コスト・ロス・モデルに基づいた天気予報の評価指数の提案

山　田　眞　吾*

1．はじめに

「行政の効率化・透明化」が重要な政策目標となっている今日，天気予報などの「気象情報」についても「客観的な業務評価」が求められている．現在，気象庁では「適中率」などの評価指標を用いて，天気予報の評価を行っているが，それらの指標は予報技術を評価する指標ではあっても社会に対する貢献度を量るという観点からは，意味付けが明確でない．

最近，立平（1999）は，「気象情報の経済的価値」をコスト・ロス・モデルを用いて論じた．また，諸外国においても，コスト・ロス・モデルに基づく「経済的価値」を論じたものがある（例えば，Katz & Murphy（1997）や Richardson, D.（1998）など）．特定の個人や企業は，気象状況に応じて対策をとる場合の費用（コスト）と対策をとらないために被る損失（ロス）および気象情報の精度を知ることにより，総費用の期待値が最も少なくなるように対策をとる（あるいは対策をとらない）ことができ，気象情報を効果的に利用することができる．しかし，広く国民一般を対象とする行政が行う天気予報の場合，様々なコストやロスをもつ利用者の集団全体における総費用の期待値が最小化されることが望ましい．本報告では，気象情報の利用者の仮想的な集団を考え，その利益の期待値を算出することにより，「天気予報の経済的な価値」の指標を導く．このような考え方は確率予報や多カテゴリー予報にも応用可能であるが，ここでは，現象が「発生する」か「発生しない」か，それに対して「対策をとる」か「対策をとらない」かという2つの選択肢しかなく，「現象あり」または「現象なし」という断定型の予測が提供される場合のみ論ずる．

* 気象庁予報部予報課（現　数値予報課）．

—2001年01月12日受領—
—2001年07月22日受理—

第1表　発生する費用の分割表（変形前）．

費用	対策有	対策無
現象有	K＋C	L
現象無	C	0

第2表　発生する費用の分割表（変形後）．

費用	対策有	対策無
現象有	0	B
現象無	C	0

2．2カテゴリー断定予報に対する定式化

本節では，コスト・ロス・モデルに基づいて予測情報を利用することによる総費用の減少幅の定式化を行う．

まず，現象が発生しなければ，生じる費用は0であるとする．現象が発生した場合には，対策をとっていなければ損害Lが生じるが，費用Cをかけて対策をとった場合には損害はKで済むものとする（第1表）．ただし，$C+K \geqq L$ の利用者は，対策をとっても費用が減少しないので，予測を利用する意味がない．したがって，$C+K<L$ の利用者のみを考える．費用 $C+K$ は現象が発生すれば対策の有無によらず必ず生じるものであるから，$L-C-K$ を改めてBと書くと，第2表になる．第2表は，完全予報を利用した場合の費用を基準としたとき，1回の「見逃し」により増加する費用がB，1回の「空振り」により増加する費用がCであることを表している．

次に，現象の発生・非発生に関する予測情報が存在し，その検証結果が第3表のような分割表の形で与えられたとする．第3表は，ある期間においてN回の予報が行われ，現象が起こった回数がP回，現象ありと予報した回数がQ回，現象ありと予報して実際に現象が起こった回数がW回であったことを表している．

第3表　現象発生/非発生回数の分割表.

回数	予測有	予測無	合計
現象有	W	P－W	P
現象無	Q－W	N-P-Q+W	N－P
合計	Q	N－Q	N

第4表　現象発生/非発生相対頻度の分割表.

割合	予測有	予測無	合計
現象有	w	p－w	p
現象無	q－w	1-p-q+w	1－p
合計	q	1－q	1

各欄をそれぞれ予報の回数Nで割って，p=P/N，q=Q/N，w=W/Nと書くと，第4表のようになる．pは現象の発生相対頻度，qは現象あり予報の発表相対頻度，wは現象ありを適中させた相対頻度を表している．ただし，0≦w≦p≦1，0≦w≦q≦1である．以後，wを「あり適中（率)」，1－p－q＋wを「なし適中（率)」，p－wを「見逃し（率)」，q－wを「空振り（率)」と呼ぶことにする．

