気候統ーシナリオによる 日本の水文・気象環境の将来予測 PREDICTION OF HYDRO-METEOROLOGICAL ENVIRONMENT USING

JAPANESE STANDARD CLIMATE SCENARIO PROVIDED BY THE JMA

葛葉泰久¹・SANGA-NGOIE Kazadi² Yasuhisa KUZUHA and SANGA-NGOIE Kazadi

¹正会員 博士(工学) 三重大学教授 生物資源学部 (〒514-8507 津市栗真町屋町1577) ²非会員 理学博士 三重大学教授 生物資源学部 (〒514-8507 津市栗真町屋町 1577)

We investigated several effects of global warming to hydrological and meteorological environment. JMA/MRI have carried out simulations of global warming due to doubled CO_2 by using their CGCM. They downscaled those results using a 20km scale regional meteorological model. We examined the effects of global warming on hydro-meteorological environment, viz; annual average temperature, annual maximum daily precipitation, annual precipitation and maximum dry duration, using Welch's test. As a result, mean of annual precipitation during 2080 and 2100 indicated an increasing trend that is significant at the 95% confidence level in some part of Japan, while no trend was detected in its variation. Moreover, we examined daily sea surface pressure and wind velocity at surface and 500 hPa in order to derive trend of tropical storm. The data show that percentage of intense tropical storms in total tropical storms increases when the global warming proceeds, as recently suggested by Webster *et al.*(2005).

Key Words: Global warming, Japanese standard climate scenario, Welch's test, tropical storm, PUB

1. 序論

地球が温暖化したら,地球の気候・水循環システムは どうなるか.この疑問に答えるべく,数々の数値実験的 研究が行われてきた (例えば Manabe and Wetherald^{1),} 1975: Yonetani and Gordon²⁾, 2001: Sugi *et al.*³⁾, 2002など). これら以外の,膨大な数の数値実験的研究の結果は,必 ずしも一致しているわけではなく,多くの研究で,台風 の強さが大きくなると示唆されてはいるが, 台風の数自 体は,研究によって,多くなるとするものも少なくなく なるとするものもある(Webster et al.4),2005). そういう 中で,日本の温暖化研究コミュニティーの中で,気象庁 / 気象研究所が,温暖化に関する計算値を,「気候統一 シナリオ」(現時点で最新バージョンは第2版)として 提供し,多くの研究者が,この計算値を用いている.こ の気候統一シナリオについては、「気候統一シナリオの 開発と利用」(栗原和夫)(http://www8.cao.go.jp /cstp/project/envpt/progmeet/ccra/pdf_file/pre08a.pdf または http://www8.cao.go.jp/cstp/project/envpt/progmeet/ ccra/pdf_file/abs08.pdf)を参照されたい.また,同シナリ オを用いて気象庁が解析した結果が,地球温暖化予測情 報⁵ (気象庁, 2005)として発行されている. 概略として は、CGCM2による温暖化予測実験(SRESシナリオのA2 シナリオを使用)結果を,水平解像度20kmの領域気象モ デルRCM20でダウンスケーリングしたものが気候統一シ ナリオである.気象庁/気象研から提供されたデータは, 1981~2000年の日データ(以降,現在気候と称す), 2031~2050年のもの(同様に中間気候),2081~2100年 のもの(同様に将来気候)である.元になるCGCM2の計 算値は,時系列的・連続的に得られたものであるが,こ れらの3期間のRCM20による計算値は, CGCM2の結果 を初期・境界条件として,互いに独立に得られたもので ある.また,著者らは,後に,中間気候・将来気候を, 独立した別の二つの温暖化シナリオと捉えるが, データ の所以から,この名称を敢えて使用する.

このシナリオを用いた水環境の解析(将来予測)は, 和田らにより,いくつか発表されている.和田ら^{0,7} (2004, 2005a) では,気候統一シナリオの第1版,第2版 を用い,洪水リスクと渇水リスクの将来予測がされてい る.また,和田ら⁸⁾ (2005b) では,温暖化時の,季節別降 水量の図が示されている.しかし,気象庁の地球温暖化 予測情報を含め,これらの解析結果の表示には,「その (温暖化時の)変化が有意か否か」という確率統計的な 情報が欠けている.それを示そうというのが,一番目の, 本稿作成の動機・目的である.つまり,気象庁温暖化情 報や,和田ら^{6,7),8)} (2004, 2005ab)と同じような図をいく つか示すが,それが持つ新たな情報の付加に価値がある と考えている.

