

数値気候モデルによる豪雨の量と頻度の推計に関する研究

福島大学大学院共生システム理工学研究科 川越 清樹

東北大学大学院工学研究科土木専攻 小野 桂介

1. はじめに

人為起源の温室効果ガス排出による気候システムの温暖化が指摘され、地球環境のリスク増大が危惧されている。リスク低減には、緩和策と適応策を補完的に用いることが必要とされており¹⁾、低炭素・循環型社会への順次的移行、温暖化を含む気候変動に伴う地球環境変化に適応できる社会形成が求められている。適切かつ具現化された緩和策と適応策の指針を得るため、大気、海洋等の気候要素と温室効果ガス排出シナリオ(以下 SRES: Special Report on Emissions Scenarios)に基づく数値気候モデルを用いた気候変動の推計が世界各国の研究機関で進められ、出力データを用いた影響評価が行われている。しかしながら、数値気候モデルの空間解像度は 0.5° から 2.5° 程度と粗く、局地的地形や土地利用状況により生ずる気象現象の再現には限界があると評価されている²⁾。これらに対し、数値気候モデルのバイアス補正³⁾、解像度のダウンスケーリング⁴⁾等の多角的なアプローチから、細解像度の気象現象にも対応可能なモデルの精度を高める研究が取り組まれている。その一方で、気候変動に対する早急な対応の要望から、マルチアンサンブルを用いることで、モデルの限界や不確実性を予め含めた気候変動の影響を統合的に推計する研究も進められている⁵⁾。この成果は、複雑な社会情勢に伴い変化する温室効果ガス排出量に応じて柔軟に対応できる気候変動対策の検討に有用である。

多くの数値気候モデルは、気候システムの温暖化が与える影響として水循環の活発化に従う豪雨頻度増加を見積もっている⁷⁾。日本列島は、環太平洋造山地域に由来する急峻な河川地形の発達する地形的特徴と、沖積平野に人口や資産の集中する社会的特徴により、河川を通じて相当量の水、土砂が短時間で移動しやすい条件を有する。そのため、毎年、台風や梅雨前線の停滞による豪雨に伴い水災害が頻発している。気候変動による豪雨頻度増加の推計は、日本列島の水災害のリスク増加と早急な対策の必要性を示唆するものである。

本研究では、AMeDASとIPCC data distribution center、および気候モデル開発機関より取得した18の数値気候モデルの出力データを利用することでSRESに応じた豪雨の再現精度を日本列島全域、都道府県別で検討するとともに、再現精度を踏まえて気候変動に伴う豪雨に関する量と頻度をマルチモデルで推計することとした。また、マルチモデルの推計結果を日本列島の近年の豪雨と水害被害額の関係式に当てはめることにより、気候変動に対する水災害リスクの影響評価を試みた。

2. 解析方法およびデータセット

(1) 数値気候モデルの豪雨再現精度検討

実績データと比較した数値気候モデルの豪雨再現精度は、1981年から2000年の期間を対象に日本列島全域、および都道府県毎で検討した。検討した項目は、日降雨量100mm以上の出現日数と最大日降雨量である。

a) データセット

実績データには、気候変動監視レポート2008を参考に観測データの均質性が長期間継続されていること、

*Study on heavy daily rainfall due to General Circulation Models, Fukushima University by Seiki Kawagoe and Tohoku University by Keisuke Ono