現象ありと予測された場合には必ず対策をとり，現象なしと予測された場合には対策をとらないとすると，1回あたりの費用H_fは，

$$H_f=(q-w)\cdot C+(p-w)\cdot B$$

完全予報の場合には，p=q=wだから，1回あたりの費用のH_pは，

$$H_p=0$$

なお，不偏ランダム予測の場合には，q=p，w=p²だから，1回あたりの費用H_rは，

$$H_r=(1-p)p(B+C)$$

となる．

一方，予報を利用しない場合には，常に対策をとるか，常に対策をとらないかのいずれかを選択するものとする．常に対策をとる場合，q=1，w=pとなるから1回あたりの費用H_yは，

$$H_y=(1-p)C$$

常に対策をとらない場合，q=w=0となるから，1回あたりの費用H_nは，

$$H_n=p\cdot B$$

したがって，$\frac{C}{B}<\frac{p}{(1-p)}$であれば，$H_y<H_n$となり，常に対策をとった方が費用が少なくなり，$\frac{C}{B}>\frac{p}{(1-p)}$であれば，$H_y>H_n$となり，常に対策をとらない方が費用が少なくなることが分かる．このような判断は，「無技術最良予測」と呼ばれる（菊池原：1988).

なお，$\frac{C}{B}<\frac{p}{(1-p)}$のとき，

$$H_r-H_y=(1-p)\cdot\{pB-(1-p)C\}>0$$

$\frac{C}{B}>\frac{p}{(1-p)}$のとき，

$$H_r-H_n=p\cdot\{-pB+(1-p)C\}>0$$

であるから，「無技術最良予測」による費用は，不偏ランダム予測による費用よりも大きくはならないといえる．

「無技術最良予測」は，現象の発生相対頻度pを既知として求めているが，実際にはpがいくらになるかを予め知ることはできない．したがって，pを気候値的な現象の発生確率p_cで置き換えたものを考え，「気候値最良予測」と呼ぶことにする．

第4表で表される精度を持つ予報を利用した場合の費用H_fと「気候値最良予測」による費用の比較を行う．

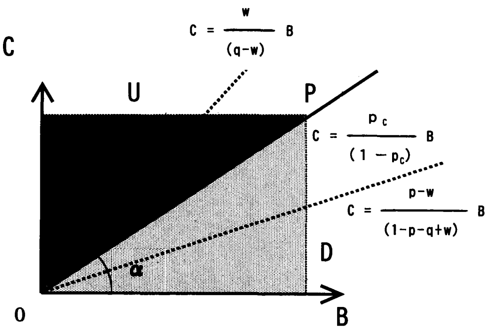
$\frac{C}{B}<\frac{p_c}{(1-p_c)}$のときには，

$$\Delta H=H_y-H_f=-(p-w)B+(1-p-q+w)C$$

$\frac{C}{B}>\frac{p_c}{(1-p_c)}$のときには，

$$\Delta H=H_n-H_f=wB-(q-w)C$$

これらの式は，対策費用Cと対策利益Bの比が小さい利用者にとっては，「なし適中」の報酬と「見逃し」の損失の比がC：Bであり，C/Bが大きい利用者にとっては，「あり適中」の報酬と「空振り」の損失の比がB：Cであることを意味している．これらをBとCの空間で表現すると，第1図のようになる．第1図で，横軸はB，縦軸はCを表す．ただし，B＞0，C＞0の領域のみを考える．



第1図　コストCと利益B空間における予報を利用した場合の利益による領域分割図.

$C=\frac{p_c}{(1-p_c)}B$で表される直線Pの上側の領域Uに属する利用者は，常に対策をとらないのが「気候値最良予測」となり，「あり適中」により利益Bが得られ，「空振り」によりCの損失が発生する．逆に，直線Pの下側の領域Dに属する利用者は，常に対策をとるのが「気候値最良予測」となり，「なし適中」により利益Cが得られ，「見逃し」によりBの損失が発生する．

