

27. アジア領域の気候変動推計に関わる 降雨データベースの構築と検討

新垣 和¹・伊藤 圭祐¹・川越 清樹^{2*}

¹福島大学大学院共生システム理工学研究科（〒960-1296福島県福島市金谷川1）

²福島大学共生システム理工学類環境システムマネジメント専攻（〒960-1296福島県福島市金谷川1）

* E-mail: kawagoe@sss.fukushima-u.ac.jp

本研究では、既往の降雨量データを利用し「日本列島の亜熱帯化」を降雨量に着目して定式化、定量化することを試みた。また、広範領域との気候変動の比較検証を行うため、アジア領域全体を対象に、ケッペンの気候区分に応じた定式化、定量化の評価を進めること、数値気候モデルであるMIROC5の出力データに基づいた将来の気候区分変化を検討することを進めた。日本の亜熱帯化、およびアジア領域気候特性、および変動を降雨量で比較検証し、降雨変化に従った温暖化影響、および適応策を見積もる基礎データベースの構築を目的とした検討に取り組んだ。

結果として、現在気候において、日本領域で24時間降雨量の増加と降雨現象の極端現象が進んでいることを定量化した。その一方で、アジア領域では明瞭な降雨現象の極端現象を定量化をすることができなかった。将来の気候データに基づく気候区分では気候遷移するエリアが空間的に明示した。今後、アジアの「気候遷移帯」を対象に降雨、そして降雨変化に伴う水環境の温暖化影響を展開する意向である。

Key Words : *Global warming, extreme rainfall, koppen-Geiger classification, climate transition zone*

1. はじめに

人為起源の温室効果ガス排出量増加に伴う気候システムの温暖化、および極端な降雨事象の出現が、世界各国の研究機関で開発された数値気候モデルの計算により推計されている。IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptationでは、21世紀中に強い降雨の発生頻度あるいは総降水量に占める強い降雨の割合が世界の多くの地域で増加する可能性を説明するとともに「人の生活やその他の社会経済活動等が極端現象により悪影響を受ける可能性がある場所に存在すること」を報告している¹⁾。極端な降雨事象の中に含まれる降雨量増大に関しては、社会の安全を担う治水の設計基準量に大きな影響を与えるものであり、災害のリスクの効率的な運用等の今後の水分野の課題を顕在化させる現象になる。そのため、事前に将来の降雨特性を見積もることが必要である。また、こうした、見積もりを勧めることで、温暖化に対する水環境の緩和策や適応策を議論することが可能になる。

近年、北日本で強雨頻度増加が認められていることや、日本列島を含む中緯度地域が亜熱帯化していることなど

の報告がなされている。ケッペンの気候区分で分けると日本列島の概ねは温帯地域に属するが、今後温暖化が進み気候的に区分が変化していけば、日本列島に亜熱帯化領域が拡大する。その場合、亜熱帯地域で生じている固有の水環境問題が波及する可能性もあり、事前に熱帯地域の水環境問題との比較検討を行い、温暖化に対応できる水管理体制も検討していくことが必要である。この場合、気温のみならず、降雨の動向を定量的に示すことは、効率的に評価をするための有益な情報になりうる。

本研究では、既往の降雨量データを利用し「日本列島の亜熱帯化」を降雨量に着目して定式化、定量化することを試みた。また、広範領域との気候変動の比較検証を行うため、アジア領域全体を対象に、ケッペンの気候区分に応じた定式化、定量化の評価を進めること、数値気候モデルであるMIROC5の出力データに基づいた将来の気候区分変化を検討することを進めた。日本の亜熱帯化、およびアジア領域気候特性、および変動を降雨量で比較検証し、降雨変化に従った温暖化影響、および適応策を見積もる基礎データベースの構築を目的とした検討に取り組んだ。