表-1 数値気候モデル利用データ

Model name	Country	SRES			Accession of output daily data		
		A1B	A2	B1			
BCCR-BCM2.0	Norway		○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
CCMa T47	Canada	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
CCMa T63	Canada	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
CNRM-CM3	France	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
CSIRO-Mk3.0	Australia	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
CSIRO-Mk3.5	Australia	○	○	○	1971-2100		
ECHAM5/MPI-OM	Germany	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
GFDL-cm2.0	USA	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
GFDL-cm2.1	USA	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
GISS-AOM	USA	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
ECHO-G	Germany/Korea	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
GISS-ER	USA	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
FGOALS-g1.0	China	○		○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
INM-CM3.0	Russia	○	○	○	1971-2000	2046-2100	
MIROC3.2(hires)	Japan	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
MIROC3.2(medres)	Japan	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
MRI-CGCM2.3.2	Japan	○	○	○	1971-2000	2046-2065	2081-2100
NCAR ccm3	USA/Japan	○	○	○	1971-2100		
NCAR ccm1	USA/Japan	○		○	1971-2000	2046-2065	2081-2100

また、各都道府県を網羅できることを考慮して、82ヶ所の地上気象観測所、AMeDASの暖候期(4月から11月)の日降水量データを利用した。検討に用いた数値気候モデルの出力データは表-1に示すとおりである。モデルの出力データは暖候期(4月から11月)の日毎の降水量である。モデル毎に排出シナリオ想定に差異があるものの、概ねのモデルは、地域的に持続可能な発展を描くSRES-B2(地域共存型社会)の緩慢な温室効果ガス排出を除いたSRES-A1B(化石・非化石燃料バランスによる高成長型社会)、A2(多元型社会)、B1(持続発展型社会)で気候値を推計しており、これらのSRESに対する日降雨量100mm以上の出現日数と最大日降雨量を求めた。

b) 数値気候モデル出力データの都道府県別集計

数値気候モデルの出力データは粗い解像度であるため、都道府県毎の気候値の導出が困難である。本研究では、メッシュ気候値2000(監修：気象庁)を基に数値気候モデル出力データを3次メッシュ(解像度1km×1km)にダウンスケーリングし、国土数値情報の都道府県コードにより都道府県別の日降雨量を求めた。メッシュ気候値2000は、1971年から2000年まで観測されたAMeDASの平年値を平均高度や陸度、海度等の地形要素を説明変数にした重回帰式で補間し、日本列島全域を3次メッシュ化した気候データである⁸⁾。そのため、地形に依存した細かい解像度の気候分布を表現できるデータとして数値気候モデルの簡易的ダウンスケーリングに利用されてきた⁹⁾。数値気候モデルの都道府県別日降雨量を求めるまでの過程を以下のi)～iv)に示す。

- i) 数値気候モデルの解像度に平均化したメッシュ気候値2000の月降雨量と数値気候モデルの1971年から2000年の平均月降雨量の比(モデル補正係数 Bm_j)を暖候期の月毎に求める。
- ii) 数値気候モデルの解像度に平均化したメッシュ気候値2000の月降雨量とこのメッシュ内のメッシュ気候値2000の月降雨量の比(細解像度変換係数 Bd_{ij})を暖候期の月毎、および3次メッシュ毎に求める。
- iii) モデル補正係数 Bm_j 、細解像度変換係数 Bd_{ij} を数値気候モデルの日降雨量 m_j に乗じて3次メッシュ毎の日降雨量 R_{ij} を求める。以下(1)に変換式を示す。

$$R_{ij} = m_j \cdot Bm_j \cdot Bd_{ij} \quad (1)$$

- iv) 3次メッシュを国土数値情報の都道府県コード毎に集計し、都道府県の日降雨量を求める。

(2) 気候変動に対する豪雨の量、頻度の検討

気候変動に対する豪雨の量、頻度の検討として、数値気候モデルの1981年から2000年(以下 現在気候)の20年間のデータを基準に設定し、2046年から2065年(以下 近未来気候)、2081年から2100年(以下 将来気候)の2期における日降雨量100mm以上の出現日数と最大日降雨量を日本列島全域、および都道府県毎に比較した。数値気候モデルの都道府県毎の集計は(1)節の方法と同様である。概ねの数値気候モデルは20世紀再現計算を基に21世紀に対する気候値を求めているため、1981年から2000年までを現在気候と仮定し基準に設定した。気候変動に応じた豪雨は数値気候モデル、およびSRES毎に検討するが、実績と数値気候モデルの豪雨再現精度もふまえた結果を考察で述べた。