予報を利用することによって利益がもたらされる利用者の存在範囲（存在条件）を求める．

$\frac{C}{B}<\frac{p_c}{(1-p_c)}$のときには，

$$\Delta H=H_y-H_f=-(p-w)B+(1-p-q+w)C>0$$

より，

$$\frac{C}{B}>\frac{p-w}{(1-p-q+w)}$$

このような利用者が存在する条件として，

$\frac{p_c}{1-p_c}>\frac{p-w}{(1-p-q+w)}$即ち$\frac{p-w}{1-q}<p_c$が導かれる．

一方，$\frac{C}{B}>\frac{p_c}{(1-p_c)}$のときには，

$$\Delta H=H_n-H_f=wB-(q-w)C>0$$

より，

$$\frac{C}{B}<\frac{w}{q-w}$$

このような利用者が存在する条件として，

$\frac{p_c}{1-p_c}<\frac{w}{q-w}$即ち $p_c<\frac{w}{q}$が導かれる．

「見逃し」と「なし適中」の比が小さくなるほど，第1図の直線Pの下側に，利益が正となる利用者の領域が拡大し，「あり適中」と「空振り」の比が大きくなるほど，第1図の直線Pの上側に，利益が正となる利用者の領域が拡大するといえる．

なお，完全予報の利益ΔH_pは，ΔHの式においてH_fをH_pでおきかえることにより求められる．即ち，

$\frac{C}{B}<\frac{p_c}{(1-p_c)}$のとき

$$\Delta H_p=H_y-H_p=(1-p)C$$

$$\frac{C}{B}>\frac{p_c}{(1-p_c)}$$

のとき

$$\Delta H_p=H_n-H_p=pB$$

である．

3．利用者集団全体の利益に基づく評価指標の算出

次に，様々なコストロスを持つ利用者の集団を考える．その分布n(B, C)が，B，Cで張られる平面において，原点にピークを持ち，直線P方向に長軸を持つ2次元正規分布をしていると仮定する．即ち，

$$n(B,\ C)=\exp\{-(X/a)^2-(Y/b)^2\}$$

ただし，$X=B\cos\alpha+C\sin\alpha$，$Y=-B\sin\alpha+C\cos\alpha$，

$$\tan\alpha=\frac{p_c}{(1-p_c)}$$

なお，ここでは，a>bと考える．

第1図のB>0，C>0領域での利用者数で重み付けした積分を記号$\langle A\rangle$で表し，直線Pの上側領域Uでの重み付き積分を記号$\langle A\rangle_U$，下側領域Dでの重み付き積分を記号$\langle A\rangle_D$で表す．即ち，

$$\langle A\rangle\equiv\int_0^\infty\int_0^\infty A(B,\ C)\cdot n(B,\ C)\,dBdC$$

$$\langle A\rangle_U\equiv\int_0^\infty\int_0^{(1-Pc)C/Pc} A(B,\ C)\cdot n(B,\ C)\,dBdC$$

$$\langle A\rangle_D\equiv\int_0^\infty\int_{(1-Pc)C/Pc}^\infty A(B,\ C)\cdot n(B,\ C)\,dBdC$$

ここで，$X=ar\cos\theta$，$Y=br\sin\theta$と変換し，

$dBdC=dXdY=abrdrd\theta$であることを利用すると，

全領域内の利用者数$\langle 1\rangle$は，

$$\langle 1\rangle=ab\int_{\theta_{C=0}}^{\theta_{B=0}}\int_0^\infty r\ \exp(-r^2)\,drd\theta=\frac{ab}{2}(\theta_{B=0}-\theta_{C=0})$$

となる．ただし，

$$\theta_{B=0}=\arctan\left(\frac{a\cos\alpha}{b\sin\alpha}\right),\ \theta_{C=0}=-\arctan\left(\frac{a\sin\alpha}{b\cos\alpha}\right)$$

であり，それぞれ直線 P と C 軸，直線 P と B 軸のなす角度に関連した量である．

特に，a=b なら，

$$\arctan\ \left(\frac{1}{\chi}\right)\ =\frac{\pi}{2}-\arctan(\chi)$$

より，$\langle 1\rangle=\frac{ab\pi}{4}$

となる．

次に，上側領域 U での B の重み付き積分 $\langle B\rangle_U$は，

$B=ar\cos\alpha\ \cos\theta-br\sin\alpha\ \sin\theta$ だから

$$\begin{aligned}\langle B\rangle_U&=ab\int_0^{\theta_{B=0}}\{a\cos\ \alpha\ \cos\theta-b\sin\ \alpha\sin\theta\}\cdot\\&\qquad[\int_0^{\infty}r^2\exp(-r^2)\,dr]\cdot d\theta\\&=\frac{ab\sqrt{\pi}}{4}\ \{a\cos\alpha\sin\theta_{B=0}-b\sin\alpha(\cos\theta_{B=0}-1)\}\end{aligned}$$

