

利根川上流域の渇水対策に対する 力学的季節予測情報の経済価値評価

ASSESSMENT OF ECONOMIC VALUE OF DETERMINISTIC INFORMATION
BASED ON DYNAMICAL SEASONAL PREDICTIONS IN 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) ヨーロッパ中期予報センター (〒 RG2 9AX イギリス レディング市)

The present study examines the potential economic value of seasonal prediction for the drought management upstream of the Tone River basin based on the ensemble mean of the dynamical seasonal predictions with an atmosphere-ocean coupled model. This study employs order statistics of the ensemble means to obtain robust results by avoiding an explicit treatment of hydrological processes. The economic value is measured as an economic reduction rate that indicates how much the prediction based on the ensemble mean information contributes to economic reduction of loss from the prediction based on the climatological information. The ensemble mean information is first validated against the 11 out of 28 summer drought years (1979 to 2006) and is as accurate as the information obtained from climatological statistics. Positive economic reduction rates from 0 to 0.15 are found in limited cost-loss ratios less than 0.47 for a few of the 11 prediction categories (from 0 to 100% with an interval of 10%). This indicates that even the current seasonal prediction can provide decision makers with some economically valuable information for drought management.

Key Words: *economic value, dynamical seasonal prediction, drought management, the Tone River basin, order statistics*

1. はじめに

関東地方は日本の年平均降水量 1700mm のおよそ 90% に当たる降水があるが、約 4100 万人と日本の人口の約 1/3 の人々が生活しているため、一人当たりの水資源賦存量は 1300m³/年・人で、全国平均の僅か 26% しかない¹⁾。実際、多くの水資源を依存している利根川上流域では、最近 30 年間で、夏季に取水制限が 11 回、冬季に 2 回行われていて、渇水に対する脆弱性が問題となっている。水資源の安定供給のための様々な努力により、甚大な被害を回避してきているので、一般市民が記憶に留めている近年の渇水は、1994 年の渇水列島だけであろう。その一方で、ダムを始めとする施設群による水資源開発は頭打ちとなり、今後更なる安定した水資源供給を目指すには、新たな方法を考える必要がある (例えば、人工降雨・降雪や高度な一括管理²⁾)。

幾つかある方法のうちで、長期的な天候予測を利用して、最適な水資源施設群の運用を行う方法が考えられる。仲江川ほか³⁾ は、気象庁 El Niño 予測モデルによる予測実験を実施し、アンサンブル平均の順序統計を基に、1 月末の時点で、利根川上流域の夏季渇水傾向がどの程度予

測できるかについて調べている。それによると、良い条件を選べば、気候学 (統計) 的な出現確率よりも、予測は高い出現確率情報を持つことが示されている。

しかし、渇水は頻発する現象ではなく、気候学的な非渇水年の生起確率は $(28-11)/28=0.61$ で、毎年渇水が生じないという予測を出しても、6 割の確率で当たることになる。このことは、仲江川ほか³⁾ が行ったような、渇水が生じると予測して、当たった場合だけに着目して精度 (適中率) を議論するのではなく、外れた場合も考慮すべきことを示唆している⁴⁾。

上述のような予測結果の検証により、精度が分かっている予測を利用できたとしても、意志決定者は、どのように予測情報を利用したら良いか直感的には見当が付かない。このような問題に対して、意思決定者の利益を最大にするための予測情報利用法を調べる方法としてコスト/ロスモデルがある⁵⁾。別の言い方をすれば、気象予測は外れることも有り得るという前提に立って、経済効果を最大限に引き出すためには、どのような気象予測情報を用いれば良いかを、提示してくれる、モデルである。このモデルに基づく研究は以前から行われており、

表-1 ある現象に対する予測の分割表.

