

利根川上流域を対象とした渇水対策のための 力学的季節予測結果の利用に関する基礎的研究

PRELIMINARY STUDY OF THE USE OF THE DYNAMICAL SEASONAL PREDICTIONS IN THE UPSTREAM OF THE TONE RIVER BASIN FOR DROUGHT MANAGEMENT

仲江川 敏之¹・安田 珠幾²・高谷 祐平³

Tosiyuki NAKAEGAWA, Tamaki YASUDA, and Yuhei TAKAYA

¹ 正会員 博士 (工学) 気象研究所 主任研究官 (〒 305-0052 つくば市長峰 1-1)

² 非会員 博士 (理学) 気象研究所 主任研究官 (〒 305-0052 つくば市長峰 1-1)

³ 非会員 学士 (理学) 気象庁 地球環境・海洋部 (〒 100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4)

This study preliminarily examines potential use of the dynamical seasonal prediction with an atmosphere-ocean coupled model for the drought management in the upstream of the Tone River basin. First, linkage between water storage in reservoirs for August and six accumulated-value predictors as precursor is revealed based on the observation data with non-parametric correlation test. In addition, correlation between drought and El Niño and Southern Oscillation phenomena years is examined to be not significant. The ensemble mean of the dynamical seasonal prediction outputs satisfactorily captures the drought years. This result suggests that the dynamical seasonal prediction may provide significant information about improvement in the cost-effectiveness of the the weather modification operations to practitioners.

Key Words: *dynamical seasonal prediction, drought management, the Tone River basin, ENSO, weather modification*

1. はじめに

日本の水資源需要量の将来見通しについては、人口減少傾向による需要減少が見込まれるが、その一方で自然本来が持つ気候変動や人間活動が原因の地球温暖化による気候変化によって、降水量に関する不確実性が高まっており¹⁾、水資源賦存量が大きく変化する可能性が高い。従って、今後水資源の需給バランスが変化することは、想像に難くない。また、温暖化に伴う気候変動の結果、平年値のみならず、渇水頻度の上昇²⁾や渇水被害の増加が懸念されている。

首都圏の水瓶と呼ばれる、利根川上流域における取水制限は、過去 30 年で夏季に 9 回、冬季に 2 回あり、3 年に 1 度程度起きていることになる。渇水対策としては、ダム等の施設設置やその効果的な運用管理による貯水量の増加が、これまで行われてきた。しかし、施設設置による水資源開発は大きく進み、今後大規模な開発は望めない。こうした従来の水資源開発とは異なる手法として、天気を改変することにより人為的に降水量を増加させる、いわゆる人工降雨・降雪技術がある。

気象研究所と国土交通省利根川ダム統合管理事務所による共同研究が、1994 年から 2002 年の 14 年間に亘

り行われ、冬季の山岳性降雪雲を対象に航空機シーディング実験や非静力学モデルによる数値実験が行われた^{3,4)}。この結果によると、理想的なシーディングが行われれば、一冬で降雪量を 30~40% 増加させる可能性があることが示されている⁵⁾。

冬季の山岳性降雪雲を対象にしたシーディングは技術的にある程度確立しているが、実用化のためには、単に降雪量の増加に留まらず、水資源量の増加として評価されなければならないし、費用対効果の検討も必要である。例えば、人工降雪を行い、融雪水により春先の水資源量を増加させてたとしても、その年が非渇水年であれば、夏季には不要な水資源は放流されてしまうので、人工降雪による渇水対策は結果的に無意味なものになってしまう。

もし、冬季に予めその年の夏季の水資源量予測が可能であれば、もっと控えめに、定性的な傾向だけでも予測が可能であれば、人工降雪をより効率的に行う可能性がある。そこで、本研究では、首都圏の夏季渇水対策として、利根川上流域で冬季に人工降雪による水資源確保を効率的に行うための基礎研究を、観測値と全球大気-海洋結合モデルを用いた力学的な季節予測実験結果をもとに行った。

2. データ, モデルと実験, 解析方法

(1) 観測データ

本研究で用いた観測データは、放流量、貯水量、流域降水量、渇水基準点流量(栗橋)、日照率、気温の6つのデータである。データ期間は1994年から2005年までで、利根川上流8ダムと流域の平均値である。日単位の元データを月平均して利用した。

