

# 大気イオン濃度による地震危険予報の精度評価

岡本 和人\*・古賀 裕\*\*・津谷 真由美\*\*・富士越 暁\*\*・弘原海 清\*\*

## Evaluation of Earthquake Hazard Forecast based on Densities of Atmospheric Ions

Kazuhito OKAMOTO\*, Hiroshi KOGA\*\*, Mayumi TSUTANI\*\*, Akira FUJIKOSHI\*\* and Kiyoshi WADATSUMI\*\*

\*岡山理科大学大学院総合情報研究科生物地球システム専攻 Biosphere-Geosphere System Science, Graduate School of Informatics, Okayama University of Science, 1-1 Ridai-cho, Okayama 700-0005, Japan. E-mail: k-okamoto@pisco.ous.ac.jp

\*\*岡山理科大学総合情報学部生物地球システム学科 Department of Biosphere-Geosphere System Science, Faculty of Informatics, Okayama University of Science, 1-1 Ridai-cho, Okayama 700-0005, Japan. E-mail: wadatumi@big.ous.ac.jp

キーワード：大気イオン濃度，予報，検証，分割表，見逃し

**Key words** : Atmospheric ions, Forecast, Verification, Contingency table, Miss

### 1. はじめに

H. Tributsch(1983)は大地震の直前に地下から大気イオン(帯電エアロゾル)が異常発生し、動物や自然に異変が生じることを指摘している。1995年兵庫県南部地震の際にも、本震8日前に神戸の大気イオン測定器が異常値を示したとの報告がある(薩谷, 1996)。これらの報告を受け、岡山理科大学のPISCOでは1998年度より4年にわたり、大気イオン濃度の24時間連続測定を続け、測定結果に基づく地震危険予報を毎日欠かさず発表してきた。2002年度、岡山測定点のみでの単点測定実験から複数測定点での多点測定実験へと移行するに当たり、これまでの単点測定での地震危険予報の精度を統計的に検証し、評価した。

### 2. PISCO 地震危険予報

#### 2.1 地震危険予報

PISCO 地震予報は過去の経験則による地震危険分類に基づいて発表されている。最初の危険分類は1998年4月に定められ、以後3回改訂された。現在の危険分類は2001年9月に定められたもので、危険度低・中・高の3段階である。詳細を以下に述べる。

グリーン(G, 危険度低) プラス大イオン濃度が3000(個/cc)を超えず、イオン濃度に異常がない状態。予報期間は1日。

イエロー(Y, 危険度中) プラス大イオン濃度が3000~5000(個/cc)まで上昇したとき発表。予報期間は1週間。

オレンジ(O, 危険度高) プラス大イオン濃度が5000(個/cc)を超えたとき発表。予報期間は2週間で、その後1週間イエローの予報を発表する。

#### 2.2 検証に用いた予報

2.1で述べたように危険分類は度々が改められ、その当時の危険分類に従って予報が発表されている。しかし、本研究の目的は現在用いられている基準がどの程度当たるかの検証であるから、過去に実際に出された予報は用いない。

現在の危険分類には予報の対象地震について明示されていないが、2001年7月、PISCO ホームページ上で「経験的に単一観測点より半径300km以内に起こったM4以上の地震に対して、大気イオン濃度が3000(個/cc)を超える前兆的異常がほぼ確認できた」との記述があり、PISCOはこれと前述の危険分類を組み合わせたものを基準の一つとして採用している(以後「基準A」と呼ぶ)。今回は、基準Aを過去のイオン濃度に適用した場合に出すであろう予報を用いた。

基準Aを過去のイオン濃度に適用すると、4年間で909回の予報を出したことになる。基準Aによる予報と対象地震の対応表の一部をTable 1に示す。

#### 2.3 2 カテゴリー予報

予報には量的予報、カテゴリー予報(2 カテゴリー、多カテゴリー)、確率予報があるが、PISCO 予報はイオン濃度によって危険度や予報期間が異なるものの、予報期間内に地震が起こるか否かの2値で表せるので、2 カテゴリー予報といえる。