		実況	
		あり	なし
予測	あり	適中 (w)	空振り (x)
	なし	見逃し (y)	適中 (z)

例えばどういった降水確率の時に、コンクリートの打設を中止すべきかを検討した研究⁶⁾や、ヨーロッパにおける10日間程度の水文予測情報の経済価値を調査した研究⁷⁾などが挙げられる。

上で触れたように、仲江川ほか³⁾の研究では、基本的な検証に留まっており、また、意思決定者側に立った予測情報の経済価値について、判断材料を提供していない。そこで、本研究では、利根川上流域で水資源を確保することによって、関東地方の渇水対策を図る際に、現在の力学的季節予測情報の経済価値がどの程度あるのかについて、コスト/ロスモデルを用いて調べた。

2. カテゴリー予測とその経済価値

(1) カテゴリー予測の評価方法

まず、予測されたアンサンブル平均を降水量の少ない順に並べて、順序を決定する。その順序を11分割にすることを考える。上位10%から90%までは、10%ずつの区間に分け、両端は0~5%、95~100%の区間とし、各区間を上からカテゴリー0%、10%、..., 100%と呼ぶ。ここで、各カテゴリーに対応する%は、上で述べた通り、上位何%に位置しているかを示すもので、いわゆる、短時間予報での雨の降水確率や、季節予報での降水量が平年より少ない/多い確率と似てはいるが、同じではない。

11 カテゴリー予測で、対応する実況は渇水あり、なしの2つとする。この場合、予測と実況の関係は、表-1で尽くされる。普通、ある現象(この研究の場合では渇水)の予測精度はどれだけ適中したかによって評価(適中率)される。しかし、あり予測に従って意思決定者が常に対策をとった場合、実況では生じなかった時の評価(空振り率)をしないと、適切な経済価値を評価できない。この表を基に、適中率(H_r)と空振り率(F_r)は、次のように定義される。

$$H_r = \frac{w}{w+y}, \quad F_r = \frac{x}{x+z} \quad (1)$$

表-1から明らかなように、空振りと見逃しが少ない予測ほど、良い予測である。従って、良い予測ほど、適中率は1に近付き、空振り率は0に近づく。この二つの成績は、各カテゴリー毎に計算される。それを一つの図上で表すのが、Relative Operating Characteristics (ROC) カーブと呼ばれるものである⁸⁾。特に、予測情報の経済価値を決定する際に用いるコスト/ロスモデルでは、両者を分けて考えなければならない。以下では、この経済価値を定

表-2 予測と実況の関係による一回あたりの費用.

		実況	
		あり	なし
予測	あり	C	C
	なし	L	0

量化する方法について述べる。

(2) 予測情報の経済価値

N 年のうちに、ある現象が M 回起こったと仮定する。その現象1回で生じる損害額が L 、それを完全回避できる対策費を C とする。ここで、以下の解析では、 L, C 共に、定数と仮定する。対策費が損害額を越える場合は、事後対処で十分であるから、 $L > C$ とする。予測で現象ありと判定された場合に対策を実施すれば、実況で現象が生じようと生じまいと対策費 C が経かり、予測でなしの場合、実況で現象が生じれば L の損失、生じなければ損失は無い。これらをまとめると、表-2のようになる。

まず、予測情報が無い場合、二つの極端な場合が考えられる。全く対策を取らないとすると損害額は、 N 年間で、

$$T_n = ML \quad (2)$$

である。一方、常に対策を講じるとすると、対策費は、

$$T_a = NC \quad (3)$$

である。対策を講じるという意志決定は、対策費が損害額よりも小さくなる場合 $T_a < T_n$ のみであり、

$$\frac{C}{L} < \frac{M}{N} \quad (4)$$

を満たすことが必要である。この式は、対策費の損害額に対する割合(C/L 比)が、気候学的な発生確率(M/N 比)よりも小さい場合のみ、対策を実施すべきであることを意味している。 M/N 比は、人為的に変えることができないので、この式から、対策の経費は $C < (M/N)L$ を満たさなければならないことが分かる。

次に、予測を基に、対策を講じる/講じないの決定をした場合の損失を、損害額に対する一回あたりの割合(e_i ; 予測情報を利用した場合の損失と同義)で表すことを考える。平均的な損失(e)は、 $e = C(w+x) + Ly$ と表されるので、両辺を NL で割ることにより、 e_i は、

$$e_i = \frac{C}{NL}(w+x) + \frac{y}{N} \quad (5)$$

と表される。ここで、表-1中の変数と M, N の関係は、 $w+y=M, w+x+y+z=N$ なので、式(5)を変形して、 H_r と F_r で表すと、

$$e_i = F_r \frac{C}{L} \left(1 - \frac{M}{N}\right) - H_r \frac{M}{N} \left(1 - \frac{C}{L}\right) + \frac{M}{N} \quad (6)$$

