahara, S., H. Ohno, Y. Oikawa, and S. Maeda, 2012: Strengthening of the southern side of the jet stream and delayed withdrawal of Baiu season in future climate. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90, 663-671, doi:10.2151/jmsj.2012-506.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (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, 1535pp.
- Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki, and A. Kitoh 2012. Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 233-258, doi:10.2151/jmsj.2012-A12.
- Sasaki, H., A. Murata, M. Hanafusa, M. Oh'izumi, and K. Kurihara 2011. Reproducibility of present climate in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmosphere general circulation model. *SOLA*, 7, 173-176, doi:10.2151/sola.2011-044.
- Trenberth, K. E, 2011: Changes in precipitation with climate change. *Clim. Res.*, 47, 123-138, doi:10.3354/cr00953