2 解析方法及びデータセット

日本、およびアジアの気候変動と降雨極値(24時間降雨量)変化の関係を分析するために以下1)から4)の検討を進めた。

- 1) 先行研究で取り組まれた牛山らによる降雨極値と暖候期(4月から11月)強い相関性²⁾、川越らによる開発された再現期間降雨極値変換式³⁾を参考に、日本列島を対象に2000年(1980年から2000年)、2010年(1990年から2010年)の再現期間降雨極値と暖候期の最大月降雨量の関係(回帰式)を比較検証した。この関係の比較により、時間変化による降雨極値の推移を評価した。データセットとしてAMeDASによる観測地を利用した。
- 2) 日本列島で求められた降雨極値と暖候期の強い関係がアジア領域に適用できるかを検証するため、NOAA Satellite and Information Service(NNDC CLIMATE DATA Online)で提供される雨量観測地データを用いて、降雨極値と暖候期の最大月降雨量の関係を検証した。この際1975年から2013年までのデータを用いた。さらに、雨季・乾季があるアジア地域での精度を高める目的で1年365日のうち328日以上観測(90%以上)が行われている地域のみ今回のマップのデータに利用した。
- 3) 並行してアジア各地の降雨極値の空間分布を求め、ケッペン・ガイガーによる気候帯区分と比較して気候帯に応じた降雨極値特性を求めた。
- 4) IPCC第5次評価報告書に用いられたCMIP5の数値気候モデルの降雨量アウトプット(MIROC5: 東京大学/国立環境研究所/JAMSTEC共同開発)を利用し、2050年時のケッペン・ガイガーによる気候区分を求め、降雨極値の時間変化の可能性を検討した。

これら1)から4)の取り組みにより、以下の①から④を明らかにすることに取り組んだ。

- ① 日本列島の気候変動に伴う降雨極値の推移
- ② アジア領域への気候変動評価手法の適用性
- ③ アジア領域の気候帯に応じた降雨特性
- ④ 気候変動による気候遷移帯の抽出と降雨変動の可能性

①から④を明らかにすることで、温暖化に伴う降雨極値変化に対する水環境評価、および適応策を議論できる有用な基礎データが整備される。

検討1)について詳細の説明を加える。再現期間は、

AMeDAS観測所に対する降雨極値の頻度解析により求めた。確率分布型として極値分布であるGEV(Generalized Extreme Value)分布、母数推定法としてPWM(Probability Weight Moment)法を用いた。極値分布は、母集団に対する最大値および最小値の漸近分布である。そのため、降雨や洪水流量の最大値抽出に有効な確率分布である。GEV分布関数は式(1)から式(3)で求められる。PWM法は式(4)から式(7)で求められる。GEV分布による降雨極値は全国各地のAMeDAS観測所825箇所のデータから求められた。

$$F(x) = \begin{cases} \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k(x-c)}{a} \right]^{\frac{1}{k}} \right\} & (k \neq 0) \\ \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{x-c}{a} \right] \right\} & (k = 0) \end{cases} \quad (1)$$

$$F(x) = \exp \{ - \exp(-s) \} \quad (2)$$

$$s = \begin{cases} - \frac{1}{k} \ln \left\{ 1 - \frac{k(x-c)}{a} \right\} & (k \neq 0) \\ \frac{x-c}{a} & (k = 0) \end{cases} \quad (3)$$