(2) モデルと実験

季節予測実験に用いたモデルは、気象庁で2008年度中にEl Niño予測モデルとして用いられる大気-海洋結合モデル(CGCM)である。大気モデルは気象庁統一全球大気モデルで、水平解像度は約200km(三角形切断・線形格子TL95)で、鉛直40層である。海洋モデルは、気象研究所共用海洋大循環モデルで、水平解像度は東西1度、南北は赤道付近で0.3度、中高緯度で1度となる可変格子、鉛直方向は50層で、5000mまでを表現している⁶⁾。陸面水文過程は、Simple Biosphereモデル(Sib)を用いており⁷⁾、鉛直1次元の地表面と土壌内での熱水移動、地表面での積雪融雪過程を表現している。

季節予測実験は、予測期間が7ヶ月、アンサンブル数は5メンバーである。1, 4, 7, 10月の各月末5日の大気、海洋の状態を各メンバーの初期値とした。大気は日本再解析-25年⁸⁾の、海洋は気象研で開発されたデータ同化システム⁹⁾からの出力を用いた。実験期間は1979年から2006年までの28年である。本研究では1月月末開始のアンサンブル実験結果(2-8月の予測)を用いた。

図-1に利根川流域周辺での大気モデル格子を示す。上に述べたように、モデルの解像度は200km格子で、利根川全流域面積よりも大きく、上流域は1グリッドに収まる。本研究では、利根川上流域を含む1グリッドのみを解析対象とする。この図から明らかなように、解析対象とするグリッドには千曲川流域、天竜川上流流域も含まれており、これらの流域を対象とする場合でも、以下で述べるモデルの結果は、そのまま当てはまる。

(3) 解析方法

観測値については、以下の手法を用いた。まず、その年の渇水の程度は8月の貯水量が表すと考え、8月貯水量と他の観測値との相関の有無をノンパラメトリックなMann-Kendalの順位相関を用いて調べた。状態量の貯水量は、観測時点までのフラッスの総和と関係があるので、全てのデータを8月から遡って積算した各月のデータセットを以下の式に従って作成した。

$$x_{m,y} = \sum_{j=m}^8 a_{jy} \quad (1)$$

ここで、 $x_{m,y}$ はy年m月から8月までの積算値、 a_{jy} はy年j月の観測値である。このようにして得られた値を、貯水量と共に予測子とした。以上の準備の下、毎年8月貯水量と同年m月の予測子 $x_{m,y}$ の相関関係を、6つの観

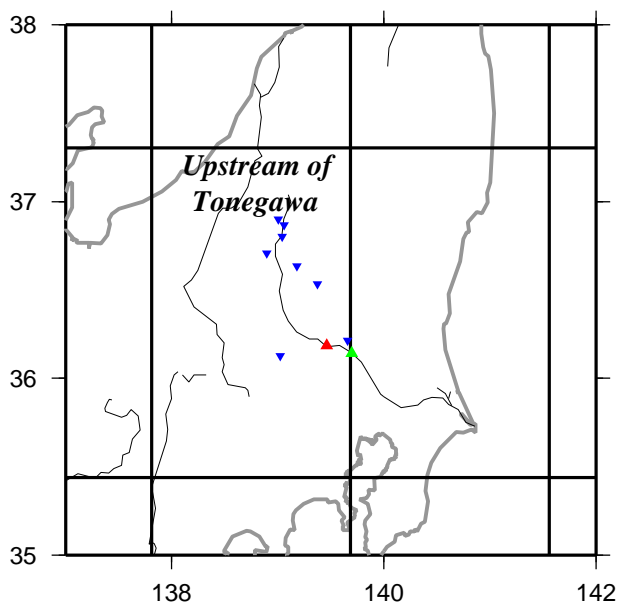


図-1 利根川流域周辺でのCGCMの大気モデルグリッド格子の配置。水色▽がダム、緑色△が栗橋流量観測点、赤色△が利根大堰の位置を示している。

測データ×7ヶ月=42通りについて調べた。

通常、8月の渇水状況の前兆指標(予測子)を調べる場合、前兆現象から8月までのデータを使わないことが、前兆指標としての必須条件であるが、この研究では、8月までの季節予測結果が利用できることを前提に、8月の貯水量に、より強い影響のある前兆現象から8月までの積算量を前兆指標として用いている。

