気候差分ダウンスケーリング法による 関東・中部山岳域の確率論的気候変化予測

PROBABILISTIC CLIMATE CHANGE PROJECTION IN KANTO AND
JAPAN ALPS REGIONS USING INCREMENTAL DYNAMICAL DOWNSCALING

若月泰孝¹・原政之²・藤田実季子³・馬燮銚⁴・井上忠雄⁵・木村富士男⁶・小池俊雄⁷
Yasutaka WAKAZUKI, Masayuki HARA, Mikiko FUJITA, Xieyao MA, Tadao INOUE,
Fujio KIMURA and Toshio KOIKE

¹正会員 理博 筑波大学助教 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1)

²非会員 理博 埼玉県環境科学国際センター主任 (〒347-0115 埼玉県加須市上種足914)

³非会員 理博 海洋研究開発機構技術研究員 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25)

⁴非会員 理博 海洋研究開発機構主任研究員 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25)

⁵非会員 理博 元海洋研究開発機構 (〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25)

⁶非会員 理博 筑波大学研究員 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1)

⁷フェロー会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

The incremental dynamical downscaling and analysis system (InDDAS) which has been developed from the pseudo-global-warming method by appending partial functions was applied for a probabilistic regional scale climate change projection with the target regions of Kanto and Japan Alps. In InDDAS, the most reliable future state was projected by a regional climate model (RCM) simulation with an ensemble mean among the climatological increments of multiple general circulation model (GCM) simulations. In addition, the uncertainty of the future projections is estimated by RCM simulations with the multi-modal statistical increments calculated by the singular vector decomposition of the multiple GCMs. An increase of rainfall with the change ratio of 7-16 % was projected in Kanto region, where the most reliable value was 10 %. The change ratios of the vicinity quantiles of extreme rainfall was projected to be larger than that of rainfall and was almost the same as the value explained by the Clausius–Clapeyron effect.

Key Words : Climate change projection, Regional Climate Model, Probabilistic Projection

1. はじめに

地域スケールの気候変化予測は、気候変化の影響評価および適応策の検討のために、その必要性が近年急激に高まっている。IPCC¹⁾は、温暖化によって全球規模での強雨化を予測している。また、大気・熱・水循環の変化に伴い、乾燥化や降水量の増加など、地域ごとに異なる水環境の変化が起こることを示唆している。

一般的に、大気・海洋・地表面過程などの物理素過程をモデル化した全球気候モデル(GCM)を用いて、CO₂排出量などの放射に関わる強制力を与えた大規模数値シミュレーションで将来を予測する。しかし、GCMによる予測は計算負荷が大きいために解像度を粗くせざるを得ず、地域スケールの適応研究には不向きである。そこ

で、特定地域のみを高解像度化するダウンスケーリング(DS)が行われる。DSは統計的DSと領域気候モデル(RCM)を用いた力学的DSがある。統計的DSは定量化に向いており、多くの研究がなされている(Wilby et al.²⁾ほか)。ただし、観測が少なく経験則の不確実性が大きい場合には明らかに不向きである。力学的DSは、物理的に現象を計算していることから、統計的DSでの経験則の変化などを心配する必要はない。力学的DSでも誤差を生じるが、その潜在的利用価値は高いといえる。たとえば、21世紀後半の日本周辺の大気環境を予測するRCM実験が数多くなされてきた(Wakazuki et al.³⁾ほか)。

力学的DSは、全球気候モデルの結果を側面境界条件として特定領域の高解像のRCM実験を行う。その際、GCMが持っているバイアスをRCM実験は概ね引き継ぐ性質を持っており、RCMの結果に影響を与える。そこ

で、このバイアス問題を解決するために、力学的DSにおける近似手法が開発された。Sato et al.⁴⁾、Kimura and Kito⁵⁾は、疑似温暖化手法(Pseudo-global-warming Method (PGW法))を開発し、Misra and Kanamitsu⁶⁾はanomaly nestingという方法を開発した。いずれの方法も客観解析データとGCMから得られる情報を有機的に結合して、バイアスの小さなRCMの境界条件を作成する。