ここで，$\tan\theta_{B=0}=\frac{a\cos\alpha}{b\sin\alpha}$などを用いると，

$$\langle B\rangle_U=\frac{ab\sqrt{\pi}}{4}\left\{\ \sqrt{a^2\cos^2\alpha+b^2\sin^2\alpha}-b\sin\alpha\ \right\}$$

となる．

同様にして，C の上側領域 U での重み付き積分は，

$C=ar\sin\alpha\ \cos\theta+br\cos\alpha\ \sin\theta$ および

$\tan\theta_{C=0}=\frac{a\sin\alpha}{b\cos\alpha}$ より

$$\langle C\rangle_U=\frac{ab\sqrt{\pi}}{4}\left\{\frac{(a^2-b^2)\sin\alpha\ \cos\alpha}{\sqrt{a^2\cos^2\alpha+b^2\sin^2\alpha}}+b\cos\alpha\ \right\}$$

同様に，B の下側領域 D での重み付き積分は，

$$\langle B\rangle_D=\frac{ab\sqrt{\pi}}{4}\left\{\frac{(a^2-b^2)\sin\alpha\cos\alpha}{\sqrt{a^2\sin^2\alpha+b^2\cos^2\alpha}}+b\sin\alpha\ \right\}$$

C の下側領域 D での重み付き積分は，

$$\langle C\rangle_D=\frac{ab\sqrt{\pi}}{4}\left\{\ \sqrt{a^2\sin^2\alpha+b^2\cos^2\alpha}-b\cos\alpha\ \right\}$$

となる．

特に a=b の場合には，

$$\langle B\rangle_U=\frac{a^3\sqrt{\pi}}{4}(1-\sin\alpha),\ \langle C\rangle_U=\frac{a^3\sqrt{\pi}}{4}\cos\alpha$$

$$\langle B\rangle_D=\frac{a^3\sqrt{\pi}}{4}\sin\alpha,\ \langle C\rangle_D=\frac{a^3\sqrt{\pi}}{4}(1-\cos\alpha)$$

である．

また，ab を一定に保ったまま，a →∞の極限をとると，

$$\langle B\rangle_U=\langle B\rangle_D=\frac{a^2b\sqrt{\pi}}{4}\cos\alpha$$

$$\langle C\rangle_U=\langle C\rangle_D=\frac{a^2b\sqrt{\pi}}{4}\sin\alpha$$

となる．

これらの記号を用いると，第 4 表で表される予報を利用した場合の「気候値最良予報」からの利益の利用者集団全体の重み付き積分 $\langle \varDelta H\rangle$ は，

$$\begin{aligned}\langle\Delta H\rangle=w\langle B\rangle_U-(q-w)\langle C\rangle_U-(p-w)\langle B\rangle_D\\+(1-p-q+w)\langle C\rangle_D\\\cdots\ (A)\end{aligned}$$

一方，完全予報の場合には，p=q=w であるから，

$$\langle\Delta H_p\rangle=p\langle B\rangle_U+(1-p)\langle C\rangle_D$$

したがって，$S_B\equiv\frac{\langle\Delta H\rangle}{\langle\Delta H_p\rangle}$と定義すると

「気候値最良予測」の場合に 0，完全予報の場合に 1 となる評価指数 S_Bが得られる．利用者の平均的な利益に基づく指標であることから，以後「ベネフィットスコア」と呼ぶことにする．なお，指数自体は加算的でないが，$\langle\Delta H\rangle$ と $\langle\Delta H_p\rangle$ は加算的であるので，これらを保存しておけば，p_cが等しいと考えられる任意の期間に対して評価指数の計算が可能である．

4．評価指数の具体例

(A) 式は，「あり適中」の報酬と「空振り」の損失，「なし適中」の報酬，および「見逃し」の損失の比が，$\langle B\rangle_U:\langle C\rangle_U:\langle C\rangle_D:\langle B\rangle_D$となることを表している．

また，α は $\tan\alpha=\frac{p_c}{(1-p_c)}$から決められる量であるから，$\langle B\rangle_U$などは，利用者の分布に関するパラメータ a，b と現象発生の気候値的確率 p_cを決めれば定まる量である．また，ベネフィットスコアにおいては，完全予報の利益で正規化するので，各項の比のみが問題になり，パラメータは，a/b と p_cの 2 つになる．