となる。この式は、当然のことながら、 F_r が大きいほど、 H_r が小さいほど、損失が大きくなるということを示す。

示している。式 (2) と式 (3) を L で割れば、それぞれ $(F_r, H_r) = (0, 0)$ と $(F_r, H_r) = (1, 1)$ の時の式 (6) の値となる。

ここで、式 (6) を利用しやすいように、規格化することを考える。予測情報が無い場合は、 M/N 比だけが既知として、式 (4) を満たすときのみ、対策を取り、そうでなければ、対策を取らない方が損失額は小さい。従って、予測情報が無い場合の損失額 (e_c) は、

$$e_c = \min\left(\frac{C}{L}, \frac{M}{N}\right) \quad (7)$$

と表される。次に、予測情報が完全、即ち実況と同じ場合、 $(F_r, H_r) = (0, 1)$ を式 (6) に代入して、完全予測を利用した場合の損失 (e_p) は

$$e_p = \frac{MC}{NL} \quad (8)$$

となる。経済損失軽減率 (v_i) は、予測情報を利用した場合の損失を完全予測の損失で規格化したものとして定義され、

$$v_i = \frac{e_c - e_i}{e_c - e_p} = \frac{\min\left(\frac{C}{L}, \frac{M}{N}\right) - F_r \frac{C}{L} \left(1 - \frac{M}{N}\right) + H_r \frac{M}{N} \left(1 - \frac{C}{L}\right) - \frac{MC}{NL}}{\min\left(\frac{C}{L}, \frac{M}{N}\right) - \frac{MC}{NL}} \quad (9)$$

と表される。この式を $(0, M/N]$ と $[M/N, 1)$ とで分けて、 C/L で微分すると、 $(0, M/N]$ で増加、 $[M/N, 1)$ で減少となり、 $C/L = M/N$ の時、最大値を取る。以上のように、予測精度と予測情報の経済価値を結びつける、式 (9) が導かれる。

3. モデルと実験、解析方法

(1) 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 3 月から El Niño 予測システムのモデルとして現業運用されている大気-海洋結合モデル (CGCM) である⁹⁾。大気モデルは、基本的な枠組が現業全球大気モデルと同じ気象庁統一全球大気モデルである。解像度は水平約 200km (三角形切断・線形格子 TL95)、鉛直 40 層で大気上端 0.1hPa までを表現している。海洋モデルは、気象研究所共用海洋大循環モデルで、計算領域は南北 70 度、水平解像度は、東西 1 度、南北は可変格子を採用し、赤道付近で 0.3 度、中高緯度で 1 度、鉛直解像度は 50 層で、水深 5000m までを表現している。陸面水文過程は、気象庁 Simple Biosphere モデル (JMA-Sib) を用いており¹⁰⁾、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、アンサンブルメンバー数は 10 である。本研究では、毎年 1 月の月末 5 日間の 00,12UTC の大気、海洋の状態を各メンバーの初期値として用いた。大気は日本再解析-25 年¹¹⁾ の、海洋は

表-3 利根川上流域における夏季渇水年。

1979	1980	1982	1987	1990	1994
1996	2001	2002	2004	2005	

太字年は渇水規模上位 4 つ、太字年+イタリック体年は上位 6 つを示している。

気象研で開発されたデータ同化システム¹²⁾ の解析値を用いた。実験期間は 1979 年から 2006 年までの 28 年である。これらは、仲江川ほか³⁾ と同じ実験であるが、メンバー数が 5 から 10 に増えている。

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 (仲江川ほか, 2008³⁾ 図-1 を参照)。しかし、利根川上流流域は、CGCM の大気モデル 1 グリッドの約 1/18 の流域面積しか持たなく、また千曲川や天竜川上流域もこのグリッドに含まれている。従って、ダウンスケーリングやガイダンス等の統計的補正を行わずに、予測値をそのまま用いる本研究の場合、定量的な予測よりも、定性的な予測に留めておくべきなので、以下の解析では順序統計量を用いる。