気候変化予測には大きな不確実性がある。温室効果ガス排出シナリオに対する不確実性、GCMやRCMのモデルのばらつきに起因する不確実性である。この中で、GCMの予測の不確実性は定量化して扱うことができ、かつ無視できない大きさを持つ。したがって、DSにおけるGCMの予測の不確実性を考慮し、確率論的に地域スケールの気候変化を予測する必要がある。確率論的気候変化予測の取り組みは、近年ベイズ推定法を中心として取り組まれている(Tebaldi et al.⁷⁾ほか)。

一方で、RCM実験では、豪雨などが物理的に再現できることが期待されるが、そのためには数km解像度で実験しなければならず、RCM実験の計算負荷は大きくなる。よって、多くのGCM実験結果を利用して予測の不確実性を扱う場合、それに合わせてRCMの実験を数多く行うことが困難になる。本研究では、これらの諸問題を解決するために、PGW法の発展的な手法として開発されている気候差分ダウンスケーリング法の開発の現状を2章で簡潔に紹介する。また、関東と中部山岳域を対象として実施された高解像度領域気候変化予測実験を3章で紹介し、その結果を用いた確率論的な解析について4章で紹介する。

2. 気候差分ダウンスケーリング法

PGW法は、GCMによる気候変化予測をタイムスライス法でダウンスケーリングする手法の一種であり、現在気候と将来気候の2つの数値実験を実施することになる。一般的な領域気候実験では、GCMによる気候実験結果を側面境界条件として利用するため、現在気候実験の結果はGCMが持つバイアスの影響を反映して、比較的大きなバイアスをもつ。一方、PGW法では、現在気候実験において客観解析データを側面境界条件として利用するため、バイアスが比較的小さくなるというメリットがある。ただし、GCMが作り出すバイアスは大幅に軽減するが、RCMが作り出すバイアスは残るため、バイアス補正を後に施す必要がある。将来気候実験での側面境界条件は、客観解析データにGCMで見積もられた平均気候差分が上乘せされて作成される。上乘せされる平均気候差分は、空間分布をもつジオポテンシャル高度、気温、風速、表面温度(地表面温度や海面水温)であり、対象年間で平均した月ごとのデータとする。また、Hara et al.⁸⁾は、相対湿度を一定としている。PGW法では、

GCMで計算される情報のうち、各月の平均気候差分のみ信用できる情報であると仮定しており、GCMで計算される相対湿度の気候変化、年々変動の気候変化、擾乱などの短周期変動の気候変化の情報は用いない。しかし、平均気候差分のみを適用することで、様々な不整合が生じるため、予測の信頼性を下げる原因になっている。例えば、側面境界から計算領域に入ってくる台風に着目すると、将来気候の台風は現在気候と同じ位置同じタイミングで、側面境界から入ってくることになる。そこで著者らは、PGW法を高度化することで気候差分ダウンスケーリング法(Incremental Dynamical Downscaling and Analysis System (InDDAS))を開発している。PGW法ではGCMの平均気候差分しか扱っていないが、InDDASではさらに高次のGCMの気候変化要素も扱う。さらに、GCMの予測の不確実性をDSに組み込むことができる。

Wakazuki⁹⁾はGCMが予測する水蒸気量の平均気候差分の取り込み手法を開発した。PGW法で相対湿度を一定としているのは、湿潤環境下で相対湿度の差分を扱った場合、不自然な過飽和が頻発して予測が破たんするためである。そこで、相対湿度にかかわって、比較的良好に正規性近似ができる修正相対湿度を導入し、過飽和問題を解決した。温暖化時の相対湿度は全球スケールの観点からは大きく変化しないと予測されるが、地域スケールや陸域の大気下層では変化が起こる可能性が示唆される(IPCC¹⁾ほか)。このため、水蒸気量の変化成分の導入は領域気候変化予測に影響を与える。

Wakazuki et al.¹⁰⁾は、GCMが予測する月平均量の年々変動の気候変化を扱う手法を開発した。この方法は、客観解析データがもつ年々変動パターンを特異値分解し、説明可能な変動パターンをGCMから抽出した後、それぞれのモードの現在から将来への振幅の増幅を客観解析に施すものである。本論では、詳細の説明は省略する。冬型の気圧配置の出現の程度や、梅雨前線の出現の度合いがGCMで変化すると予測された場合に、その情報がRCMによる計算結果に反映される。ただし、RCMの計算結果に劇的な結果の違いを生じさせるものではない。InDDASではPGW法同様に、擾乱や短周期変動の気候変化を扱っておらず、RCM実験の境界条件においては、将来気候の低気圧は現在気候のそれと同じである。短周期変動の気候変化の扱いについては、将来の開発課題であり、特に極端事象の気候変化について定量するためには必要であり、現時点ではPGW法もInDDASも極端事象の気候変化を定量的に扱うのは問題がある。