(3) 気候変動に伴う水災害リスクの影響評価

気候変動に伴う水災害リスクの影響は、豪雨の実績と、水害被害額の関係を示すため、その関係に数値気

候モデルにより推計される気候変動に応じた豪雨の推計結果を反映させることで見積もられた。水害被害額は、1988年から2007年に対する各年のデータであり、国土交通省監修の水害統計より取得した。水害統計の水害被害額は、被害変化だけでなく、経済成長、停滞による各年の経済価値に影響されて変動する可能性が高い。これに対し、水害統計では、水害被害額デフレーターを用いることで平成12年基準の価格に統一した水害被害額を求めている。水害被害額の内訳として、一般資産、営業停止損失、農作物の被害のみを考慮した。

3. 数値気候モデルの豪雨再現精度検討

地上気象観測所、および AMeDAS による豪雨実績と数値気候モデルの豪雨推計を日本列島全域で比較検証した結果として、図-1 に日降雨量 100mm 以上の出現日数比較、図-2 に最大日降雨量比較を示す。なお、日本列島全域の日降雨量 100mm 以上の出現日数は、都道府県毎に出現した 1981 年から 2000 年の日降雨量 100mm 以上の日数の総和である。最大日降雨量は、都道府県毎に出現した最大日降雨量を日本列島で平均したものである。図から、数値気候モデルの出力結果は、総じて実績データよりも日降雨量 100mm 以上の出現日数が少なく、最大日降雨量も小さな値で示されていることが明らかになった。数値気候モデルは都道府県全土を平均したものであるため、局所的な多雨の平滑化が検討結果に影響した可能性もある。ただし、均質性が長期間継続される気象観測所の概ねは、平均高度が低い等の地形依存した降水の認められにくい主要都市に設置されている。そのため、平滑化の原因のみで一概に説明できるものではないと解釈される。この結果は、豪雨の再現精度を高める場合、メソスケールの大気水循環の物理過程、極端な降水事象出現の統計的アルゴリズムも考慮したダウンスケリングを行う必要性を示唆する。また、本研究で試みた数値気候モデルを直接的に利用した気候変動の影響評価を行う場合、変動比を活用することが適当であることを示している。以後の気候変動に対する豪雨の量、頻度の検討では、気候変動に伴う水害リスクの影響評価は変動比を利用する。

数値気候モデルの空間的な豪雨の再現性を評価するため、都道府県毎に再現性を検討した結果を図-3 に示す。量的な値について日降雨量 100mm 以上の出現日数、最大日降雨量ともに差異があるものの、静岡県から鹿児島に至る日本列島の南海地域、日本アルプスの高山地帯、北陸地方は相対的に多雨地域として一致する。