(2) 解析方法

仲江川ほか³⁾ に倣い、渇水年の定義と予測実験結果の解析を行った。渇水年は、利根川上流域で取水制限を行った年で定義し、対象期間 28 年中、表-3 に示す 11 年である。

予測実験結果については、状態量の貯水量は、観測時点までの降水量の総和と関係が深いので、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。 $x_{m,y} = \sum_{j=m}^8 a_{j,y}$ 。ここで、 $x_{m,y}$ は y 年 m 月から 8 月までの積算値、 $a_{j,y}$ は y 年 j 月の降水量アンサンブル平均値である。この様にして得られた、 $x_{m,y}$ を積算開始月 m 毎に、昇幕の順に並べ、その順位だけを利用する。予測実験期間が 28 年なので、値は 1~28 となる。先に述べたように、この順序統計を 11 カテゴリーに分割し、各カテゴリーで、実況に渇水年あり、なしで判定した場合の適中数と空振り数を求め、予測情報の精度と経済価値を計算した。

4. 結果と議論

(1) 予測情報の精度

一例として、表-4 に 3-8 月積算降水量のアンサンブル平均順序統計量に基づいた、渇水予測の適中と空振の回数を示す。この表から容易に、各カテゴリー毎に適中率と空振り率を計算することができる。この表から計算された ROC カーブを図-1(a) に示す。この曲線が左上に膨らむほど、予測成績が良く、右下側の面積が予測成績の指標 (ROC スコア) となる。完全予測の場合、 $(F_r, H_r) = (0, 1)$ なので、ROC スコアは 1 となり、予測情

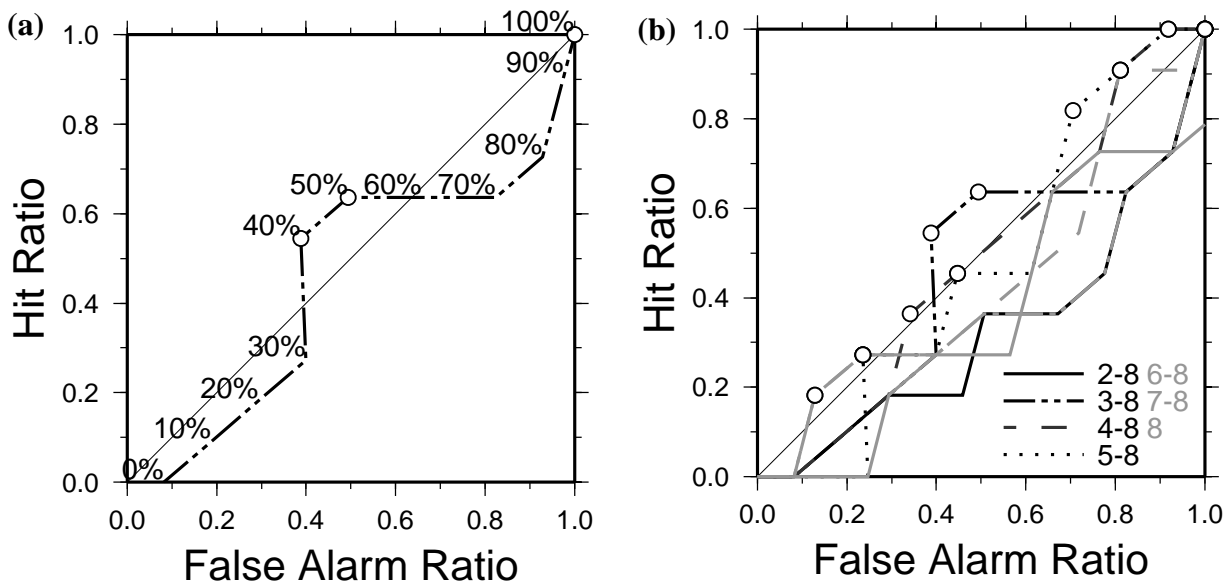


図-1 利根川上流域における積算降水量に基づく夏季渇水発生についてのROCカーブ。(a)3-8月積算降水量,(b)X-8月積算降水量。は10%有意水準かつ $H_r > F_r$ の点を表している。(a)中の%は、各カテゴリーを表している。