カテゴリー予報は利用者の意思決定に反映しやすい予測であり、利用しやすい利点がある。

### 3. 予報精度の検証・評価方法

#### 3.1 検証と評価

検証と評価の区別は厳密には曖昧な部分があるが、ここでは、検証とは予測精度に関する各種の指数(検証指数)を算出し表示することとする。また、評価とは検証結果を検討することにより、予測技術の有用性を判定したり、予測技術の改善に反映させるための指摘または提言を行うこととする。

#### 3.2 予報の分割表

国内外を含め、地震予報を発表している個人や組織はほとんど皆無といえるので、その検証をしているところもほとんどない。そこで、日本で110年以上の歴史を持つ天気

予報の検証方法を参考にした。

2.3で述べたようにPISCO予報は2カテゴリー予報であるから、Table 2のような分割表を作成して検証を行う。

Table 2. 2x2 contingency table for earthquake forecasts.

		Observation		
		No	Yes	Total
Forecast	No	a	b	a+b
	Yes	c	d	c+d
	Total	a+c	b+d	a+b+c+d

- a : Null (correctly forecast non-events)
- b : Miss (incorrectly forecast events)
- c : False alarm (incorrectly forecast non-events)
- d : Hit (correctly forecast events)

### 3.3 検証指数

予報を検証するための指数としてもっともポピュラーなものは適中率(Table 2の $(a+d)/(a+b+c+d)$ )である。しかし、基準 A が対象としている「岡山からの震災距離が 300km 以内で、かつ M4.0 以上の地震」は頻繁に起こるわけではなく、毎日「M4.0 以上の地震ナシ」という予報を発表し続けたとしても、適中率は 90%を超える。また、同じ「適中」であっても、「ナシと予報し、実況でもナシ」(a)は「アリと予報し、実況でもアリ」(d)に比べてはるかに情報価値がない。情報価値がないのに例数が多いために過大に評価していることになる。結局、予報の尺度として適中率のみ

を考えることは適当でない。

そこで、このような発生頻度の小さい現象に対して、より適切な検証指数としてスレット・スコア(Threat Score、欧米では CSI : Critical Success Index と呼ぶことが多い)が提案されており、 $d/(b+c+d)$ で定義される。この指数は、発現の予測がすべて不適中のとき 0、完全予測で 1 となる。スレット・スコアでは a は情報価値のないものとして無視され、予測全体の成績を示すものではないが、適中率よりは予報技術の程度がわかりやすい指数である。

とはいえ、予報を検証するのに、適中率とスレット・スコアだけでは不十分である。予報の「ハズレ」である見逃し(b)と空振り(c)のバランスを見る必要がある。地震の場合、「空振り」では不必要な対策を迫られることになるが被害は発生しない。一方、「見逃し」、つまり予測されることなく突然地震が発生したとき、地震の規模によっては人命にかかわる被害が生じるかもしれない。つまり、「見逃し」の方が「空振り」に比べて大きな損失をもたらすことになり、「見逃し」を極力抑えなければならないことは明らかである。

結局のところ、2 カテゴリーの場合は、いずれの指数を示しても不十分であり、分割表そのものを示すことが予報の精度表示としてもっとも適当である。そして、その分割表から必要な指数を計算すればよい。Table 3 に代表的な指数を示す。