3. 結果

(1) 8月貯水量と予測子の相関関係

ここでは、8月貯水量と予測子の相関関係について述べる。両側検定5%の有意水準で、相関があるかないかを判定した。

図-2に8月貯水量と6つの予測子のMann-Kendalの順位相関解析の結果を示す。相関関係はMann-Kendalの順位相関検定で調べた。縦軸はKendallの τ で、-1~1の値を取り、絶対値が大きいほど、相関が高い。8月貯水量と積算貯留量の相関は、2月から7月まで、いずれも有意であった。従って、貯留量は積算しても相関が高く、低周波の変動をしていることが示唆される。力学的な予測では、季節平均程度までは、時間平均を長くした方が予測可能性が高いことが知られているので、積算とほぼ等価な長期の時間平均と相関が高いことは予測の利用にとって好ましい結果である。

次に積算降水量との関係を見ると、8月貯水量と有意な相関がある月は2, 3, 6, 7, 8月で、春の4, 5月には有意な相関が無い。一旦、相関が有意でなくなり、再び、冬季の2, 3月から8月までの積算降水量では8月貯水量に相関があるということは、冬季の降雪が8月貯水量に重要であることを示唆している。実際、2, 3月各々の月降

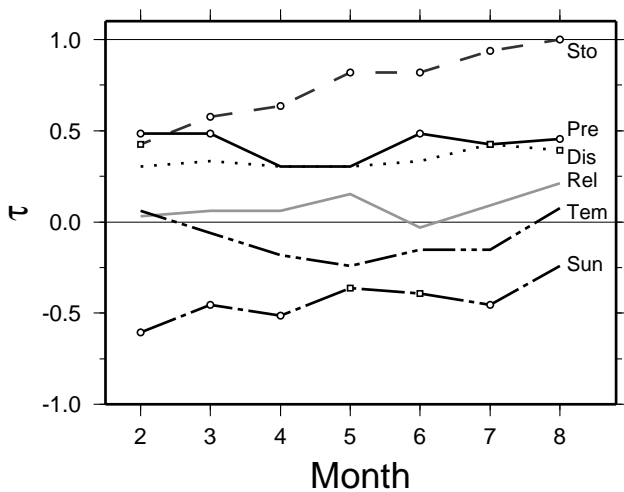


図-2 8月貯水量と関連観測量の積算値の相関関係。図中の実線は降水量 (Pre)、破線は貯水量 (Sto)、点線は放流量 (Rel)、灰色実線は河川流量 (Dis)、二点鎖線は気温 (Tem)、一点鎖線は日照率 (Sun) を表している。

水量と8月貯水量の相関を調べると有意で、流域水資源の半分を融雪水に依存しているという既往の推定もあるので、半年前に当たる2,3月からの積算降水量と8月貯水量の相関係数が高くなっていると考えられる。

夏季の6,7,8月に相関が高いことは、直感的にも妥当である。梅雨開始時期から盛夏までの6,7,8月は降水量が多い季節で、この時期の降水量は、時間遅れなく、ダム貯水量に大きな影響を持つ。この期間に十分な雨があれば、それ以前の降水量が少なくても、8月貯水量が少なくなることは無いので、この期間からの積算降水量と8月貯水量の相関係数は高くなっている。

積算日照率と8月貯水量の相関は、2月から7月まで全ての月で有意な負の相関関係がある。日照率は、雲が日射を遮蔽しない割合なので、雲量と直接的に関係しており、その結果、降水量とも相関が高いという関係が現れている。この結果は、人工降雨・降雪を行う場合、シーディングに適した雲が渇水年には少ない可能性を示唆している。全ての雲がシーディングに適している訳ではないので、村上ら¹⁰⁾が行ったような雲物理学的な観点から、詳細な検討が必要である。

積算流量との関係は、7,8月と直近では相関があるが、それ以前との関係は無い。これは、基準流量観測点が下流に位置し、しかも利根大堰等の取水がなされた後であるからであろう。また、積算流量と貯留量の因果関係からみると、貯留量が少ない(多い)と、結果的に積算流量が少なく(多く)なる訳で、関係があったとしても予測子には馴染まない。