ところで,2004年は多くの台風が日本列島を襲ったが, 2005年も,甚大な台風の被害が出ている.アメリカでは, ハリケーン・カトリ - ナの影響で, ニューオリンズが壊 滅的な打撃を蒙った.この様に,近年,台風被害が増加 しているが, Webster et al.4 (2005)の解析によると,近年, 非常に大きい台風(カテゴリー4及び5,地上風速 56 ms⁻¹以上)の個数が全部の台風の個数に占める割合が増 加傾向にある.ここで特筆すべきは,全部の台風の個数 が増加したり,強度が大きくなったりという,トレンド は見出せないことである.ただし,「トレンドがない」 という帰無仮説が「棄却されなかった」ことは、トレン ドがないのではなく,使ったデータでは特性が出ていな かっただけで、さらに多くのデータが必要な場合もある (Trenberth⁹, 2005). このように, 台風(熱帯低気圧) のトレンドを調べることが,二番目の動機・目的である. 加えて, PUB(未観測領域からの水文予測)の枠組みの 下で,時空間的に解像度の低いデータから何が導けるの かを検討することも目的としている.

以下,2.では,本稿で一貫して使う,検定の手法に ついて説明し,3(1)では気候統一シナリオの統計的 解析結果を示す.3(2)では,熱帯低気圧解析のため の準備を行い,3(3)では,熱帯低気圧の解析を行う.

なお,解析の根本になる気候モデルのバリデーション については,地球温暖化予測情報⁵⁰(気象庁,2005)で, 現在気候との比較をもって,既に行われていると考える. それが,元になる高解像度の計算値ではなく,日データ だけを使用して解析する本論文の基本的スタンスである.

2.解析方法

解析手法として用いたのは,Welchの検定である.これにより,現在気候,中間気候,将来気候のある物理量を比較し,平均値が有意に異なるかどうかを調べる. Welchの検定は,2標本検定に用いられ,基本的には*t*検定の亜種である.Welchの検定は,2種類の標本を,母分散の異なる母集団から取って来た場合に,2標本の元の母集団の母平均の間に,有意な差があるかどうかを調べる手法である.今,二つの標本(それぞれ標本数がm,n)の標本平均,標本分散を $\overline{x},\overline{r},s_1^2,s_2^2$ とすると,



図-1 中間気候の年平均気温と現在気候のそれの差(上), 将来気候と現在気候の差(下).以下の図では, い ずれも,二つの図のカラーテープルは同じである.

<i>t</i> =	$\overline{X} - \overline{Y}$	は,近似的に,	$v = \frac{(s_1^2 / m + s_1^2 / n)^2}{(s_1^2 / m + s_1^2 / n)^2}$
. –	$\sqrt{\frac{s_1^2}{m} + \frac{s_2^2}{n}}$		$\frac{(s_1^2/m)^2}{m-1} + \frac{(s_1^2/n)^2}{n-1}$

に最も近い整数 レ*の自由度の t 分布 t(レ*) に従う.この X, Y は,中心極限定理より,標本数が多い場合,確率分 布が正規分布である必要はない.

また,後に,年降水量だけは,その分散も調べる.年 降水量の変動が水資源の安定性に大きく関わり.変動が 過度に(平均より小さい方向に)大きい場合,渇水を引 き起こすからである.その際には,正規母集団を仮定し て,F検定を行う.

3.解析結果

(1)降水量の影響評価

まず,図-1を示す.上の図は,中間気候と現在気候 の年平均気温の差である.同様に,下の図は,将来気候 と現在気候の年平均気温の差である.どちらの気候に対 しても,領域内のすべての地点で,有意水準5%で,平均 気温に有意な差があった.このあと示す図では,有意で ない部分は白色で表示しているが,この図においては, 領域内のすべての点で,有意に平均値が増加している. 気象庁の地球温暖化予測情報にも,下の図と同様の図が









図-4 最大日降水量の平均値の比

掲載されているが,温暖化実験の基本となる「条件」な ので,あえて本稿でも掲載する.つまり,この後の,降 水量や連続無降水日,海面気圧,風速などは,「温暖 化」という条件が与えられた場合の「結果」である.と ころが,「気温」は,「CO2倍増」という条件下の「結 果」ではあるが,本稿の,「温暖化の影響が水文・気象 環境に与える影響の解明」という目的からすると,「結 果」というより「条件」である.つまり,本稿では,図 -1を,与えられた条件と考え,この後の考察を読んで いただきたい.そのような観点からすると,図-1の両 図は,50年後の中間気候,100年後の将来気候時の「温暖 化の様相」というより,むしろ,「日本域で2-3K程度の 昇温があり,周りの海域ではそれほど昇温しない場合」, 「東アジア全域で,3K程度の昇温がある場合」という, 二種類のシナリオと考えた方が良いと思われる.