Kawase et al.¹¹⁾は、PGW法において選択した7つのGCMの気候差分を上乘せした7つのRCM将来気候実験の結果を平均した結果は、7つのGCMの平均気候差分を用いた1つのRCM将来気候実験の結果と概ね等しくなることを示した。GCMの気候差分は特定のGCMから算出されたものである必要はなく、GCMの情報をもとに作成された平均などの統計量でも問題ないことが示された。

平均気候差分を上乗せしたRCM実験結果は、GCMの予測の不確実性を考慮した上で、最も信じ得る将来気候を算出する（ただし、バイアス補正は必要である）。

そこで、Wakazuki and Rasmussen¹²⁾は、気候差分の統計量を用いることで、平均像だけでなく不確実性の幅を定量的に見積もる手法を開発した。12か月分の月平均気候差分を複数GCM個並べ、平均気候差分とそこからの偏差に分ける。偏差成分を特異値分解することで、GCM間のばらつきのパターン（特異ベクトルとして抽出される）が得られる。それぞれのモードの変動パターンに正と負の標準偏差を掛け合わせることで、1つのモードの不確実性パターンに対して3種類の気候差分を作成することができる。3種類の気候差分 $\Delta\mathbf{X}^{(0)}$ （アンサンブル平均）、 $\Delta\mathbf{X}^{(+)}$ （正偏差）、 $\Delta\mathbf{X}^{(-)}$ （負偏差）は、

$$\begin{pmatrix} \Delta\mathbf{X}^{(0)} \\ \Delta\mathbf{X}^{(+)} \\ \Delta\mathbf{X}^{(-)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{\Delta\mathbf{X}} \\ \overline{\Delta\mathbf{X}} + \mathbf{S}\mathbf{V}^T\boldsymbol{\Sigma} \\ \overline{\Delta\mathbf{X}} - \mathbf{S}\mathbf{V}^T\boldsymbol{\Sigma} \end{pmatrix}$$

と表現される。ここで $\overline{\Delta\mathbf{X}}$ は平均気候差分、 $\mathbf{S}$ は標準偏差、 $\mathbf{V}$ は特異ベクトル、 $\boldsymbol{\Sigma}$ は $\mathbf{X}$ の標準化における標準偏差である。1つのモードにつき3つの気候差分の統計量が作成され、1, 2, 3...Mモードに対して3, 5, 7... $(2\times M+1)$ 個の気候差分の統計量が作成され、それぞれの気候差分を用いた将来気候実験が実施できる。上位数モードでGCMの不確実性が表現できる場合、多量のGCMサンプルがあった際にRCMの計算量を劇的に減少させることができる。

本研究では、Phase 3 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP3) の Special Report on Emission Scenarios (SRES) A1B (Meehl et al.¹³⁾)に基づく18個のGCM（表-1）を利用した。現在気候での気温場、アンサンブル平均(EM)、第1モード正負、第2モード正負の気温の気候差分を図-1に示す。ただし、現在気候を1980～2009、将来気候を2070～2099とした。EMIは3度程度の昇温を予測している。一方、第1モード正は4度、第1モード負は2.5度程度の昇温となっており、GCMの予測のばらつきのうち昇温量の大きさの違いは、最も大きな変動要素として第1モードに抽出される。第2モード以下は温度の違いは大きくないが、気温以外の大気循環のばらつきが顕著となる（図略）。このようにInDDASは、PGW法からの様々な高度化技法をパーツとして組み込むことで発展している。本研究では、これまで開発されたパーツを全て組み込んで、関東・中部山岳域の高解像領域気候実験を行った結果を紹介する。

表-1 利用した全球気候モデル一覧 (CMIP-3, SRES A1B)