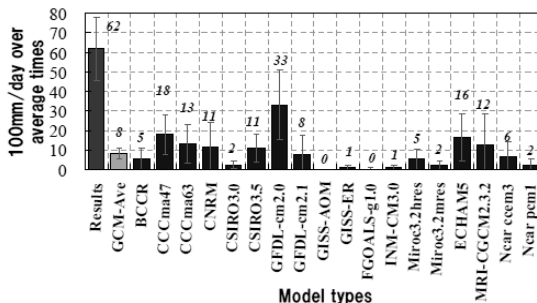


図-1 日降雨量 100mm 以上の出現日数比較

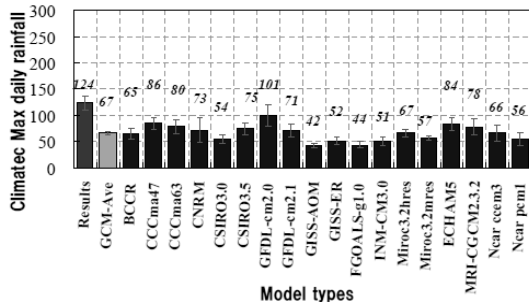
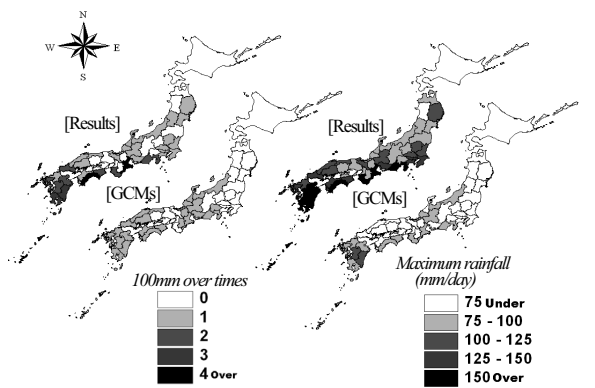