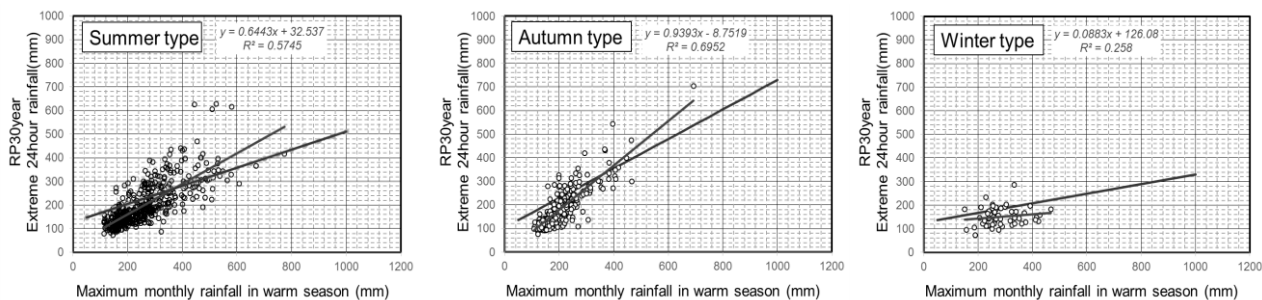
$$\beta_r = E \{ X [F(X)]^r \} = \int_0^1 x F^r dF \quad (4)$$

$$\beta_{r1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{(j)} \{ F(x_{(j)}) \}^r \quad (r = 0, 1, 2) \quad (5)$$

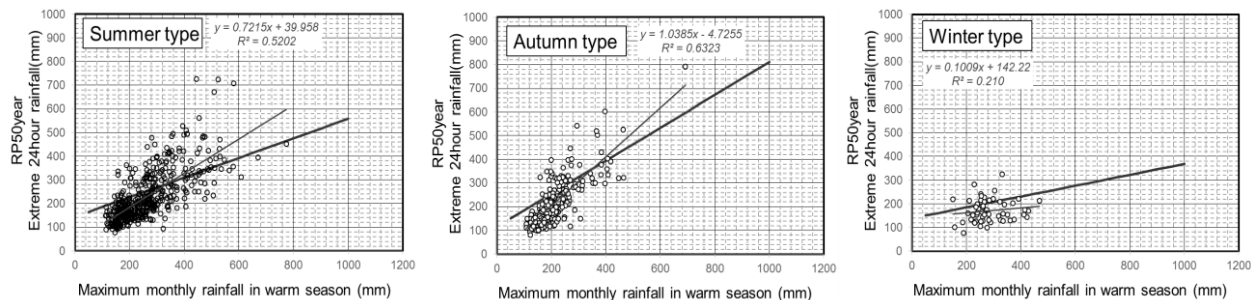
$$\begin{cases} \lambda_1 = \beta_0 \\ \lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \\ \lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 = c + \left(\frac{a}{k} \right) [1 - \Gamma(1+k)] \\ \lambda_2 = \left(\frac{a}{k} \right) (1 - 2^{-k}) \Gamma(1+k) \\ \frac{2\lambda_2}{\lambda_3 + 3\lambda_2} = \frac{1 - 2^{-k}}{1 - 3^{-k}} \end{cases} \quad (7)$$

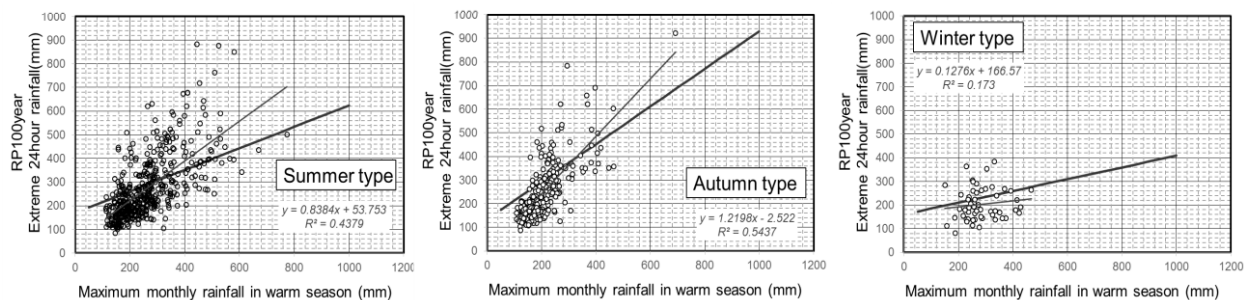
ここで、 S :標準変数、 β_r :確率重み付積率(PWM)、 $E\{\cdot\}$:期待値演算子、 $F(X)$:確率変数 X の分布関数、 $x_{(j)}$: N 個の標本を大きさ順に並べ換えたときの小さいほうより j 番目の値、 β_{r1} :標本による PWM の推定値、 $F(x_{(j)})$:プロットイングポディション、 $x_{(j)}$:積率、 $\Gamma(\cdot)$:ガンマ関数、 c, a, k は母数パラメータである。