BCCR-BCM2.0	CGCM3.1(T47)	CGCM3.1(T63)
CNRM-CM3	CSIRO-Mk3.0	CSIRO-Mk3.5
GFDL-CM2.0	GFDL-CM2.1	FGOALS-g1.0
INGV-SXG	NM-CM3.0	IPSL-CM4
MIROC3.2(hires)	IROC3.2(medres)	ECHAM5/MPI-OM
MRI-CGCM2.3.2	CCSM3	UKMO-HadCM3

図-1 RCMで計算された1月の1000hPaの平均気温の分布図。(a)は現在気候、(b-f)は18のGCMを用いて気候差分ダウンスケーリング法で見積もった平均気候差分で、(b)アンサンブル平均、(c)第1モード正、(d)第1モード負、(e)第2モード正、(f)第2モード負。

3. 高解像気候変化予測

表-2に本研究でのRCM実験の設定を、図-2に計算領域を示す。3重領域を設定し一方方向ネスティングを行う。格子間隔は24km, 6km, 2kmである。31年分の実験を並列で行った。実験は9月1日に始まり、翌年の11月1日に終了する。最初の2か月は立ち上げ期間と考え、解析から除外した。RCMとしてWRF (Weather Research and Forecasting) バージョン3.3.1 (Skamarock et al.¹⁴⁾) を利用しており、陸面過程はNoah-LSMスキームで計算されている。表-2の鉛直格子設定や物理スキームは、降水の強度別の頻度分布（特に強雨の頻度）が観測と近くなるように選択されたものである。

6km解像度実験では、第2モードまでの気候差分を扱い、5つのRCM将来気候実験を実施した。計算負荷の著しく大きい2km解像度実験は、EM実験のみとした。図-3は、6km、2km解像度実験での降水量分布およびその気候変化量を示す。6kmと2kmの実験間で目立つような特徴の違いはないものの、2km実験では、その地形の詳細さに対応して、より細かい空間分布が再現されている。中部山岳域および日本海・太平洋沿岸域で降水量は多い。気候変化量は日本海と太平洋沿岸域で降水量が顕著に増加すると予測される。特に冬季に日本海沿岸域で、夏季に太平洋沿岸域を中心とした広域で降水量増加が顕著である。春季と秋季の変化量は大きくない（図略）。いずれも、昇温に伴う大気下層の水蒸気量増加およびそれに

ともなう大気の成層不安定化が関係していると思われる。

図-4に降水量の変化比、1時間降水量の年3位値の変化比、24時間降水量の年3位値の変化比を示している。ここで、将来の値を現在の値で割った値を変化比とする。極値近傍値を代表して3位値を紹介する。温暖化に伴い降水量は増加している。変化比は、1.10程度である。関東平野付近では、2.7度程度の昇温であり、Clausius-Clapeyron(CC)効果を考慮すると（1度の昇温につき7%程度の増加に相当する）1.19程度の変化比になるが、予測はそれよりも小さな変化となっている。3位値の分布図ではランダムな斑点模様が浮き出るが、これは実験年数が少ないことによって生じるサンプリング誤差によるものと考えられる。3位値の変化比は降水量の変化比よりも大きく、関東平野では1.15～1.20程度の変化となる。降水量の変化比よりも極値近傍値の変化比の方が大きい。このように、極値の変化比がCC効果に近いという特徴は、近年の研究でも指摘されており、概ね妥当な結果といえる（IPCC¹⁾）。なお、他の上位値でも概ね似た傾向がみられた。

表-2 大気モデルおよび予測実験の設定。

実験設定	
モデル	WRF version 3.3.1
実験年	1979-1980 ～ 2009-2010 (31年)
実験期間 (1年実験)	9月1日 - 翌年11月1日
解析期間	11月1日 - 翌年11月1日
境界値データ	ERA-Interim (Dee et al. ¹⁹⁾)
格子情報	
領域	図-1
格子間隔 (領域1, 2, 3)	24km, 6km, 2km
格子数 (領域1, 2, 3)	112x91x37, 125x97x37, 189x174x37
物理過程	
雲物理過程	Double-moment 6-class scheme
放射	RRTMG scheme
陸面過程	Noah land surface model (on-line)
境界層乱流	Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5 PBL
積雲対流	Kain-Fritsch scheme (領域1)
都市効果	なし