表-4 3-8月積算降水量のアンサンブル平均順序統計量に基づく利根川上流域における夏季渇水を対象とした季節予測の適中と空振の回数。

カテゴリー	予測あり 実況			予測なし 実況		
	予測回数	あり w	なし x	予測回数	あり y	なし z
0%	1	0	1	27	11	16
10%	4	1	3	24	10	14
20%	7	2	5	21	9	12
30%	9	3	6	19	8	11
40%	12	6	6	16	5	11
50%	15	7	8	13	4	9
60%	18	7	11	10	4	6
70%	21	7	14	7	4	3
80%	23	8	15	5	3	2
90%	26	10	16	2	1	1
100%	28	11	17	0	0	0

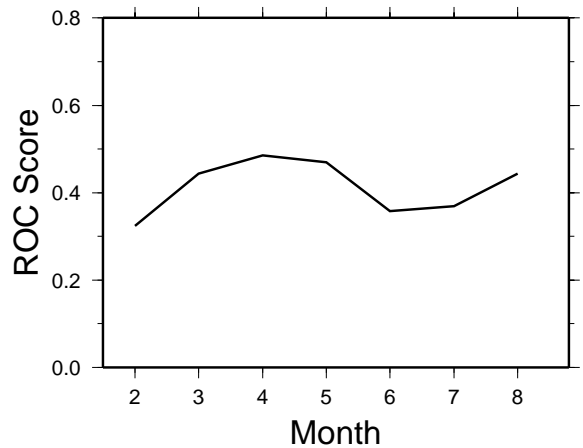


図-2 積算降水量(X-8月)毎のROCスコア(図-1に示されている各ROCカーブの右下側面積)。

図-1(b)に積算月数を変化させた場合の結果をまとめて示す。2-8月と6-8月の積算降水量の予測情報は全てのカテゴリーで対角線より下にあり、常に気候学的予測以下の精度しかない。それ以外の積算降水量予測情報では、幾つかのカテゴリーで気候学的予測以上の精度がある。図-2は、積算開始月とROCスコアの関係を示している。積算降水量予測情報は、ROCスコアが0.5以下で、気候学的予測以下の情報しか持たない。また、最大値は、4-8月積算降水量の時で、2-8月積算を除き、仲江川ほか³⁾が指摘したように、短期間よりも長期間の積算降水量が予測情報として精度があることが再確認できる。以上から、積算降水量のカテゴリー予測は、気候学的予測と同等かそれ以下の精度しか、全体としてはないが、幾つかのカテゴリーでは、気候学的予測を上回ることが示された。

報が気候学的出現率に基づく予測と同じ情報しか無い場合、 $F_r = H_r$ と図の対角線となり、ROCスコアは0.5となる。ROCスコアが0.5以下の場合、予測情報は気候学的予測以下の情報しか持たない。各点は、そのカテゴリーを用いた場合の予測情報の精度、面積は11カテゴリー全体の予測情報の精度を示している。

図-1(a)から、3-8月積算降水量による予測情報は、対角線より上の部分も下の部分もあることが分かる。上の部分は、カテゴリー60%と70%の時で、有意確率10%で有意であったが、5%では有意では無かった。ROCスコアは0.44と、全体としては気候学的予測以下の精度しかない。

(2) 予測情報の経済価値

図-3(a)に3-8月の積算降水量を予測情報として用いた場合に得られる経済損失軽減率を示す。式(9)で述べ

た通り、 $C/L = M/N = 11/28 = 0.393$ の時に、積算期間に関係なく、全てのカテゴリで最大値を取る。その中で最大の値は、40%のカテゴリの予測情報を判断基準とした場合の、0.15 である (図-3(a) 参照)。予測情報を用いることにより、気候学的な生起確率しか情報が無い場合に比べ最大で 15% の損失を軽減することができる。実際の利用に際しては、各 C/L 比に対して、最大の損失軽減率を示すカテゴリの予測情報を用いれば良い。例えば、3-8 月積算降水量では、 $C/L = 0.32 \sim 0.35$ の場合、差は僅かではあるが、40% よりも 50% カテゴリの予測情報を利用した方が良い。一方、軽減が望める範囲は $C/L = 0.32 \sim 0.47$ に限られ、対策があったとしても、 C/L 比がこの範囲に無い限り、予測情報は有効に機能しない。このことは、その対策が有効でないということではなく、予測情報を利用せずに、式 (7) を基に、意志決定をすれば良い。