(1) 再現期間 30 年の降雨極値(24 時間降雨量)



(2) 再現期間 50 年の降雨極値(24 時間降雨量)



(3) 再現期間 100 年の降雨極値(24 時間降雨量)

図-1 再現期間降雨極値と暖候期の最大月降雨量の関係

再現期間降雨極値と暖候期の最大月降雨量の関係(回帰式)を比較検証するが、これは、日本列島を総括して評価するのではなく、気候特性を踏まえた区分毎に実施した。なお、気候区分に関しては、四季別に降雨特性を捕らえることで気候依存した分類を行う条件にした。気候依存した降雨イベントを台風を例に説明すると、日本列島の北側ほど勢力が弱まり、降雨分布の地域格差が生じる。こうした事例に示される地域的な特徴、そしてこの地域に関わる気候特性を四季別にすることで理解しやすく示すを試みている。春型は3月から5月、夏型は6月から8月、秋型は9月から11月、冬型は12月から2月と区分し、春と夏型、秋型、冬型毎の暖候期中の最大月降水量と、AMeDAS観測所の再現期間に対する降雨極値を用い、気候に応じた回帰式をもとめた。春季に最大降雨量を示す地域は、薩南諸島以南のみであること、この地域の夏季

と春季はほとんど降雨差がないこと理由から夏型に統合した。

3. 日本列島の降雨極値と気候特性の関係解析

日本列島における降雨極値変化の結果として、再現期間30年、50年、100年を図-1に示した。また、各変換式(回帰式)の係数の関係を表-1に示した。

基本的に暖候期最大月降水量と再現期間の降雨極値を示す関係式は、夏型、秋型は強い決定係数 R^2 を示した。2000年期と2010年期を比較すると、切片の傾向は、2010年期のほうが小さな値を示す傾向を示す。一方で、傾き係数は2010年期のほうが大きな値を示す。この数値情報は、切片について気候的な潜在の24時間降雨量が小さくなっていることを示している。その一方で、傾きについて気候帯の中で多雨になりやすい地域については降雨量増

表-1 日本列島の降雨極値変換式の係数

再現期間	季節型	2000 年 期		2010 年 期	
		係数 a	切片 b	係数 a	切片 b
30 年	夏型	0.38	127.53	0.64	32.53
	秋型	0.62	104.25	0.94	-8.75
	冬型	0.20	125.75	0.08	126.08
50 年	夏型	0.41	144.3	0.72	39.95
	秋型	0.69	116.12	1.03	-4.72
	冬型	0.22	139.16	0.10	142.22
100 年	夏型	0.45	170.17	0.83	53.75
	秋型	0.79	133.86	1.21	-2.52
	冬型	0.24	160.15	0.12	166.57