図-2 最大日降雨量比較



【100mm over times】 【Maximum daily rainfall】
図-3 都道府県毎の再現精度検討比較

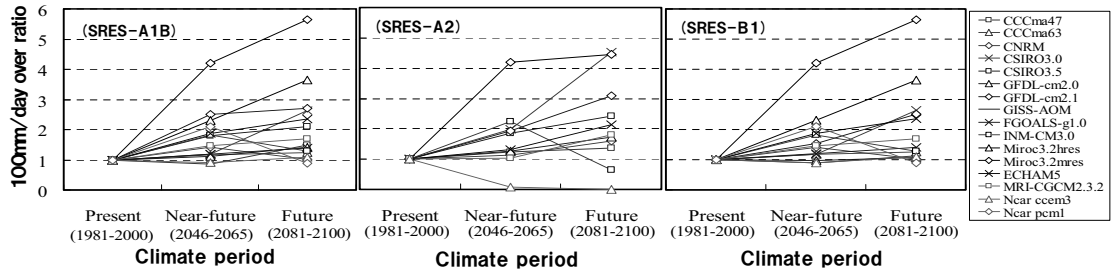


図4 日本列島全域に対する SRES に応じた各数値気候モデルの日降雨量 100mm 以上の出現日数比

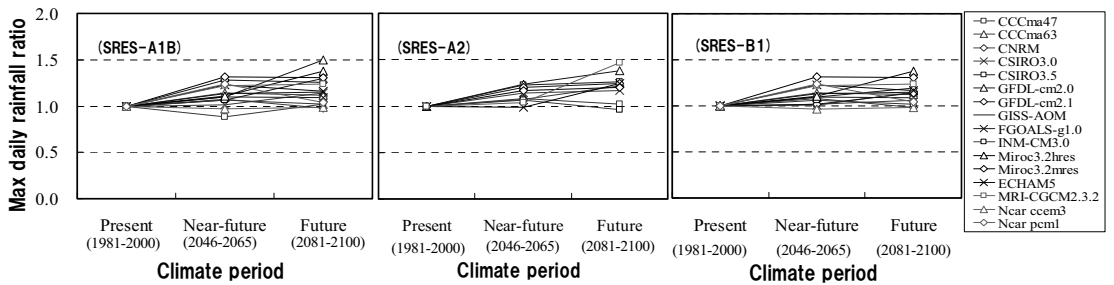


図5 日本列島全域に対する SRES に応じた各数値気候モデルの最大日降雨量比

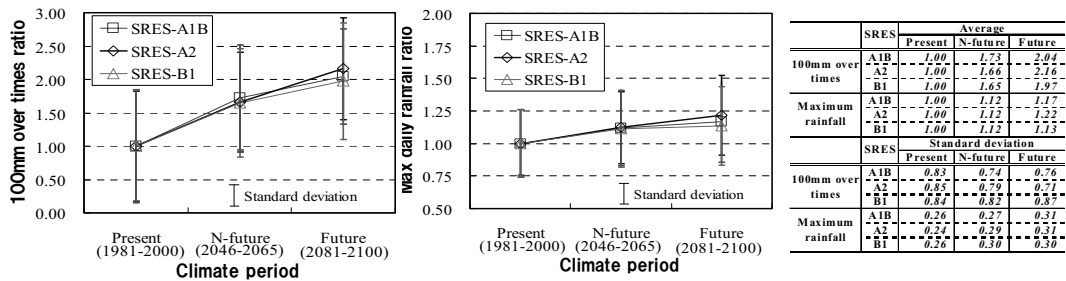


図6 SRES に応じた日降雨量 100mm 以上の出現日数比と SRES に応じた最大日降雨量比

しかしながら、東北地方、関東地方では、数値気候モデルにおいて豪雨の影響が認められないのに対し、実績データにより日降雨量 100mm 以上の出現日数が多く、最大日降雨量も大きな値が示されている。特に関東地方では、実績と数値モデル間に著しい差異が認められている。都市排熱に起因した水循環の活発化に伴う局所的な短時間の降雨が近年問題にされているが¹⁰⁾、数値気候モデルで再現しにくい都市化によるメソスケールの大気水循環過程により出現する豪雨の存在が実績とモデルの誤差を広げているものと推測される。

4. 気候変動に対する豪雨の量、頻度の検討

実績と数値気候モデルの豪雨再現精度の検討より、変動比を基に気候変動に対する量、頻度を求める。図-4 は、日本列島全域に対する SRES に応じた各数値気候モデルの日降雨量 100mm 以上の出現日数比を現在気候、近未来気候、将来気候で集計したものである。SRES-A1B は、MIROC3.2mdres を除くと近未来気候時に変動比 1.0 から 2.5、将来気候時に変動比 1.0 から 3.0 前後に到達する安定した推移を示す。また、SRES-B1 は、MIROC3.2mdres と hres を除くと近未来気候時に変動比 1.0 から 2.0、将来気候時に変動比 1.0 から 2.5 前後に到達する安定した推移を示す。その一方で、SRES-A2 に関すれば、数値気候モデルによって不規則に変動し、大きなばらつきを示している。この原因として、経済重視、地域性重視という極限状態の SRES に伴い不規則に豪雨出現することが考えられる。図-5 は、日本列島全域に対する SRES に応じた各数値気候モデルの最大