図-3(b) は 4-8 月積算降水量を用いた場合の軽減率を示したものである。図-3(a) と同じく、 $C/L = 0.393$ の時、最大値を取るが、その値は 0.1 程度と低減率は小さい。また、 $C/L < 0.393 (= M/N)$ で 0.08 程度の一定した軽減率を持っている。この場合、 $H_r = 1$ (図-1) で、しかも $e_c = C/L$ なので、式 (9) から、 C/L 比に関係なく、値は一定となることがわかる。3-8 月積算降水量と比較すると、軽減率は小さいが、幅広い C/L 比に対して、予測情報が有効である。

その他の積算降水量を用いた場合の軽減率を調べると、5-8 月積算降水量は、3-8 月と 4-8 月積算降水量の二つの中間的な結果である。2-8 月と 6-8 月積算降水量は、軽減率は 0 以下で、残りの 7-8 月と 8 月は、 $C/L = 0.393$ 近傍に、0.05 以下の軽減率が表れるだけで、予測情報の有効性は極めて限定的である。

ROC スコアで見ると、いずれの積算降水量についても、そのカテゴリ予測成績は、気候値以下であった (図-2 参照)。にも拘らず、図-3 では、有効な経済損失軽減率が得られている。これは、ROC スコアが 11 カテゴリ全体の成績を示すのに対して、軽減率は、各カテゴリの適中率と空振り率だけに基づくからである。即ち、全体としての ROC スコアが低くても、あるカテゴリの適中率が高く、空振り率が小さければ、軽減率は高くなる。式 (9) を変形すれば分かるように、ROC カーブの図で、対角線より左上、即ち $H_r > F_r$ であれば、有効な経済損失軽減率が得られる。実際、図-1(a) を見ると、左上に近い曲線の上の点は 3-8 月積算降水量のカテゴリ 40% と 50% の場合で、その結果が図-3(a) に表れている。

上で、各積算降水量について、経済損失軽減率が最大となるようなカテゴリの予測情報を用いれば良いと述べたが、異なる積算期間の結果を組み合わせても良い。このように合成して得られる損失軽減率が図-3(c) に示されている。値が一定な部分は 4-8(5-8) 月積算降水量の、それ以外の部分は 3-8 月積算降水量の、軽減率が合成されて、この曲線が描かれている。この結果から、 C/L 比が 0.47 以下であれば、適切な予測情報を用いること