第 5 表に，いくつかの p_cと a/b に対して「あり適中」の利益 $\langle B\rangle_U$で規格化した「空振り」および「見逃し」の損失（それぞれ $\langle C\rangle_U/\langle B\rangle_U$，$\langle B\rangle_D/\langle B\rangle_U$），「なし適中」の利益（$\langle C\rangle_D/\langle B\rangle_U$）を示す．

まず，$p_c=0.5$の場合，$\cos\alpha=\sin\alpha$ であるから，「なし適中」と「あり適中」の利益の比，および「空振り」と「見逃し」の損失の比は 1：1 である．a=b のとき，「適中」の利益と「不適中」の損失の比は，約 1：2.4

第5表　P_cおよびa/bを変化させた場合の予報1回あたりの「空振り」・「見逃し」の損失と「なし適中」の利益の変化（予報1回あたりの「あり適中」の利益で規格化してある）．

p_c	a/b	空振り	見逃し	なし適中
0.5	1.0	2.414	2.414	1.000
	2.0	1.894	1.894	1.000
	3.0	1.632	1.632	1.000
	5.0	1.392	1.392	1.000
	10.0	1.199	1.199	1.000
	100.0	1.012	1.012	1.000
0.3	1.0	1.517	0.650	0.133
	2.0	1.007	0.869	0.196
	3.0	0.819	0.974	0.242
	5.0	0.664	1.041	0.297
	10.0	0.547	1.051	0.355
	100.0	0.440	1.008	0.420
0.1	1.0	1.117	0.124	0.007
	2.0	0.617	0.231	0.013
	3.0	0.448	0.330	0.019
	5.0	0.314	0.499	0.029
	10.0	0.212	0.755	0.050
	100.0	0.121	0.998	0.102
0.02	1.0	1.021	0.021	0.0002
	2.0	0.521	0.041	0.0004
	3.0	0.354	0.062	0.0006
	5.0	0.220	0.102	0.0010
	10.0	0.120	0.200	0.0021
	100.0	0.030	0.898	0.0127

であるが，a/bを増加させると，「不適中」の損失が相対的に小さくなり，a/b→∞の極限では，1：1になる．利用者の分布を第1図の直線P付近に集中させると，「不適中」により損失を被る利用者が減るためと解釈できる．次に，a/bを固定してp_cを次第に小さくした場合の変化を見る．まず，a=bの場合には，「なし適中」と「あり適中」の利益の比が，$p_c=0.3$で約1：7，$p_c=0.1$で約1：150と急速に小さくなる．また，「空振り」と「見逃し」の損失の比は，$p_c=0.3$で約5：2，$p_c=0.1$で約10：1と次第に大きくなる．利用者の分布がコストロス比に対して一様であるため，第1図直線Pの上側の利用者(空振りにより損失が発生)の相対的な比率が大きくなるためである．このとき，p_cを固定してa/bを大きくすると，「なし適中」と「あり適中」の利益の比率は大きくなり，逆に，「空振り」と「見逃し」の損失の比は次第に小さくなって，a/b→∞の極限では，ともにp_c：$(1-p_c)$となる．このときのスコアS_Bは，Hansen & KuiperのVスコア（菊池原：1988）と同じになる．

第6表「降水の有無」予報の分割表（相対頻度）(a) 予測a，(b) 予測b，(c) 予測c(不偏ランダム予報)．

(a)

割合	予測有	予測無	合計
降水有	0.044	0.051	0.095
降水無	0.053	0.852	0.905
合計	0.097	0.903	1.000

(b)

割合	予測有	予測無	合計
降水有	0.043	0.052	0.095
降水無	0.058	0.847	0.905
合計	0.101	0.899	1.000

(c)

割合	予測有	予測無	合計
降水有	0.009	0.086	0.095
降水無	0.086	0.819	0.905
合計	0.095	0.905	1.000

次に，実際に「降水の有無」を予報した例について，ベネフィットスコアを計算し，従来のスコアとの比較を行う．

完全予報において最も大きな利益が得られるのは，第1図の直線P上の利用者であり，B軸やC軸に近い利用者は，たとえ完全予報を利用した場合でも，利益の大きさは相対的に小さい．したがって，利用者がコストロス比に対して一様な分布を持つ（即ちa=b）と考えるよりは，完全予報での利益が大きな利用者が相対的に多い（即ちa>b）と考えるほうが，自然であろう．一方，全ての利用者のコストロス比が同じ（即ちa/b→∞）と考えるのも極端であり，a/bを2～10程度と考えるのが現実的と思われる．もちろん，p_cの大きさによって，a/bが変わると考えてもよい．ここでは，$p_c=0.1$，a/b=3.0として計算する．