なお,ここでは,年平均気温だけを見たが,地球温暖 化予測情報には,1月の平均気温,7月の平均気温の図が 掲載されている(ただし,中間気候に関しては触れられ てない).それによると,日本域では,冬の昇温の方が 顕著である.

図 - 2,3,4は,ぞれぞれ,年降水量の平均値,年 降水量の変動(標準偏差),日降水量の年最大値の変化 を示した図で,すべて,上の図が,中間気候と現在気候 の比,下の図が将来気候と現在気候の比を示している. ただし,地球温暖化情報とは異なり,有意水準5%の両側 検定で,「有意な気候変動を示した場所」のみを示して いる.全部の図で,黄色系の場所は,平均値または標準. 偏差が減少していることを示す.中間気候のように,日

図-5 年最大の連続無降水日の比

本域のみで,3K程度の昇温があり,周りの海域での昇温 が若干低いという様な条件を与えると,おおむね日本域 全部で年降水量が増加し,中部地方~北陸地方にかけて, 平均値が1.5倍以上になる地域が現れる.また,将来気候 においても(図-2(下)),中国・山陰地方をはじめ, 多くの地域で,年降水量が増加するという結果が出てい る.しかし,年降水量の変動を見ると,図-3が示すよ うに,それほど水資源の安定性が変わるわけではないよ うである.また,反対に,水災害的な観点から,日降水 量の年最大値(図-4)を見ると,北海道西部(将来気 候),北陸地方(両方),中国地方の一部(将来気候) で,1.4倍程度に増加する地域があるのが目立つ.また, 中間気候に関しては,日本列島の南東の太平洋で,年降 水量,日降水量ともに減少傾向にある.

最後に,図-5は,年で年最大の連続無降水日の変化 傾向を示している.地球温暖化予測情報には,「無降水 日」の変化傾向が掲載されているが,著者らは,水資源 的な観点から,渇水に影響する「連続無降水日数」に注 目した.図-5より,中間気候においては,北日本を中 心に,日本のかなりの地域で,年最大連続無降水日数が 減少している.

(2)熱帯低気圧の変化の解析準備

水資源的な解析をする場合,データの時間的解像度が 粗いことはあまり問題にならないが,水災害的観点から すると,せめて日最大の時間降水量の時系列データがあ ることが望ましい.台風などの規模の熱帯低気圧の解析 をするためにも,海面気圧・風速等の時別値を使用する のが望ましいが,提供されている気候統一シナリオデー タは,気温を除き,すべて,平均値としての日別値だけ で構成される.これは,もともと,このデータが「気 候」の解析に用いられることを想定しており,細かな気 象解析に使用されることが想定されていないためと思わ れる.

ここで,著者らは,Webster et al.⁴ (2005) が書いている ように,台風(熱帯低気圧)に何らかのトレンドがある かどうかを調べる前に,どういう日別値なら,熱帯低気 圧の影響を描くことができるかを,簡単に調べた.なお, 本稿では,非常に強い風と低い気圧は,すべて熱帯低気 圧に起因するという前提で解析をしている.

著者らは,2004年の台風21号について調べているが (葛葉ら¹²⁾,2005 など),台風の解析に,PSUNCARの MM5 (Grell *et al.*¹³⁾,1994)を用いている.本稿では, 2004年9月28日00UTC ~ 2004年9月30日00UTCまで(48時 間;以下,最初の24時間をDay1,あとの24時間をDay2と する)の再現計算を,条件を変えていくつか行い,その データをもとに,表面風速,500hPa面風速,海面気圧な どの検討を行った.本稿では,再現計算を目的とはして いないので,与えた条件を詳述しないが,ベストトラッ クと比較した場合,最低気圧が高く出る傾向にありつつ も,台風の中心の軌跡は,ベストトラックに近いもので あった.