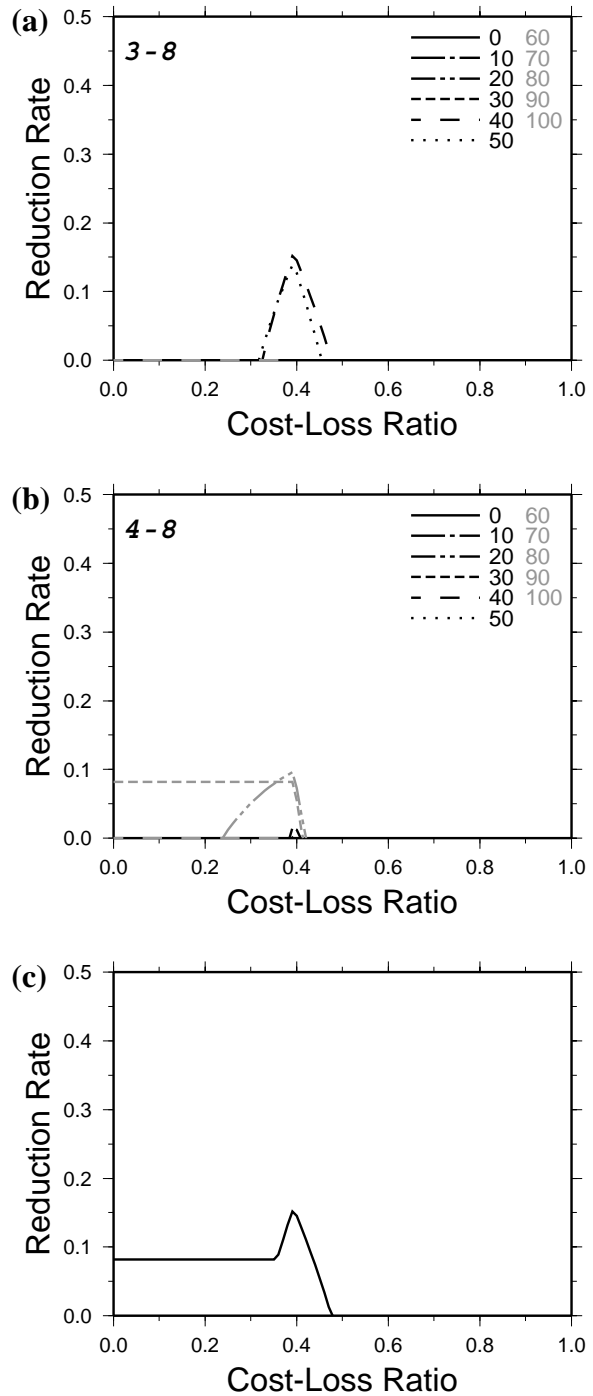


図-3 コストロス比と予測の価値を示す経済損失軽減率の関係。(a) 3-8 月積算降水量予測、(b) 4-8 月積算降水量予測、(c) 7つの積算期間を用いた最大の損失軽減率。有意水準 10%のもののみ描画。

により、経済損失を軽減することができる。

(3) 渇水年定義の変更による影響

図-3 で示された、経済損失軽減率は、十分に大きな値では無い。式 (9) の導出で述べた通り、損失軽減率は、予測情報が無い場合の損失額を基準に、予測情報によってどれだけ経済的な軽減を上乗せできるかを示している。予測情報取得のコストはほぼ 0 と見做せ、 L は大きな額になると考えられるので、僅かな上乗せでも、実質的な経済損失の軽減は小さく無いと考えられる。

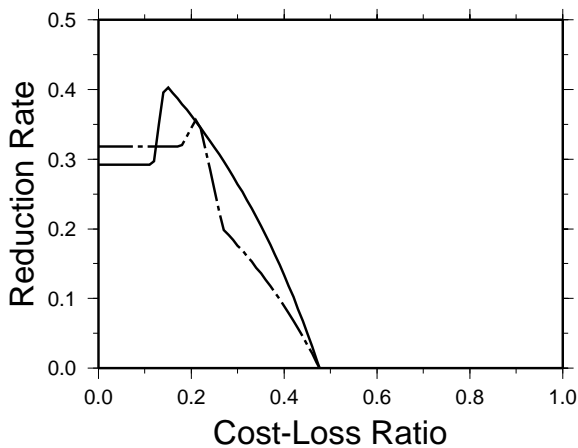


図-4 図-3(c)に同じ。但し、上位4 湯水(実線)、上位6 湯水(1点鎖線)。

以上の解析では、取水制限のあった年を湯水年と定義したが、別の定義も可能である。そこで、取水制限期間が長かった、1987、1990、1994、1996年の上位4つを湯水年と定義して(表-3参照)、同様の解析を行ったところ、7つの積算期間を用いた最大の損失軽減率は、図-4の実線で示した曲線のようになり、大幅な増加が見られる。ピークは $C/L = 0.143$ で、0.4に達し、 $C/L = 0 \sim 0.48$ の範囲で、予測情報に経済価値がある。

上記4年に、取水制限期間の差が小さい1979、1980年の2年を加えた場合も、4湯水年と類似の関係が得られた(図-4中、1点鎖線)。従って、湯水規模が大きい場合ほど、予測情報の損失軽減率は高い傾向にある。

5. 結論

本研究は、関東地方が多くの水資源を依存している利根川上流域の夏季湯水対策について意志決定する際に、決定論的力学的季節予測情報が、経済的観点から、有用であるかについて、コスト/ロスモデルを用いて調べた。