Table 1. Part of the correspondence table of earthquake forecast and result

	予報期間		予報	根拠	M4 以上地震	結果
1	1998/03/01 12:00	1998/03/02 12:00	G			a
2	1998/03/02 12:00	1998/03/03 12:00	G			a
3	1998/03/03 12:00	1998/03/04 12:00	G			a
4	1998/03/04 12:00	1998/03/05 12:00	G			a
5	1998/03/05 12:00	1998/03/09 12:00	Y	1998/03/04 22:00 4263		c
6	1998/03/09 12:00	1998/03/14 12:00	O	1998/03/08 17:00 7039		c
7	1998/03/14 12:00	1998/03/28 12:00	O	1998/03/14 02:30 6410		c
8	1998/03/28 12:00	1998/03/29 12:00	Y	切り下げ		c
9	1998/03/29 12:00	1998/04/05 12:00	O	1998/03/28 16:30 9610		c
10	1998/04/05 12:00	1998/04/18 12:00	O	1998/04/04 14:30 7334		c
				1998/04/04 15:00 10368		
				1998/04/04 15:30 11306		
				1998/04/04 16:30 5671		
				1998/04/04 17:30 5960		
				1998/04/04 18:00 5896		
				1998/04/11 17:00 3842		
				1998/04/14 08:30 3978		
11	1998/04/18 12:00	1998/04/22 12:00	Y	切り下げ		c
12	1998/04/22 12:00	1998/04/29 12:00	Y	1998/04/22 07:30 3876	1, 2	d
13	1998/04/29 12:00	1998/04/30 12:00	G			a

Table 3. Verification statistics.

Statistics	Definition	Description
PC	$(a+d)/(a+b+c+d)$	Percentage Correct
CSI, TS	$d/(b+c+d)$	Critical Success Index, Threat Score
PODy	$d/(b+d)$	Probability of Detection of "Yes" observations, Hit Rate
FAR	$c/(c+d)$	False Alarm Ratio, False Alarm Rate
DFR	$b/(a+b)$	Detection Failure Ratio
HSS	$2(ad-bc)/(b^2+c^2+2ad+(b+c)(a+d))$	Heidke Skill Score
FBI	$(c+d)/(b+d)$	Bias, Frequency Bias

### 3.4 評価の方法

天気予報であれば年々新しい技術が導入され、その技術を導入する前と導入した後の検証指数を比較することで検討することができる。

PISCO 地震予報の場合は年々明らかになる研究成果を反映させることで予報技術が向上する。しかし、対象地震の震央距離や規模については「経験則に基づく」と記されているだけで、議論されることはあまりなかった。そこで、今回は基準の一つとなっている「震央距離 300km, M4.0 以上」が適切な数値であるかを検討することとした。

その方法として、震央距離が 100km, 150km, 200km, 250km, 300km, 350km, 400km の 7 段階 (Fig. 1), M が 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 の 6 段階をそれぞれ組み合わせ条件としたとき、分割表や検証指数がどのような値になるかを求めた。そこから得られた複数の検証指数を勘案することにより、基準 A よりもよい基準がないか検討した。

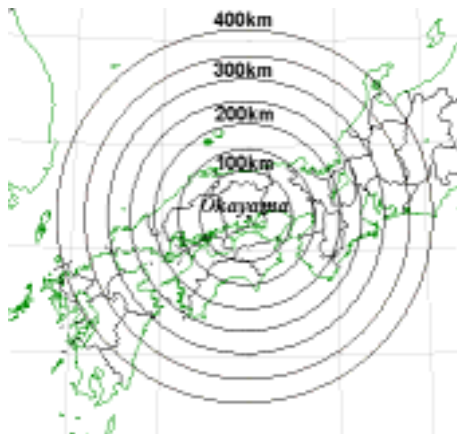


Fig.1. Epicentral distance from Okayama City.

## 4. 結果

### 4.1 検証結果

基準 A における PISCO 地震予報の検証結果を Table 4 に示す。

Table 4. Earthquake hazard forecast by PISCO verification matrix and verification statistics in standard A.

		Observation		
		No	Yes	Total
Forecast	No	a : Null 736 80.97%	b : Miss 72 7.92%	808
	Yes	c : FA 58 6.38%	d : Hit 43 4.73%	
	Total	794	115	909
PC		85.70%	FAR	0.5743
CSI		0.2486	DFR	0.0953
PODy		0.3739	HSS	0.2950

### 4.2 評価結果

7 段階の震央距離, 6 段階のマグニチュードをそれぞれ組み合わせた条件下での分割表および検証指数を Table 5 に示す。

まず、マグニチュードについて見ると、概ね M が大きいほど適中率が高い。しかし、M が大きく (M4.5 以上) になると、対象となる地震数が少なくなるため、同じ適中率でも a の割合が非常に大きくなり、逆に d はほとんどない。したがって、a の影響を無視する CSI はかなり低くなる。また、M