気温とはどの月に対しても有意な相関が見られなかった。気温が高ければ晴天日が多く、降水量が少ないと推論できるが、日本の夏季の気温は日射のみならず、太平洋高気圧がもたらす暖気も主要因のため、上述のような推論は当てはまらない。その結果、8月貯水量と直近の積算気温とさえも相関が有意でなくなっている。

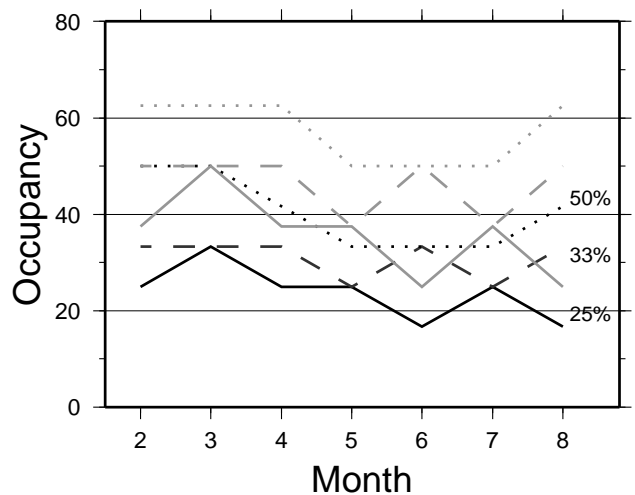


図-3 CGCM 予測実験のアンサンブル平均積算流出量で再現された渇水年の上位占有率。対象期間 (1979-2006 年) で流出量が少ない上位 25%, 33%, 50%以内にある割合を、月別に示している。積算値の定義は図-2 に同じ。図中の実線、破線、点線はそれぞれ、上位 25%, 33%, 50%の値を表し、黒は全期間 (28 年) に対するもの、灰色は 90 年以降 (17 年) に対する割合を表している。

(2) 力学的手法による決定論的季節予測

上で行った観測値の解析結果から、冬季からの積算降水量と8月貯水量に関係があるので、大気-海洋結合モデルを用いて8月貯水量を予測する場合も積算降水量が適切である。観測値が利用できなかったため、調べることができなかったが、貯水湖への積算流入量は、積算降水量よりも8月貯水量と強い相関があると考えられる。また、モデルには、積雪融雪過程も含まれていて、適切に流入量(表面と地中流出量の和)が計算されていると考えられるので、積算流出量の予測値を用いて以下の解析を進めた。対象期間は、CGCM 実験期間の1979年から2006年までとする。この間、1990年8月に渡瀬貯水池が竣工し、この前後で、利根川上流8ダムの貯水量容量は、洪水期に3.6%、非洪水期に5.7%増加している。ここでは、この前後で、渇水年発生に有意な差は無いものと仮定して、同等に扱う。

今回用いたモデルの日本域における大気現象の再現性については、現在現業で用いられている季節予報用大気モデルよりも良いことが、調査の結果分かった¹¹⁾。今回用いている1月末から予報した夏(JJA)の結果では、東南アジアの循環場が改善し、フィリピン付近から日本を通りアラスカへ向かう波列(Pacific-Japan (PJ)パターン; 図-4でこの領域に沿って現れる正負の相関パターンが、PJパターンの一部を構成している)¹²⁾の年々変動も同様に改善しており、東南アジアから日本域にかけて、主な気象要素の予報成績がよくなっている。これは、結合モデルで夏の熱帯太平洋西部の降水予測が改善したため、十分に詳細な解析を行う価値はあると言える。

全28年のうち12回の渇水年が、予測された積算流出量の少ない上位25%, 33%, 50%以内にある割合を月別に示したのが図-3(黒色線)である。順位で言い換える

表-1 1979年から2007年までの渇水年と ENSO 年の関係。表中の○が渇水年で、ENSO 欄の+と-はそれぞれ、El Niño 年と La Niña 年を表す。ENSO 年の定義については本文を参照。寡雨欄は 94 年以降の 12 年間の 2-8 月、6-8 月積算降水量の昇順位が示されている。2007 年は対象年に含まれないが、参考のため加えてある。

年	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
渇水	○	○		○					○			○			
ENSO				+	+	-	-		+	-	-			+	+
年	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	
渇水	○		○	○				○	○		○	○			
寡雨(2-8)	1	8	3	5	11	2	10	4	7	6	9	12			
寡雨(6-8)	1	9	3	2	12	4	5	6	10	8	7	11			
ENSO				+	+	-	-		+						-