図 - 6は,計算した '日量'の例である.上の図は, Day2の,500hPa面の風速を示している.ただし,気候統 ーシナリオデータは,「日平均の東西風速(u)」と, 「日平均の南北風速(v)」を提供しているので,同じ計 算方法で日量を計算した.ここで,解析に用いる「uとv を二乗した合計の平方根(以降 '日風速'と称す)」は,



図-6 500hPa面の風速(上;凡例の数字はm/s)と海面気 圧の日量(下;図中の数字の単位はhPa)

もちろん風速の日平均値にはならない.また,海陸風な どで,風向が変わる場合,逆方向の風速同士が打ち消し あって,過小な値が示される可能性もある.それらを確 認するために,図-6(上)を作成したわけであるが, 熱帯低気圧の通過により,ある程度以上の日風速を記録 することがわかった.

図 - 6 (下)は, Day1の海面気圧の日平均値を示して いる.この日,台風21号は,沖縄近辺を(126.6E, 28.0N)から(130.5E, 31.7N)まで移動(ベストトラッ ク)したに過ぎないが,強い勢力で形の崩れていない台 風(熱帯低気圧)が,図 - 6 (下)のような,痕跡を残 すことが確認できた.

以上の他に, 渦度の日量など, いくつかの物理量を検 討したが, 結果として, 次章では, 500hPa面の日風速, 地上1.5m(以下, 地表面と称す)の日風速,海面気圧を 用いて,温暖化による熱帯低気圧への影響を評価する. 本章で行った検討は,シミュレーションの条件は色々変 えてはいるが, いずれも2004年の台風21号を再現するた めに行った計算の結果を用いており,もちろん,充分な ものではない.しかし,上記の三つの物理量の日平均が, 何らかのトレンドを示していており,そのトレンドが, 他の研究成果と照らして合理的であれば,逆にその手法 が正しかったと結論付けられると考え,次節に進む.





(3)熱帯低気圧の解析

気候統ーシナリオデータは,各日,東西方向,南北方 向の 109×109個のデータから構成されている.それらの 格子点のうち,970hPa(以下,この様な値を閾値と称 す)以下の格子点が一個以上ある年間の日数をプロット したのが,図-7(上)である.同様の図で,閾値を 980hPa,990hPaとしたのが,図-7(中),(下)であ る.図の横軸は,シナリオで想定されている年で,左か ら順に,現在,中間,将来気候に相当する.それぞれの 期間の平均値と標準偏差を求め,Welchの検定を用いる と,閾値を変えたいずれのケースについても,現在気候 から中間気候に対しては,有意に平均値が下がっており, 現在気候から将来気候に対しては,いずれも,「平均値 が変化したとは言えない」という結果が得られた(表-1参照).つまり,将来気候に関しては,ある強度以上 の熱帯低気圧の個数の変化があるとは言えない.

次に,図-8は,図-7と同様の図で,500hPa面の日 風速の変化を表している.上の図が,閾値を60m/sとした もので,下の図が50m/sとしている.今までと同様に Welchの検定をした結果,この面の日風速に関しては, 中間気候,将来気候とも,現在気候と有意な差が見られ



図-9 地上1.5mでの日風速の変化.上から順番に閾値が25, 20,15m/s

なかった .

最後に図 - 9は,地表面日風速の変化を表した図である.表 - 1に示すとおり,閾値を15m/sにした場合は,現

表-1 Welchの検定結果.各行は上から海面気圧(閾値990,980,970hPa),地上1.5mの日風速(閾値15,20,23,25m/s), 500hPa面の日風速(50,60m/s)を表し,検定結果の列は,負号が「有意な現象」,×が「有意な変化有りとは言えない」

変数	平均(現在)	、 標準偏差(現在)	平均(中間)	標準偏差(中間)	検定結果	平均(将来)	標準偏差(将来)	検定結果
PSLV990	33.65	8.22	15.50	6.26	-	31.70	6.92	х
PSLV980	9.10	4.70	3.20	1.88	-	7.70	3.97	х
PSLV970	2.10	2.10	0.80	1.24	-	2.30	2.32	х
WIND_S_15	78.15	12.61	47.15	11.49	-	66.55	12.62	-
WIND_S_20	7.05	3.94	3.40	2.46	-	6.25	4.24	х
WIND_S_23	1.70	2.00	0.65	1.23	х	1.50	1.64	х
WIND_S_25	0.60	1.19	0.40	0.82	х	0.40	0.75	х
WIND_500_50	20.20	6.04	20.90	6.80	х	19.00	4.67	х
WIND_500_60	1.10	0.91	1.05	0.94	х	1.20	1.40	х

在気候に対して,中間気候,将来気候のいずれについて も,日風速が閾値以上になる日数が有意に減少する.閾 値を20m/sとした場合には,中間気候のみ,生起日数が有 意に減少し,23m/s(図省略),25m/sとした場合には,双 方とも,現在気候と有意差がないという結果が出た.