現業運用されているEl Niño予測システムのモデルを用いた過去28年間に対する予測実験を実施し、その予測精度を、7つの積算期間、11のカテゴリーで検討した。取水制限のあった11年を湯水年と定義して調べたところ、全体としては最大でも気候値予測程度であったが(図-2)、積算期間、カテゴリーを選べば、気候値予測を上回る場合もあることが示された(図-1)。

予測情報の価値を、コスト/ロスモデルに基づき経済損失軽減率で、評価したところ、 $C/L \leq 0.47$ 以下のところで、価値があり、8%程度の軽減が期待できる(図-3)。また、定義を変えて、湯水年をそれぞれ上位4年、6年とすると、経済損失軽減率は、大幅に向上した(図-4)。

本研究では、現在の予測精度でも、利根川上流域の夏季湯水対策について意志決定する際に、季節予測の情報に価値があることが示された。しかし、価値がもっと上がらないと、実際に利用することはならないだろう。季節予測が困難であるのは、大気-海洋結合系の決定論的

長期予測不可能性(所謂カオス)という、自然に内在する特徴からであり、根元的な情報価値である季節予測自体の精度を向上させる努力も日々行われているが、長足の進歩は難しい。その点で、現業予測で用いられている、統計関係に基づく補正をした予測情報(ガイダンス)を利用することで、予測精度、予測情報の経済価値を、高めることも、実用的には検討すべきである。また、本研究で用いたコスト/ロスモデルは簡単なものなので、更に精緻なモデルを用いて検討する余地がある。

謝辞：本研究は、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」、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、文部科学省科学振興調整費「湯水対策のための人工降雨・降雪に関する総合的研究」の下で実施された。

参考文献

- 1) 国土交通省土地・水資源局水資源部：日本の水資源、財務相印刷局、2005。
- 2) 増本隆夫、袁新、吉田武郎、久保田富次郎、堀川直紀：農業用水利用からみた利根川上流域水資源施設群の高度一括管理の現状と展望、農業工学研究所技報、Vol. 204, pp. 115-128, 2006。
- 3) 仲江川敏之、安田珠幾、高谷裕平：利根川上流域を対象とした湯水対策のための力学的予測結果の利用に関する基礎的研究、水工学論文集、Vol. 52, pp. 517-522, 2008。
- 4) 立平良三：気象予報による意志決定、東京堂出版、1999。
- 5) Murphy, A. H.: Decision making and the value of forecasts in a generalized model of the Cost-Loss ratio situation, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 113, pp. 362-369, 1985。
- 6) Stewart, T. R.: *Economic value of Weather and Climate Forecasts*, chapter Forecast value: descriptive decision studies, pp. 147-181. Cambridge University Press, 1997。
- 7) Roulin E.: Skill and relative economic value of medium-range hydrological ensemble prediction, *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, Vol. 11, pp. 725-737, 2007。
- 8) Swets, J. A.: The relative operating characteristic in psychology, *Science*, Vol. 182, pp. 990-1000, 1973。
- 9) Yasuda, T., Takaya, Y., Kobayashi C., Kamachi M., Kamahori H., and Ose T.: Asian Monsoon predictability in JMA/MRI seasonal forecast system, In *CLIVER Exchanges*, pp. 18-24, Southampton, U.K., 2007。
- 10) 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、別冊第35号、気象庁予報部、pp. 4-73, 1989。
- 11) Onogi, K., Tsutsui, J., Koide, H., Sakamoto, M., Kobayashi, S., Hatsuhika, H., Matsumoto, T., Yamazaki, N., Kamahori, H., Takahashi, K., Kadokura, S., Wada, K., Kato, K., Oyama, R., Ose, T., Mannoji, N., and Taira, R.: The JRA-25 Reanalysis, *J. Meteor. Soc. Jpn.*, Vol. 85, pp. 369-432, 2007。
- 12) Usui, N., Ishizaki, S., Fujii, Y., Tsujino, H., Yasuda, T., and Kamachi M.: Meteorological research institute multivariate ocean variational estimation (MOVE) system: Some early results. *Advances in Space Research*, Vol. 37, pp. 806-822, 2006。

(2008.9.30 受付)