第6表a，b，cのような3種類の予報の分割表が得られた場合に，ベネフィットスコアおよびスレットスコア，Heidkeのスキルスコア，Hansen & KuiperのVスコアを計算したものが第7表である．

スコアの大きさは，Vスコアが最も大きく，スキルスコアはVスコアよりやや小さく，次いでスレットスコア，ベネフィットスコアの順に小さくなる．予報aと予報bのスコアを比較すると，すべてのスコアでa

第7表　第6表で示した予報例に対する各種スコアの比較.

スコア	予測 a	予測 b	予測 c
ベネフィットスコア	0.175	0.142	−0.377
スレットスコア	0.297	0.281	0.050
スキルスコア	0.401	0.378	0.000
Vスコア	0.405	0.389	0.000

が優っているが，bのスコアに対するaのスコアの改善率は，ベネフィットスコアが最も大きく，スレットスコア，スキルスコア，Vスコアの順に小さくなる．aとbは，「あり適中率」と「見逃し率」は，ほぼ等しいが，bのほうが「あり予報の回数」が多く，「空振り」が多くなっている．第5表からわかるように，$p_c=0.1$，$a/b=3.0$のときには，「空振り」による損失のほうが，「見逃し」による損失に比べて大きい．このため，「空振り」の多い予測bのスコアが悪くなったと考えられる．

また，予測cは不偏ランダム予測である．この場合，スキルスコアとVスコアは0になるが，スレットスコアは，0にならず正のスコアをとる．無技術であるにもかかわらず，一見技術のあるように見える正のスコアが得られることは，スレットスコアの欠点である．一方，ベネフィットスコアは，大きな負のスコアとなる．これは，「なし適中」の利益と「見逃し」の損失の比がp_c（$=0.1$）より小さく，「空振り」の損失と「あり適中」の利益の比はp_c（$=0.1$）より大きいためである．ある程度多様な利用者を想定した場合には，ランダム予報に比べて一定以上高い技術を持っていなければ，全体としての利益を生み出さないことを表している．

5．まとめと議論

コスト・ロス・モデルに基づいて，様々なコストとロスを持つ利用者の集団を想定した場合の「気候値最良予測」と予測を利用した場合の費用の差（利益）を求め，完全予報を利用した場合の利益で正規化した新しいスコア（ベネフィットスコア）を定式化した．

このスコアを求めるためには，「気候値最良予測」による費用を求めるためのパラメータp_c（気候学的現象発生確率）と，想定する利用者のコスト・ロス分布を決めるためのパラメータa/b（利益最大となるコスト・ロス比近傍への集中度）を決める必要がある．しかし，一旦それを固定すれば，一回の「あり適中」・「なし適中」で得られる利益や「空振り」・「見逃し」による損失は確定し，加算的な量になり，理解しやすいという利点がある（ただし，完全予報の利益で正規化した評価スコアは，加算的ではない）．なお，ベネフィットスコアは，上記2つのパラメータによって値が大きく変わるので，どのようなパラメータに対する値かをはっきり示すために，S_B ($p_c=0.1$，$a/b=3.0$) のように表記することが望ましい．

ベネフィットスコアの最大の特徴は，不偏ランダム予報に対するスコアが，0ではなく負になるということである．HeidkeのスキルスコアやHansen & KuiperのVスコアは，不偏ランダム予報に対して0になるので，ベネフィットスコアは，スキルスコアやVスコアに比べて低くなる．しかし，スキルスコアやVスコアが正であることは，利益がもたらされる利用者が存在することを示すにすぎず，無技術ではないことは言えるが必ずしも社会的な利益を意味するものではなかった．実際，スキルスコアが正であっても小さければ，意味のある予測とは言えず，実用的な予報であるためには，経験的に0.3〜0.5以上の値を持つ必要があると考えられる．このことは，相関係数が正であることは，ある程度母集団が大きければ，無相関ではないことを意味するが，相関係数がある程度大きくなければ，意味のある予測には使えないことと類似している．一方，ベネフィットスコアが正であることは，ある程度多様な利用者に対して，平均的な利益をもたらすことを意味しており，社会的な価値があることを示すものである．