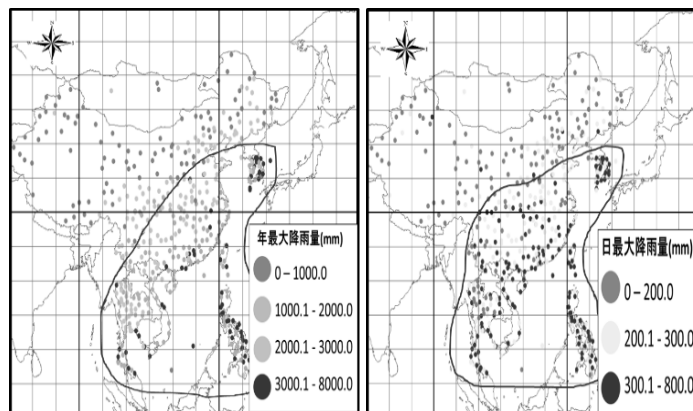


図-2 アジア領域での年降雨量・日降雨量マップ

加していることが示されている。そのため、同じ気候帯の地域の中で降雨量の増減が大きく認められていることを示唆している。これらの結果より、IPCC Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptationに記載された総降水量に占める強い降雨の割合が大きくなる地域と小さくなる地域が日本国内の気候区でも分かれていることが明らかにされた。近年に推移することで強い降雨の割合の大きくなる結果は、降雨現象から求めることのできる地域別の災害リスクの違いを誘導させるべき指標になるため、適応策の具体的誘導に資することのできる資料になりうる。

4. アジア領域の降雨極値と気候特性の解析

アジア領域の降雨極値と気候特性の解析の結果として、降雨極値の変化マップを図-2に示した。赤枠の地域では降雨量が増大しており、年降雨量に関して韓国やマニラなど海沿い付近でまれに平均よりも1000mm以上も降雨が多い年がある。世界平均降水量が約970mmとなっていることから1000mm以上の降雨というのは非常に多いことがわかる。そのため、降雨の少ない地域でも水災害に備える必要があること、日降雨量に関しては日平均降雨量と日最大降雨量の差が大きい地域がありこの地域では局地的豪雨が起きていることが読み取れる。また、表-2にはアジア領域の降雨極値変換式の係数を示すが、いずれの気候帯ともに日本で認められた強い相関性は認められない。アジア領域については継続観測されている限られた観測地点のデータであり、データ選定上での問題が生じている可能性もある。しかしながら、総じて強い相関ではないため、日本の経験式を適用することは困難であるものと推測される。

そのため、表-2を基に温度・降雨極値の総括表として表-3を作成した。気候帯毎の降雨極値として、位置的に

表-2 アジア領域の降雨極値変換式の係数

気候区分		降雨極値変換式		
		係数 α	切片 β	相関係数 R
Af	熱帯雨林	0.07	293.52	0.08
Am	熱帯モンスーン	-0.03	392.91	0.04
Aw	サバナ	-0.06	325.02	0.03
Bsk	ステップ	-0.06	220.29	0.06
Bwk	砂漠	0.29	-98.76	0.21
Cfa	温帯湿潤	-0.09	350.59	0.11
Cwa	温帯夏雨	-0.03	294.09	0.03
Cwb		-0.57	281.21	0.07
Dfa	湿潤大陸	-0.46	644.23	0.65
Dfb		-0.26	430.53	0.38
Dwa		0.12	116.13	0.12
Dwb		-0.80	884.70	0.46
ET	ツンドラ	-0.09	240.47	0.08

低緯度から高緯度になるに従い熱帯から寒帯に推移するが、降雨量は徐々に減少する傾向を示した。年最大日降雨量の最大値については気候帯差異が「小」、最小値については差異温帯湿潤気候から熱帯モンスーンに変化すると毎年の最大日降雨量が100mmから140mmに増加する可能性を示唆する。

5. ケッペン気候区分による降雨極値変化の予測

RCP(Representative Concentration Pathways)シナリオではシナリオ相互の放射強制力が明確に離れていることなどを考慮して、2100年以降も放射強制力の上昇が続く「高位参照シナリオ」(RCP8.5)、2100年までにピークを迎えその後減少する「低位安定化シナリオ」(RCP2.6)、これらの間に位置して2100年以降に安定化する「高位安定化シナリオ」(RCP6.0)と「中位安定化シナリオ」(RCP4.5)の4つのシナリオがある。現在の気候帯を図-3、2100年における温室効果ガス排出量の最大排出量に相当するRCP8.5