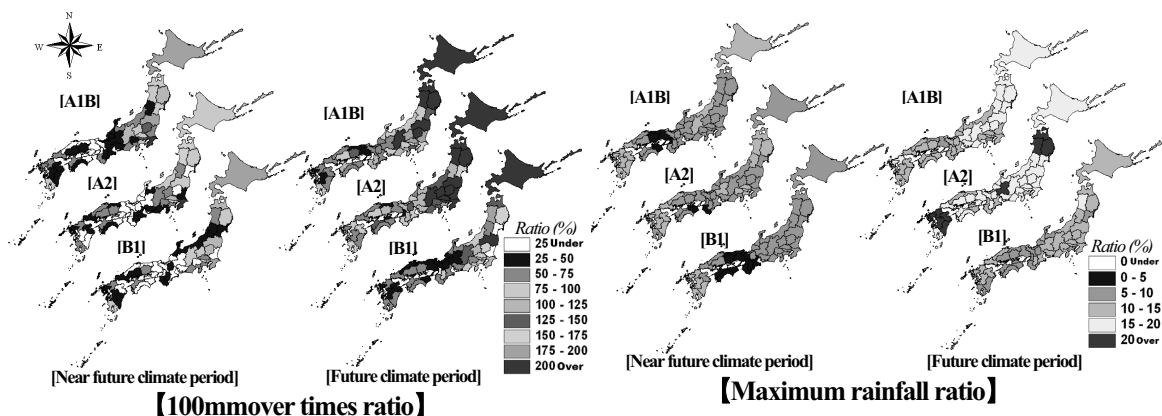


図-7 気候変動に対する都道府県毎に変動比増加量

日降雨量比を現在気候、近未来気候、将来気候で集計したものである。日降雨量 100mm 以上の出現日数比と比較して、いずれの気候モデル、および SRES とともに安定した推移を示している。また、最大日降雨量の変動比も 1.0 から 1.5 弱であり、日降雨量 100mm 以上の出現日数よりも小さな変動比で示されている。この結果は、日降雨の量よりも、日降雨量 100mm 以上に示される豪雨の頻度が気候変動に従い著しく増加することを示している。図-4 と図-5 を SRES 毎に整理したものが、図-6 である。日降雨量 100mm 以上の出現日数比より、近未来気候時まで SRES-A1B の日降雨量 100mm 以上の出現日数比が最大だが、将来気候時に SRES-A2 の日降雨量 100mm 以上の出現日数比が最大に変化することが明らかになった。これは IPCC 第 4 次評価報告書の結果と一致する¹⁾、気温上昇に伴う水循環の活発化に起因して日本列島の豪雨頻度が高まることを示す。

空間的な豪雨増加量を評価するため、都道府県毎に変動比増加量を示したものが図-7 である。日降雨量 100mm 以上の出現日数比の増加量より、関東地方以北の豪雨頻度の高まりが認められる。特に、北海道、青森県、岩手県、秋田県の東北地方北部、関東地方、関東地方に接する福島県、山梨県、長野県の豪雨頻度の顕著な増加が示されている。将来気候時には、各 SRES とともにこれらの地域で 200%以上(現在比 3 倍以上)の日降雨量 100mm 以上の出現日数比の増加量が認められる。最大日降雨量比の増加量より、大局的に愛知県から北側の日本列島、九州地方の降雨量増加が示されている。数値気候モデルに基づく結果を統合すると、気候変動により日本列島北部の豪雨頻度、量が著しく増加すると解釈される。北海道、東北地方は、台風の上陸および接近しやすい静岡県から鹿児島島に至る日本列島の南海地域と比較すると豪雨に伴う水災害の稀な地域である。しかしながら、数値気候モデルにより推計される豪雨から、気候変動に伴う水災害の急増が懸念される。

5. 気候変動に伴う水害リスクの影響評価

数値気候モデルの豪雨推計結果を参考に、気候変動による水害リスクの影響を評価した。検討結果は、図-8 の日降雨量 100mm 以上の出現日数と水害被害額の関係に示すとおりである。実績による日降雨量 100mm 以上の出現日数と水害被害額の間を定式化した場合、最も強い相関を示したものが指数関数式である。この式は決定係数 $R^2=0.562$ で示され、統計的に有意な関係と解釈できる。この関係をふまえて、1988 年から 2007 年までの日降雨量 100mm 以上の平均出現日数を現在気候に対応できる基準として設定し、図-7 で求められた SRES に応じた日降雨量 100mm 以上の出現日数比を乗じて指数関数式に代入することで近未来気候、将来気候の平均的な水害被害額を求めた。なお、基準となる現在気候の平均水害被害額は 1160 億円である。実績を考慮した検討結果より、近未来気候時において、およそ現在比 6 倍から 7 倍の被害になることが見込まれる。また、

将来気候時では、およそ現在比 13 倍から 20 倍の被害になることが見込まれる。近未来気候に関するれば各 SRES ともに水害被害額に差異が小さいものの、将来気候により被害額差が広がる傾向を示す。なお、将来気候時の水害被害額は、豪雨に伴い深刻な災害の生じた 2004 年の約 1 兆 4160 億円に匹敵し、将来気候において 2004 年時と同等な水災害が頻発することを懸念させるものである。