もうひとつの特徴である気候学的発生確率P_cをパラメータとしている点について補足する．スキルスコアを求める場合，不偏ランダム予報のように現象の発生頻度pを既知として基準となる予報のペナルティを決めることが多いが，例えば季節を通して雨の多い年や乾燥した日の多い年があった場合，それを前もって知ることができると仮定していることになる．現在の技術では，そのような季節予報を正確に行うことは困難であり，そのような予測が無技術であるとは考えにくい．「気候値最良予測」は，例えば過去30年間の気候値的な状況以外の情報を一切もたない場合に考えられる最良の選択であり，基準予報としてふさわしいと考える．別の考え方としては，明日も今日と同じと考

える持続予報を基準予報にすることも考えられる．現象の起こり方がランダムであれば，持続予報は近似的に不偏ランダム予測と等しくなる．現象の起こり方に持続性があれば，持続予報は気候値最良予測よりも高い精度を示す可能性もあるが，気候値的発生確率の小さい現象については，現象が持続する確率も小さいので，持続予報が気候値最良予測を上回る精度を示す可能性は小さいと考えられる．したがって，ここで基準予報として採用した「気候値最良予測」は，無技術予測の中で最も経済的な損失の少ない予測であると考えてよい．

本報告では，「現象あり」か「現象なし」かの断定予報について定式化したが，「現象あり」の確率がPといった形で発表される確率予報についても，本報告と同様の考え方で，予報を利用することによる利益を計算し，ベネフィットスコアを求めることができる．確率予報に対するベネフィットスコアの定式化は次報に譲るが，この評価スコアを用いることにより，確率予報と断定予報を同じ土俵で直接比較できるようになる．このことは，ベネフィットスコアの利点の1つと言える．

本報告で議論した評価指標は，同じ予報期間に対して，複数の予報が発表された場合，どの予報が最も経済的な利益をもたらすかを比較するために用いられる．もし，比較する予報の「現象あり」の予報回数が同じであれば，どのような利用者を想定しても，経済価値の大小は一意的に決まる(Katz & Murphy (1997)では，十分性(sufficiency)を持つと表現されている)．しかし，「現象あり」の予報回数が異なる場合には，どのような利用者を想定するかによって，経済価値の大小が逆転する場合がある．したがって，経済価値に基づく評価指標を示す場合，どのような利用者を想定したものであるかを示すことは，本質的である．利用者が限定され，1回の当たりによる利益と外れによる損失が明確な場合には，経済的な利益の大きさに基づくスコアを算出することは容易である．しかし，本報告で想定しているようなある程度多様な利用者集団に対して適用する場合には，本報告で示したようなコスト・ロス分布についてのモデル化・単純化が必要であり，許容されるであろう．逆に，どのようなコスト・ロス比分布をもつ利用者集団を想定して予報を発表しているのかを明確にすることによって，予報者が想定しないようなコスト・ロス比を持った利用者が予報を利用することにより損失を蒙ることを防止できることも期待できる．その意味で，パラメータ a/b は，具体的な予報の種類毎に，「見逃し」と「空振り」に対するペナルティの比率が，経験と大きくかけ離れない程度の値になるように設定すれば良いと考える．

参考文献

Richard W. Katz and Allan H. Murphy (ed.), 1997：Economic Value of Weather and Climate Forecasts, Cambridge University Press, 222pp.

菊地原英和, 1988：気象予測の検証と評価, 気象研究ノート，(161)，191pp.

立平良三，1999：気象予報による意思決定―不確実情報の経済価値―，東京堂出版，142pp.

David Richardson, 1998：Obtaining economic value from the EPS, ECMWF Newsletter, **80**, 8-12.

Proposal of a Verification Score for Weather Forecasts Based on "Cost-Loss Model"

Shingo YAMADA

Forecast Division, Forecast Department, Japan Meteorological Agency 1-3-4, Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo, 100-8122, Japan (*Present affiliation*：*Numerical Prediction Division, Forecast Department*)

(Recieved 12 January 2001；Accepted 22 July 2001)