表-3 気候帯別の温度・降雨極値の総括表

気候区分	Af	Am	Aw	Bsk	Bwk	Cfa	Cwa	Cwb	Dfa	Dfb	Dwa	Dwb	ET
	熱帯雨林	熱帯モンスーン	サバナ	ステップ	砂漠	温暖湿潤	温帯夏雨		湿潤大陸				ツンドラ
最暖月平均気温(°C)	—			10°C以上		22°C以上	22°C以上	10°C以上 22°C未満	22°C以上	10°C以上 22°C未満	22°C以上	10°C以上 22°C未満	0°C以上 10°C未満
最寒月平均気温(°C)	18°C以上			—		-3°C以上18°C未満			-3°C未満				—
年最大日降雨量最大値(mm)	491	500	500	257	340	500	486	460	334	347	344	453	351
年最大日降雨量最小値(mm)	190	140	127	89	89	100	100	96	119	109	649	101	104
年最大日降雨量と 平年最大月降雨量 最大値の関係	係数α	-0.0262	-0.056	-0.0631	0.2865	-0.0887	-0.0272	-0.573	-0.4597	-0.2641	0.1188	-0.7985	-0.0883
	切片β	293.52	392.91	325.02	220.29	350.59	294.09	281.21	644.23	430.53	116.13	884.7	240.47
	相関係数R	0.0751101	-0.03637	-0.03371	-0.0589	0.20554	-0.11244	-0.02995	-0.06833	-0.64936	-0.37875	0.124787	-0.46208
該当国名	フィリピン、 中国	台湾、 ベトナム	フィリピン	中国	中国	台湾、韓国	ベトナム	中国	韓国	韓国	韓国	中国	中国