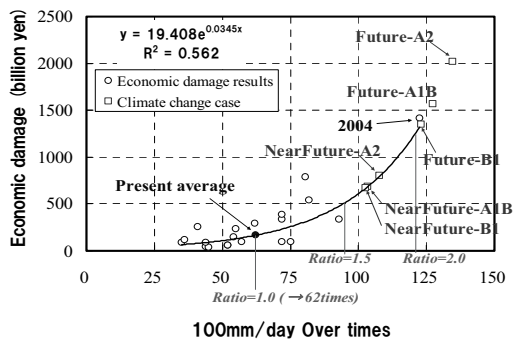


図-8 豪雨出現日数と水害被害額の関係

6. おわりに

数値気候モデルの再現精度を検討するとともに、モデルを基に気候変動に応じた日本列島、および都道府県毎に豪雨の量と頻度の推計を試みた。結論、および考察を以下に列挙する。

- 1) 実績と数値気候モデルの再現精度の検討より、関東地方の誤差の大きさが明らかになった。この結果は、メソスケール現象も考慮したダウンスケーリング手法の向上に努める必要性を示す。
- 2) 豪雨の量と頻度の検討より、数値気候モデルでは、気候変動に対し日降雨量100mm以上の出現日数比が最大日降雨量比よりも大きな変化を示すことが明らかになった。
- 3) 豪雨の量と頻度の検討より、数値気候モデルでは、気候変動に応じて日本列島北部の豪雨頻度、量が著しく増加することが明らかになった。
- 4) 気候変動に伴う水害リスクの影響評価より、日本列島の豪雨頻度の変化を考慮した場合、近未来気候時に現在比約6倍から7倍、将来気候時に現在比約13倍から20倍の水害被害額が見込まれることを明らかにした。

謝辞：本研究は環境省地球環境研究総合推進費（S-4）の研究助成によって行われた。数値気候モデルのデータ処理でみずほ情報総研株式会社様に指導を頂いた。ここに記して謝意を示す次第である。

参考文献

- 1) 経済産業省、気象庁、環境省：IPCC第4次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約、pp.1-24, 2007.
- 2) 例えばHasegawa, A., and Emori, S. : *Tropical cyclones and associated precipitation over the western North Pacific; T106 atmospheric GCM simulation for present and doubled CO2 climate*, SOLA, Vol.1, pp.145-148, doi:10.2151/sola, 2005.
- 3) 例えばAmor V.M. Ines, James W. Hansen : *Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies*, Agricultural and Forest Meteorology, Volume 138, Issues 1-4, pp.44-53, 2006.
- 4) 例えばBarbara Tomassetti, Marco Verdecchia and Filippo Giorgi: *A neural network based approach for the downscaling of precipitation fields – Model description and preliminary results*, Journal of Hydrology, Volume 367, Issues 1-2, pp.14-26, 2009.
- 5) 例えばJean-Philippe Vidal, Steven D. Wade : *Multimodel projections of catchment-scale precipitation regime*, Journal of Hydrology, Volume 353, Issues 1-2, pp.143-158, 2008.
- 6) 例えばYuji Masutomi, Kiyoshi Takahashi, Hideo Harasawa and Yuzuru Matsuoka : *Impact assessment of climate change on rice production in Asia in comprehensive consideration of process/parameter uncertainty in general circulation models*, Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 131, Issues 3-4, pp. 281-291, 2009.
- 7) 清野裕：アメダスデータのメッシュ化について、農業気象, Vol.48, pp.319-383, 1993.
- 8) 川越清樹, 風間聡, 脇岡靖明, 高橋潔：土砂崩壊リスク評価に対する気候モデルの適用, 土木学会水工学論文集, No.53, pp.661-666, 2009.
- 9) 国土交通省：平成19年度版水害統計, pp.1-464, 2009.
- 10) 例えば三上岳彦：ヒートアイランド現象と都市型集中豪雨, 下水道協会誌, Vol.42, No.512, pp.4-6, 2005.