図-2 RCMによる気候実験の領域（領域1～3），およびモデル標高。赤枠は図-5、図-6で用いる解析領域。

図-3 (a, b, c, d) 現在気候実験での降水量，(e, f, g, h) アンサンブル平均実験での降水量の変化量。(a, b, e, f)は年降水量。(c, g)は12～2月の降水量。(d, h)は6～8月の降水量。(a, e)は6km解像度の結果で、それ以外は2km解像度の結果。

図-4 RCMで計算された降水予測分布。(a, d) 年降水量，(b, e) 1時間降水量の年3位値，(c, f) 24時間降水量の年3位値。(a, b, c)は現在気候，(d, e, f)は気候変化比。いずれも2km解像度実験の結果。

4. 気候変化予測の不確実性

気候変化予測の不確実性を定量化するために、気候差分の第2モードまでの正負の摂動を用いたRCM将来予測実験を6km解像度で実施した。第1モードは図-1に示したように昇温量の違いが顕著に現れる。図-5は季節別の気温と降水量の変化で、第1モードの正負のRCM実験で結果が大きく異なっていることを示している。冬季の降水量は、昇温が大きいほど降水量の変化比も大きくなった。一方、夏季の降水量は、昇温量が大きくなれば降水量がより多く増加するという線形関係が満たされていない月があり（8, 9月）、昇温に対する応答の非線形性が顕著であることを示している。同様に、各月の上位3位値でも、非線形応答が特に8, 9月に見られる。

InDDASでは、マルチモード気候差分を用いたRCM実験の結果を用いて、将来の状態の確率情報を作り出すこ

図-5 (a)RCMで計算された平均2m気温の変化量（線グラフ）と降水量変化比（棒グラフ）の月別値。1P, 1M, 2P, 2Mはモード番号と正(P)負(M)を表現した省略記号。(b)1時間降水量と24時間降水量の3位値の変化比。6km実験解像度の結果で、図-2の赤枠領域の平均。

図-6 2モードまでの計算結果から確率値を算出する概念図。5つの丸印はRCMの結果から計算された気候値。等値線（直線）はそれらの値を重回帰分析で求めた等気候値線。影は多変量確率密度値。

とができる（Wakazuki and Rasmussen¹²⁾）。図-6で解説する。1つのモードに対して3つの実験結果が与えられるが、正規性を仮定すると、それらの値に相当する多変量確率密度値が決まる。複数モードに拡張した場合は、各モードの直交性を仮定して、同様に多変量確率密度値を推定する。次に気候差分に対するRCMの結果の線形応答を仮定して、抽出された気候値（2モードに対して5つ）の等値直線を重回帰分析で決める。最後に、多変量空間の確率密度値を等気候値毎に積分することで1次元確率密度値に変換すると、図-7に示されるように、GCMの予測の不確実性を考慮した将来の気温と降水量の確率密度分布を描くことができる。図-7の結果（バイアス補正がかけられていない）は、昇温と降水量増加は間違いないものの、大きな予測の不確実性があることを示している。なお、より確からしい確率分布を推定するには、第2モードよりもさらに下位のモードまで計算する必要がある。標準偏差がより大きくなる可能性がある。下位の気候差分には昇温量のばらつきの情報よりも循環場のばら

図-7 図-2の赤枠領域（関東平野）で平均したRCMで計算された(a, b)降水量と(c, d)平均2m気温の将来の確率分布（実線）。▼は現在気候実験の結果。(a, c)は6~8月、(c, d)は12~2月。6km実験解像度の結果。

図-8 RCMで計算された(a, b, c)平均2m気温の増加量と(d, e, f)降水量の変化比。(a, d) 75, (b, e) 50, (c, f) 25パーセンタイル値の分布。6km実験解像度の結果。

つきの情報が多く含まれているために、特に降水量の変化予測の不確実性評価に大きく影響を及ぼすことが推測される。この方法を用いると、図-8に示されるような気温と降水量の25, 50, 75パーセンタイル値分布などを描くことができる。75パーセンタイルの気温の状態と75パーセンタイルの降水量の状態は同時に出現するのではなく、あくまで要素ごとに値の小さいものから大きいものに並べた時の値の分布図である。関東の降水量予測には、比で1.07~1.16程度までの違いが予測されている。