4. 議論と結論

以上をまとめて,著者らは以下のように考える.

(1) 温暖化実験で,日本域の昇温は有意に認められる (図-1)が,50年後を想定している中間気候,100年後 を想定している将来気候は,それぞれ,50年後,100年後 の気候をあらわしているものでなく,二つの,タイプの 異なった温暖化に関わるシナリオと考えた方が良い.

(2) 気候値の変化が有意かどうかを検定すると,日本域では,そう大きな影響がないことになる.ただし,中間気候に関しては,年降水量,年最大連続無降水日数などで,有意な影響が出ると結論付けられる比較的広い地域が現れる.

(3) 第1章で, Trenberth⁹(2005)を引用したが,まさに, この気候統ーシナリオを用いた解析結果が,それに当て はまり.配布されている,現在・中間・将来気候それぞ れ20年ずつというデータでは,描ききれないトレンド がある可能性は否定できない.

(4) 中間気候と将来気候を,どちらも,あり得る二つの温 暖化シナリオと考えれば,地上日風速の検討結果は,閾 値を高くすることにより,「どちらのシナリオでも,閾 値を超える低気圧の個数が減少する」「どちらのシナ リオでも減少しない」という様に,減少傾向が緩和され た,とみなせる.また,(ここで用いる)平均化された 日量は,極値の傾向を再現するのが難しいことを考え併 せれば,温暖化が進んで,(強い台風の個数が増加する ことは得られなかったものの)熱帯低気圧全体に占める 割合が増えることを示したことは,Webster *et al.*⁴(2005) と同様に,「温暖化すると強い台風の割合が増える」こ とを示唆する結果が得られたと考えられる.

(5) PUB (未観測域での水文気象予測)的な視点から,このような日データからからでも,3(3)で行ったような解析が可能なことを示した.

謝辞:データ取得に際し,ご助言・ご協力を戴いた,国立環境研の原沢英夫氏・高橋潔氏,気象庁の石原幸司氏に深謝します. また,本稿は,科研費(基盤B16360250),河川整備金(17-1212-7)の助成を戴いた研究の一部をまとめたものである.

参考文献

- Manabe, S. and R.T. Wetherald: The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, 32, pp.3-15.
- Yonetani, T and H.B. Gordon: Simulated changes in the frequency of extremes and regional features of seasonal/annual temperature and precipitation when atmospheric CO₂ is doubled, *J Climate*, 14, pp.1765-1779, 2001.
- Sugi, M., A. Noda and M. Sato: Influence of the Global Warming on Tropical Cyclone Climatology: An Experiment with the JMA Global Model, *J. Meteorol. Jpn*, 80, pp.249-272, 2004.
- Webster, P.J., G.J. Holland, J.A. Curry and H.-R. Chang: Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment, *Science*, **309**, pp.1844-1846, 2005.
- 5) 気象庁: 地球温暖化予測情報第6巻, CD-ROM版.
- 6)和田一範・村瀬勝彦・冨澤洋介:地域気候モデルを用いた地 球温暖化による災害リスク算定の試み,水工学論文集,48, pp.457-462,2004.
- 7) 和田一範・村瀬勝彦・冨澤洋介:地域気候モデルを用いた地 球温暖化に伴う洪水・渇水リスクの評価に関する考察,水工 学論文集 49, pp.493-498, 2005a
- 8) 和田一範・村瀬勝彦・冨澤洋介:地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究, 土木学会論文集 796/II-72, 23-37, 2005b.
- Trenberth, K. :Uncertainty in hurricanes and global warming, *Science*, 308, pp.1753-1754, 2005.
- 10) 東京大学教養学部統計学教教室:統計学入門,307pp,東京 大学出版会,東京,1991
- 11) 鳥居泰彦: はじめての統計学,260pp,日本経済新聞社, 260pp,東京,1994.
- 12) 葛葉泰久・沼本晋也・Sanga-Ngoie Kazadi・福山薫: 2004年台 風21号と前線による豪雨災害,自然災害科学,2005 (投稿中).
- 13) Grell, G.A, J. Dudhia and D.R. Stauffer: A description of the fifthgeneration Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), NCAR Tech. Note NCAR/TN-398+STR, 114pp, 1994.

(2005.9.30 受付)