と、渇水年が 7, 9, 14 位以内にある割合である。予測結果が、上位 X% 以内にランクされた場合、そのカテゴリーで、渇水年の当たる確率(的中率または占有率)が X% を越えていれば、予測情報を利用して、渇水対策を行えば、毎年渇水対策を行うよりも、効率的に行うことができる。

3 月の場合、上位 25% には、12 回の渇水のうち 4 回入っている。即ち、上位 25% に当たる流出量以下の場合、渇水と予測すれば、 $4/12=33\%$ の確率で当たると言える。同じ基準、上位 25% で他の月を見ると、2 月、4 月、5 月、7 月は 3 回(占有率 25%)、6、8 月は 2 回(12.5%)入っている。基準を緩めて、上位 33% とすると、12 回中、3 回または 4 回(25, 33%)、上位 50% では 4~6 回(30~50%)である。従って、3 月からの積算流出量が上位 25% 以内にあるかどうかで、判断する場合のみ、季節予測実験結果に価値があり、その他の場合は全て、アンサンブル平均としての結果には価値があっても僅かであることを意味している。

次に、89 年以前と 90 年以後の 2 期間に分けて、上位 33% に入る月がひと月でもある年の数を調べると、89 年以前の 4 回の渇水のうちには、一度も無いが、90 年以降の 8 回のうちには、4 回で上位 33% に入る月がある。図-3 には、全 28 年間の結果に加えて、90 年以降の 16 年を対象とした場合の結果も示されている。図中の灰色線が、16 年中、8 回の渇水年が、積算流出量の少ない上位 25%、33%、50% 以内にある割合を示している。上位 25% (33%) に対して的中率は 40% (45%) 前後の占有率となり、高い確率で渇水年が上位に含まれることが分かる。90 年代以降に限れば、全ての上位閾値、積算期間について、季節予測実験結果に価値があると言える。

以上の議論では、取水制限のあった年を渇水年とする、一般的な定義を用いてきた。しかし、深刻な渇水は列島渇水と言われた 1994 年だけである。即ち、それ以外の年の渇水は、既存の渇水対策を講じることにより、大きな支障を来さないように管理することができたと言える。気象改変が必要な場合は、1994 年のような甚大な渇水の場合であろう。同じ予測値でも、予測対象が変われば、予測可能性が変わるので¹³⁾、1994 年のみが予測すべき渇水年と定義した場合、決定論的予測が価値があるかを

調べた。1994 年の予測結果によれば、3 月以降の積算流出量は、全て上位 25% 以内にあり、1994 年の渇水傾向は予測可能性が高いと言える。費用対効果面を考えると、対象とした 28 年間のうち、上位 25% 以内と予測された年の合計 7 年分のシーディングを行う費用よりも、1994 年の渇水時に増雪、増雨によってもたらされる経済効果が高ければ、人工気象調節による渇水対策が、経済的にも有効であったと言える。

4. 議論

上で示した結果が示す通り、渇水の力学的手法による決定論的季節予測は、容易ではない。ここでは、予測が困難である点を ENSO 現象から説明する。まず、異常気象や自然災害の遠因として、しばしば取り上げられる ENSO 現象と渇水年の関係を調べ、次に ENSO 現象と力学的予測の関係について述べる。

(1) 渇水と ENSO 現象の関係

表-1 に渇水年(○)と ENSO 年(+,-)をまとめたものを示す。寡雨欄には、観測値の利用できる 1994 年から 2005 年の 12 年間について、二つの期間(2-8 月、6-8 月)の積算降水量の昇順の順位も示してある。この表での ENSO 年は、2-8 月の積算降水量と比較するため、2-8 月の ENSO 指標時系列を使って定義したのである。指標は、気象庁の定義による、NINO.3 海域(北緯 5 度~南緯 5 度、西経 150 度~90 度)の月平均 SST の基準値(その年の前年までの 30 年間の各月の平均値)と該当月 SST の差の 5 か月移動平均値¹⁴⁾を用いている。途中で減衰のあった、1995 年夏~1995/96 冬が La Niña 年でなかった点だけが、気象庁の通常の定義のものと異なっている。