5. まとめ

InDDASを用いて、関東および中部山岳域の大気環境の気候変化を予測する領域気候数値実験を実施した。InDDASでは、複数のGCMの気候差分のアンサンブル平均を用いたRCM実験で、最も起こり得る将来像を予測する。CMIP-3, A1Bシナリオに基づき21世紀末を予測した結果、対象計算領域では、2.7度程度の昇温、10%程度の降水量増加、15~20%程度の強雨の増加が予測された。また、気候差分を特異値分解することで、特定の統計情報をもった気候差分が作成される。それらの気候差分をRCM将来気候実験に利用することで、地域スケールの将来気候予測の不確実性の幅を見積もることができる。対象計算領域では、0.7度程度の標準偏差で気温の不確実性があり、年降水量の変化比では、7~16% (25~75パーセンタイル幅) 程度の幅が見積もられた。ただし、降水量の変化には、気候差分に対する非線形応答が認められたうえ、第2モードまでしか計算していないため、不確実性の幅はさらに広がる可能性がある。

本研究では、地域スケールの気候変化を確率論的に扱うことができた。一方で、いくつかの課題が残る。下位モードの実験の必要性、バイアス補正の必要性、正規性の仮定および非線形応答に対する扱い方の検討、短周期変動の気候変化の取り扱いに関する研究が必要である。

謝辞：本研究は、文部科学省の気候変動適応研究推進プログラム「気候変動に適応する河川・水資源地域管理システムの開発（代表：小池俊雄）」、文部科学省の気候変動適応技術社会実装プログラム「超高解像度ダウンスケーリング技術の開発（代表：石川洋一）」、および科学技術振興機構のテニュアトラック普及・定着事業の支援を得た。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by Stocker et al., 1535 pp, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2013.
- 2) Wilby, R. L., S. P. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton, L. O. Mearns, Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. 2004.
- 3) Wakazuki, Y., M. Nakamura, S. Kanada, C. Muroi: Climatological Reproducibility Evaluation and Future Climate Projection of Extreme Precipitation Events in the Baiu Season Using a High-Resolution Non-Hydrostatic RCM in Comparison with an AGCM. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 86, pp. 951-967, 2008.
- 4) Sato, T., F. Kimura, A. Kitoh: Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. *Journal of Hydrology*, Vol. 333, pp. 144-154, 2006.
- 5) Kimura, F., A. Kitoh: Downscaling by pseudo global warming method. *The final report of the research project on the impact of climate changes on agricultural production system in arid areas (ICCAP)*, Research Institute for Humanity and Nature, pp. 43-46, 2007.
- 6) Misra, V., M. Kanamitsu: Anomaly Nesting: A Methodology to downscale seasonal climate simulations from AGCMs. *J. Climate*, Vol. 17, pp. 3249-3262, 2004.
- 7) Tebaldi, C., L. Mearns, D. Nychka, R. Smith: Regional probabilities of precipitation change: A Bayesian analysis of multimodel simulations. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, pp. L24213, 2004.
- 8) Hara, M., T. Yoshikane, H. Kawase, F. Kimura: Estimation of the impact of global warming on snow depth in Japan by the pseudo-global-warming method. *Hydrological Research Letters*, Vol. 2, pp. 61-64, 2008.
- 9) Wakazuki, Y.: Modified relative humidity using the Johnson's S_B distribution function. *SOLA*, Vol. 9, pp. 111-114, 2013.
- 10) Wakazuki, Y., M. Hara, F. Kimura: A method to treat climate changes of year-to-year variations in the pseudo-global-warming method as a dynamical downscaling. American Geophysical Union 2010 Fall Meeting, San Francisco USA, 2010.
- 11) Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, F. Kimura, T. Yasunari, B. Ailiku, H. Ueda, T. Inoue: Intermodel variability of future changes in the Baiu rainband estimated by the pseudo global warming downscaling method. *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, pp. D24110, 2009.
- 12) Wakazuki, Y., R. Rasmussen: Incremental dynamical downscaling for probabilistic analysis based on multiple GCM projections. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1002/2015GL066242, 2015.
- 13) Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer, K. E. Taylor (2007), The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 88, pp. 1383-1394, 2007.
- 14) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, J. G. Powers: A description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Technical Note*, Vol. 475, pp. 1-113, 2008.
- 15) Dee, D. P., et al.: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol. 137, pp. 553-597, 2011.

(2015. 9. 30受付)