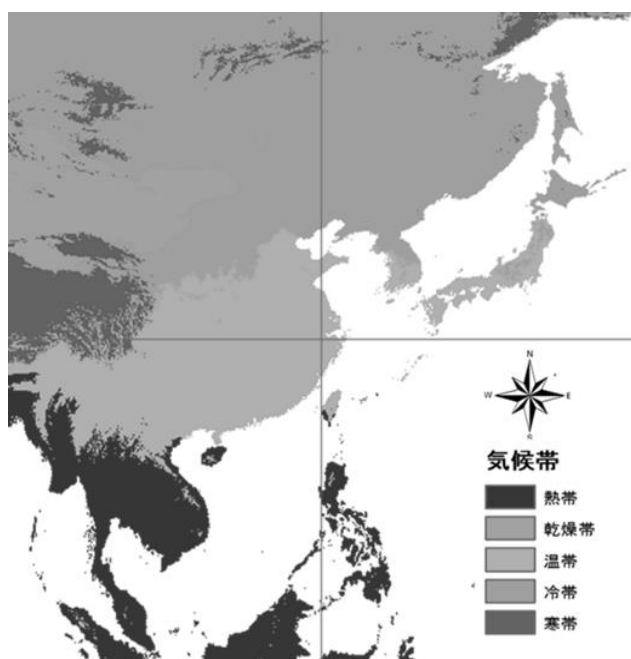


図-3 現在気候によるケッペンの気候区分マップ

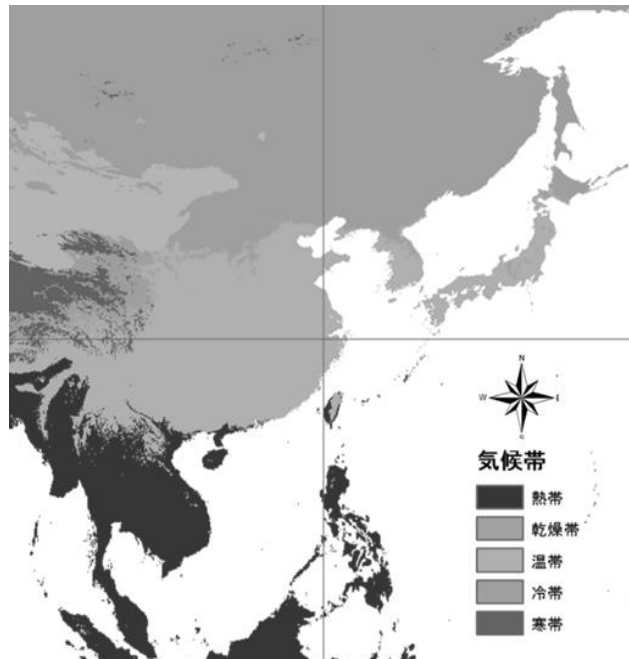


図-4 2100年RCP8.5によるケッペンの気候区分マップ

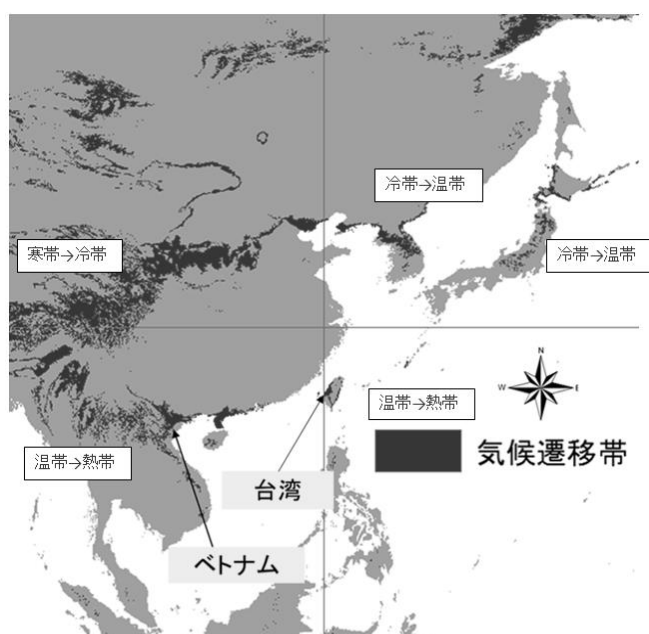


図-6 現在気候と2100年期の比較による気候遷移

と現在の気候帯を図-4、2100年の気候帯を図-5、双方を

比較したものを図-6に示す。日本列島では沖縄(温帯→熱帯)・北日本地域(冷帯→温帯)で気候帯が変遷していくことが分かり、気候変動による毎年の強雨頻度増加の可能性が示唆される。他のアジア領域で見てみると現在乾燥帯の地域や台湾、ベトナム地域で幅広い気候帯遷移が示された。これらの地域は、降雨極値の変化の可能性も高いことが示唆される。今後、更に他の数値気候モデルも検討し、水環境の将来像を見積もるため、気候遷移帯の議論をしなければならない。

気候帯で変遷のあった地域として、ベトナムと台湾をピックアップする。図-7にベトナムの気候遷移マップを示す。図に示された通り、紅河の地域を中心に気候帯が変遷していることがわかる。紅河の水は土砂を多量に含んでおり、オレンジ色に見えるため「紅河」と呼ばれていることから、土砂含有量はベトナムの河川のうち最大で、毎年約2億トンという膨大な量の土砂を河口へ運んでおり、紅河が運ぶ土砂の量は、ベトナムの全河川の土砂量の総計の60%も占めている。今後、気候帯が変遷し