が小さく (M3.5 以下) になると適中率は低くなる。CSI は M が大きいときに比べると良い値となっているが、地震の数が多くなる分、見逃し (b) が多くなる。以上のことから、マグニチュードの面から見れば、「M4.0 以上の地震」を対象とするのがもっとも適切であると考えられる。

次に、「M4.0 以上」に対して、どの震央距離を組み合わせるのが適当であるかを考える。

- 100km M が大きいときと同様、地震数が少なく、CSI が低くなる。
- 150km FAR(「地震アリ」予報に対して地震が起こらなかった割合) が 7 割を超えることで、予報に対する信憑性が疑われる。
- 200km 概ね 150km と大差はないが、見逃し (b) がやや高く、CSI がやや低い。
- 250km 現行の 300km に比べて、見逃し (b) が 1.43 ポイント低く、空振り (c) が 0.44 ポイント高くなっている。空振りが微増しているが、見逃しを減らすほうに重点を置くとするならば、さほど問題にならない。また、POD, FAR, HSS が 300km に比べて高い。見逃しが空振りよりも低いことも加えて考慮しなければならない。
- 300km この表の中では比較的安定した値を示している。ただ、空振りに比べて見逃しがやや高い。
- 350km 300km に比べて、すべての指数で悪い値を示している (DFR は「地震ナシ」予報を出したときの見逃しの割合なので、数値が高い方が精度は悪い)。
- 400km この表の中で CSI がもっとも良い値を示しているが、見逃しが空振りの倍以上あることは看過できない。

以上のことから、現行の 300km もしくは 250km に狭めることが適当であると考えられる。また、見逃しと空振りの割合を考慮するならば、250km の方がより適当であると思われる。

## 5. まとめ

本研究の範囲では、対象地震の基準を「岡山からの震央距離が 250km 以内で、かつ M4.0 以上の地震」とすることがもっとも適当であるといえる。

しかしながら、今回は地震予知の三要素である時間・場所・規模のうち、場所と規模については検討したものの、時間については一切触れていない。すなわち、イエローやオレンジの予報期間がそれぞれ 1 週間、2 週間が適当なのか、またイエローやオレンジの予報を解除した直後に起こった地震をどう評価するかなど、課題は山積している。

また、現在、本研究室が進めている大気イオンの成分分析を行うことによって、大気イオン濃度の上昇が地震性のものか非地震性のものかを区別することができれば、予報精度は飛躍的に良くなるであろう。

## 文献

- C. Wilson(2001)Review of current methods and tools for verification of numerical forecasts of precipitation. COST 717 document archive ; <http://www.smhi.se/cost717> .
- H. Tributsch(1983)動物は地震を予知する, 朝日選書 .231p.
- 平沢正信(1997)天気予測の統計的検証と評価, 気象業務支援センター . 12p.
- 薩谷泰資(1996)環境空間における大気イオン分布密度の計測 .テレビジョン学会技術報告 ,vol.20 ,No50 ,pp.31-36.
- 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 . pp.5-13.
- e-PISCO ホームページ ; <http://www.pisco.ous.ac.jp/>.