渇水の発生年は、El Niño 年 8 年中 4 回、La Niña 年 6 年中 0 回、通常年 14 年中 8 回であった。渡瀬川流域のみの取水制限のあった 02,04,05 年を除くと、El Niño 年 8 年中 3 回、La Niña 年 6 年中 0 回、通常年 14 年中 7 回となる。El Niño 年は 8 年中 3,4 回、通常年は 14 年中 7,8 回と両者に大きな差は無い。しばしば、ENSO 現象は災

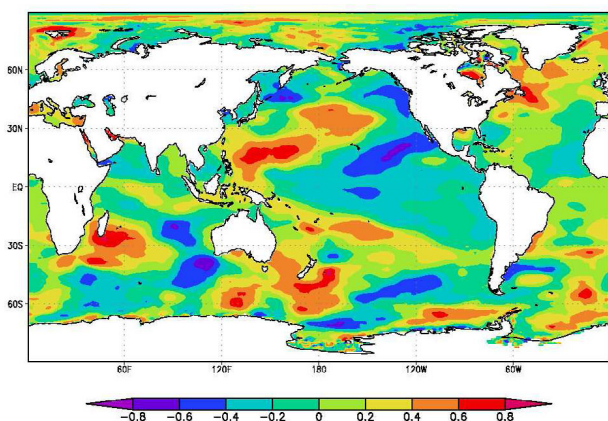


図-4 2-8月利根川上流域の積算降水量と2-8月積算SSTの時系列相関係数の全球分布。対象期間(1994-2005年)。積算値の定義は図-2に同じ。両側検定の5%有意水準は0.55。

害の遠因とされるが、利根川流域の渇水については、当てはまらない。着目すべき点は、La Niña年に全く渇水が生じていない点である。そこで、対象期間を1972年からと延長すると、1973、78年とLa Niña年に渇水が生じている。また、1996年はLa Niña年ではないが、弱いLa Niña傾向が1月から8月まで続いていた。従って、対象期間の結果だけから、La Niña年には渇水が生じないあるいは、発生頻度が少ないというのは早計であり、この程度の期間では、どの年も同じ程度の確率で発生し得ると考えるのが妥当である。

図-4に2-8月積算の利根川上流域降水量と2-8月積算海面水温(SST)の年々変動についての相関関係全球分布図を示す。この図では線形相関を用いて、両側検定5%有意水準は0.55である。NINO.3域を始め、熱帯東太平洋と相関は低く、これまで議論してきたENSO現象と利根川上流域積算降水量のとても弱い関係が再確認できる。

フィリピン海東部の北半球熱帯西太平洋に相関の高い領域がある。利根川上流域の降水量予測には、NINO.3海域のSSTで定義されるENSO現象よりも、この地域のSSTと比較すべきと考えるかもしれない。この地域のSSTや雲の対流活動と日本の天候の相関が高いことは良く知られているが、しかし、これらの予測可能性はENSO現象によって支配されており、ENSO現象よりも低い。従って、予測という立場から、この地域のSSTと降水量の関係を調べても有意義な結果は得られない。

(2) ENSO現象と力学的予測の関係

以上から、利根川流域における渇水年とENSO年の関係は無いかあってもとても弱いと言える。このことは、力学的手法によるアンサンブル平均季節予測に決定的な意味を持つ。大気現象は、力学的に記述することができるが、記述する方程式系は、非線型な偏微分方程式のため、長期予測においては、初期値に含まれる誤差が増幅され、観測誤差程度の誤差によって、いわゆるカオス現象¹⁵⁾により、全く異なる結果をもたらす。しかし、

そこに、予測期間に亘って、大気を強制し続ける現象があれば、予測結果は、強制によって決定される予測可能な成分と強制とは関係のない予測不可能な成分からなることになる¹⁶⁾。アンサンブル平均は、ここで言う、予測可能な成分を取り出す操作と行うことができる。大気を強制し続ける現象で、大気よりも低周波で変動するのはSSTであり、SSTで最も変動が大きく、予測可能性の高い現象がENSOである。このENSO現象と渇水に関係が無いとすれば、力学的手法に基づくアンサンブル平均、すなわち決定論的な季節予測は非常に難しいと言わざるを得ない。