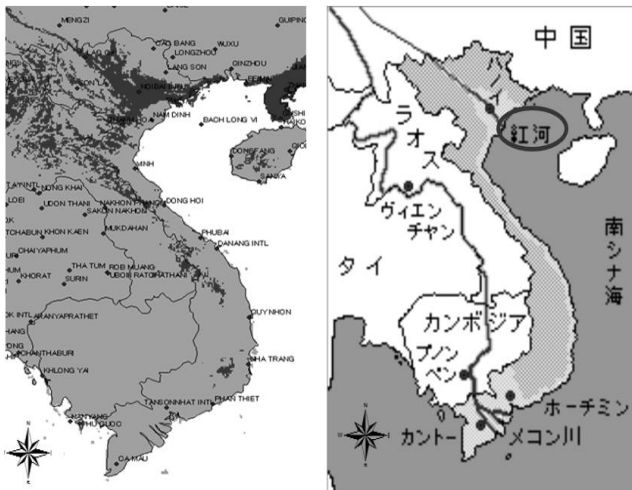


図-7 ベトナム気候遷移帯マップ

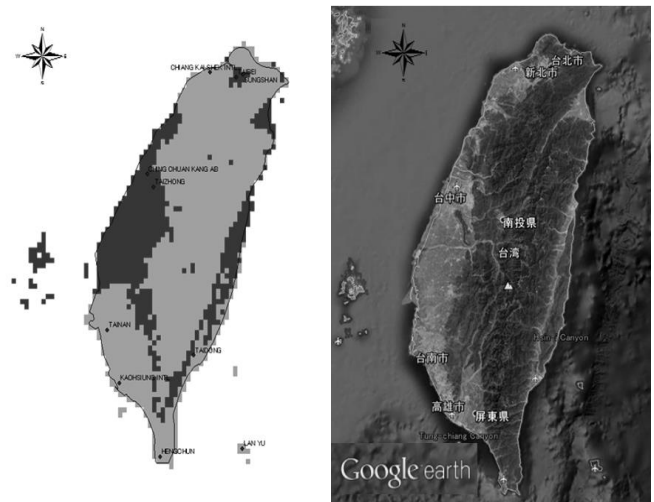


図-8 台湾気候遷移帯マップ

て降雨量が増えた場合には現在よりも更に土砂流出が深刻になる可能性がある。また、図-7は台湾の気候遷移マップである。図に示されたように、気候遷移帯になっている地域が人口密集している住宅地ということが見てとれる。双方共に今後気候帯変遷に伴い降雨量が増大していく可能性があるので、水災害への対策を考える必要がある。

6. まとめ

本研究の取り組みにおいて、温暖化に伴う降雨極値変化に対する水環境評価、および適応策を議論できる有用な基礎データを整備していくことを目的に取り組んだ。日本列島の気候変動に伴う降雨極値の推移に関して、2000年期から2010年期に推移することで24時間降雨量の増加と降雨現象の極端化が進んでいることを定量的に示した。アジア領域へも日本と同様に気候変動評価手法を行ったが、アジア領域を対象とした大規模なスケールでは良い結果を得ることができなかった。

しかし、アジア領域の気候帯に応じた降雨特性を求めことで作成した表-3の総括表と照らしあわすことで気候帯が変化することで降雨極値が変化することを明らかにすることができた。気候変動による気候遷移帯の抽出を行ったことにより、日本列島では沖縄・北日本地域、アジア領域では現在乾燥帯の地域や台湾・ベトナム地域で幅広い気候遷移帯が見つかった。これらの地域では、今後降雨変動も予想されるため、水災害を防ぐためにも降雨量増大に対する適応策を検討する意向である。

謝辞：本研究は環境省地球環境研究総合推進費（S-8）の研究助成によって行われた。ここに記して謝意を示す次第である。

参考文献

- 1) IPCC : Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, <http://ipcc-wg2.gov/SREX/>, 2011
- 2) 牛山素行・寶馨：AMeDASデータによる暖候期降水量と最大1時間・日降水量の関係，水文・水資源学会誌, Vol.16, No.4, pp368-374, 2003.
- 3) 川越清樹・風間聡・沢本正樹：数値地理情報と降雨極値データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築，自然災害科学, Vol.27, Issue 1, pp.69-83, 2008
- 4) 土屋十圀・沼山翔：地球温暖化にともなう日本の気候区分の変化，地球環境研究論文集, Vol.18, p45-p.51, 2010.
- 5) Hijmans, R.j., S.E.Cameron, J.L. Parra, P.G.Jones and A.Jarvis : Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25:pp.1965-1978.