Table 5. Earthquake Hazard Forecast by PISCO Verification Matrix

Epicentral Distance Magnitude	100km		150km		200km		250km		300km		350km		400km	
	<b>M5.5</b>	88.67%	0.22%	88.67%	0.22%	88.67%	0.44%	88.45%	0.44%	88.24%	0.66%	88.12%	0.66%	88.01%
11.11%		0.00%	11.00%	0.11%	10.67%	0.22%	10.78%	0.33%	10.77%	0.33%	11.00%	0.22%	10.89%	0.33%
88.67%		0.0000	88.78%	0.0097	88.89%	0.0194	88.78%	0.0286	88.57%	0.0280	88.34%	0.0185	88.34%	0.0275
0.0000		1.0000	0.3333	0.9901	0.3333	0.9798	0.4286	0.9703	0.3333	0.9703	0.2500	0.9804	0.3000	0.9706
<b>M5.0</b>	88.67%	0.33%	88.67%	0.22%	88.45%	0.66%	88.34%	0.55%	88.02%	0.77%	88.01%	0.99%	87.79%	0.99%
	10.89%	0.11%	10.89%	0.22%	10.56%	0.33%	10.34%	0.77%	10.55%	0.66%	10.12%	0.88%	10.12%	1.10%
	88.78%	0.0097	88.89%	0.0194	88.78%	0.0286	89.11%	0.0660	88.68%	0.0550	88.89%	0.0734	88.89%	0.0901
	0.2500	0.9900	0.5000	0.9802	0.3333	0.9697	0.5833	0.9307	0.4615	0.9412	0.4706	0.920	0.5263	0.9020
<b>M4.5</b>	88.34%	0.55%	88.12%	0.77%	87.68%	1.21%	87.57%	1.32%	86.81%	2.09%	85.92%	3.19%	85.81%	3.08%
	10.89%	0.22%	10.89%	0.22%	10.34%	0.77%	10.01%	1.10%	9.45%	1.65%	9.46%	1.43%	8.58%	2.53%
	88.56%	0.0189	88.34%	0.0185	88.45%	0.0625	88.67%	0.0885	88.46%	0.1250	87.35%	0.1016	88.34%	0.1783
	0.2857	0.9802	0.2222	0.9802	0.3800	0.9307	0.4545	0.9010	0.4412	0.8515	0.3095	0.8687	0.4510	0.7723
<b>M4.0</b>	87.65%	1.21%	84.05%	4.84%	83.72%	5.17%	82.51%	6.49%	80.97%	7.92%	79.21%	9.79%	77.89%	11.00%
	10.47%	0.66%	8.03%	3.08%	8.03%	3.08%	6.82%	4.18%	6.38%	4.73%	6.16%	4.84%	5.28%	5.83%
	88.31%	0.0536	87.13%	0.1931	86.80%	0.1892	86.69%	0.2390	85.70%	0.2486	84.05%	0.2328	83.72%	0.2637
	0.3529	0.9406	0.3888	0.7228	0.3733	0.7228	0.3918	0.6200	0.3739	0.5743	0.3308	0.5600	0.3464	0.4752
<b>M3.5</b>	83.17%	5.94%	78.44%	10.56%	72.06%	16.83%	68.43%	20.46%	64.25%	24.53%	61.28%	27.61%	56.77%	32.12%
	9.02%	1.87%	7.37%	3.63%	5.72%	5.39%	4.18%	6.93%	3.96%	7.26%	3.41%	7.70%	2.42%	8.69%
	85.04%	0.1111	82.07%	0.1684	77.45%	0.1929	75.36%	0.2195	71.51%	0.2031	68.98%	0.1989	65.46%	0.2010
	0.2394	0.8283	0.2558	0.6700	0.2426	0.5149	0.2530	0.3762	0.2284	0.3529	0.2181	0.3069	0.2129	0.2178
<b>M3.0</b>	74.15%	14.63%	69.09%	19.80%	56.99%	31.90%	43.34%	45.54%	37.51%	51.27%	33.26%	55.14%	25.85%	62.93%
	6.71%	4.51%	4.40%	6.71%	2.53%	8.58%	1.65%	9.46%	0.77%	10.45%	0.44%	10.61%	0.11%	11.11%
	78.66%	0.1745	75.80%	0.2171	65.57%	0.1995	52.81%	0.1670	47.96%	0.1673	44.11%	0.1603	36.96%	0.1499
	0.2356	0.5980	0.2531	0.3960	0.2120	0.2277	0.1720	0.1485	0.1693	0.0686	0.1614	0.0396	0.1501	0.0098
	0.1640	0.1813	0.2228	0.2373	0.3589	0.1917	0.5124	0.1243	0.5774	0.1193	0.6238	0.1063	0.7088	0.0817

a	b
c	d
PC	CSI
PODy	FAR
DFR	HSS