このような事実は、CGCMでSSTが完全に予測されたとした場合に相当する観測SSTを与えた大気全球気候モデル(AGCM)実験でも示されている。Nakaegawaら^{17,18,19)}の一連の研究では、日本域の水資源に関する、降水量、土壌水分量、流出量、河川流量は、アンサンブル平均をもって予測とする場合、最大でも全振幅の50%程度しか予測できないことが示されており、前章で述べたENSO現象と渇水の弱い統計関係と図-4は、この理論値を裏付ける観測事実である。

また、季節予測は、個々の現象でなく、それらの平均を主な予測対象とするので、渇水を解消するような、台風や激しい前線活動などがもたらす1豪雨を、予測することも非常に難しい。個々の現象の再現性から見た場合、こうした点が、予測可能性を低下させている。

5. まとめ

首都圏は水資源の多くを利根川上流地域に依存している。本研究は、この地域の夏季渇水対策として、人工降雪による水資源量の増加を、より効率的に行うために、大気-海洋結合モデルを用いた季節予測が有用な情報をもたらすかについて基礎的な検討を行った。

まず、8月の平均貯水量とそれに先行する冬季から春季にかけての予測指標との関係を観測値から明らかにした。各月から8月までの積算降水量は、8月平均貯水量と4.5月からを除き、有意な高い相関関係があった。

次に、全球大気-海洋結合モデルを用いた力学的な季節予測実験結果を用いて、夏季水資源量の予測可能性について検討した。まず、既往の渇水年が、定性的に再現されているかを調べたところ、アンサンブル平均は、渇水傾向をランダムな予測よりも若干良く、予測していると言える。また、90年以降の渇水の予測精度は、既往の研究と同じように²⁰⁾、それ以前に比べて高くなっていた。また、甚大な渇水は事例が少なく、統計的有意性の議論に馴染まないが、1994年の渇水は予測できた可能性が高かった。

次に、渇水年とENSO年の関係から、得られた結果を吟味したが、通常年、El Niño年、La Niña年とで有意な発生確率の差異は見られなく、定性的に有意な相関関係を見いだすことができなかった。この結果は力学的手法

による決定論的な水資源量予測が難しいことを、観測値から示したものと言える^{17,18,19)}。

豊水年、渇水年に関わらず、毎年人工降雪による水資源量の増加を実施すると、夏季になって水資源が潤沢であれば、余分な貯水は利用されずに放水される。非効率ではあるが、これでも費用対効果で十分採算が合うのであれば、実用的である。しかし、本研究の結果によれば、毎年必ず人工気象調節の降雪シーディングを実施するよりも、3月からの積算流出量を判断材料として、渇水傾向にあると予測された年だけに実施することにより、費用対効果が若干高まることが期待される。今後は、人工降雨・降雪による水資源量の増加対策を始めとした渇水対策に掛かる費用とその効果を、予測の空振りを含めて検討し、経済的にも十分に採算が合うかを提示することが、必要であろう。

謝辞：本研究は、文部科学省科学振興調整費「渇水対策のための人工降雨・降雪に関する総合的研究」(代表: 気象研究所 村上正隆)による支援を受けて行われた。利根川ダム関連データは、国土交通省関東地方地方整備局から提供を受けたもので、この資料収集にはいであ(株)吉田、越田両氏に協力いただいた。また、村上正隆博士には、この論文原稿に対して雲物理的観点からの確かな意見を頂いた。

結合モデルによる季節予測実験は、気象研究所融合型経常研究「大気海洋結合季節予測モデルとそのアンサンブル手法の開発に関する研究」の下で、世界気候研究計画の季節予報タスクフォース (The WCRP Task Force on Seasonal Prediction (TSFP)) の国際共同研究に参加するために行われた。同じく融合型経常研究「日本の異常気象の実態及び気候変動との関連に関する研究」の下で、異常気象と渇水の関連性について調査する機会を得た。ここに、有意義な議論をしてくださった、これらプロジェクト参加者に感謝致します。

最後に、この論文に対して建設的かつ適切なコメントを下された3名の査読者に感謝致します。

参考文献

- 1) IPCC, editor. *IPCC Fourth Assessment Report*, chapter 11. Regional Climate Projections, pp. 847–940. Cambridge University press, 2007.
- 2) K. Kamiguchi, A. Kitoh, T. Uchiyama, R. Mizuta, and A. Noda. Changes in precipitation-based extremes indices due to global warming projected by a global 20-km-mesh atmospheric model. *SOLA*, Vol. 2, pp. 64–67, 2006.
- 3) 村上正隆. 人工降雪による水資源確保の可能性について. *気象*, Vol. 514, pp. 16462–16468, 2000.
- 4) 村上正隆, 折笠成宏, 楠研一, 星本みずほ, 小菅博, 池田明弘. 水資源確保を目的とした人工降雪技術の現状. 第5回水資源シンポジウム, 第5巻, pp. 575–580, 乃木坂、日本学術会議, 2002.
- 5) M. Murakami, N. Oriksa, M. Hoshimoto, K. Kusunoki, H. Kosuge, and H. Ikeda. Present state of Japanese research on orographic snow cloud modification for water resources

- augmentation. In *Preprints The 8th WMO Scientific Conference on Weather Modification*, WMO Report, No. 36, pp. 95–98. WMO, 1999.
- 6) 安田珠幾, 高谷祐平, 松本聡. 気象庁/気象研季節予報用大気海洋結合モデル. 平成18年度全国季節予報技術検討会資料, pp. 69–78, つくば市, 2007.
- 7) 佐藤信夫, 里田弘. 生物圏と大気圏の相互作用. 数値予報課報告, 気象庁予報部, 1989.
- 8) K. Onogi, J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsuhika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira. The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, Vol. 85, pp. 369–432, 2007.
- 9) N. Usui, S. Ishizaki, Y. Fujii, H. Tsujino, T. Yasuda, and M. Kamachi. Meteorological research institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. *Advances in Space Research*, Vol. 37, pp. 806–822, 2006.
- 10) 村上正隆, 星本みずほ, 折笠成宏, 山田芳則, 水野量, 徳野正己, 添田耕一, 梶川正弘, 池田弘明, 伍井稔. 冬期越後山脈にかかるシーダビリティの高い雪雲の出現頻度: 衛星赤外チャンネルデータとマイクロ波放射計データを用いた統計的評価. *天気*, Vol. 48, No. 8, pp. 547–559, 2001.
- 11) T. Yasuda, Y. Takaya, C. Kobayashi, M. Kamachi, H. Kamahori, and T. Ose. Asian Monsoon predictability in JMA/MRI seasonal forecast system. In *CLIVER Exchanges*, pp. 18–24, Southampton, U.K., 2007.
- 12) T. Nitta. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, Vol. 65, pp. 373–390, 1987.
- 13) T. N. Palmer, F.J. Doblas-Reyes, R. Hagedorn, and A. Weisheimer. Probabilistic prediction of climate using multi-model ensembles: from basics to applications. *Philos. Trans. Roy. Soc.(B)*, Vol. 360, pp. 1991–1998, 2005.
- 14) 気象庁. エルニーニョ/ラニーニャ現象. <http://www.data.jma.go.jp/gmd/cpd/elnino/>, 2007年9月30日アクセス.
- 15) E. N. Lorenz. Atmospheric predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*, Vol. 34, pp. 505–513, 1982.
- 16) J. Shukla. A predictability in the midst of chaos: A scientific basis for climate forecasting. *Science*, Vol. 282, pp. 728–731, 1998.
- 17) 仲江川敏之, 楠昌司, 杉正人, 鬼頭 昭雄, 小林ちあき, 高野清治. 全球大気モデルを用いた季節予報実験に基づく水資源量の予測精度と予測可能性. *水工学論文集*, Vol. 46, pp. 109–114, 2002.
- 18) 仲江川敏之, 保坂征宏. 力学的アンサンブル手法による熱帯アジアモンスーン地域の河川流量の潜在的季節予測可能性. *水工学論文集*, Vol. 50, pp. 523–528, 2006.
- 19) T. Nakaegawa, S. Kusunoki, M. Sugi, A. Kitoh, C. Kobayashi, and K. Takano. A study of dynamical seasonal prediction of potential water resources based on an atmospheric gcm experiment with prescribed sea-surface temperature. *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 52, No. 1, pp. 152–165, 2007.
- 20) T. Nakaegawa, M. Kanamitsu, and T. M. Smith. Interdecadal trend of prediction skill in an ensemble AMIP-type experiment. *J. Climate*, Vol. 17, No. 14, pp. 2881–2889, 2004.

(2007.9.30 受付)