

地学教育

第58巻 第1号(通巻 第294号)

2005年1月

目 次

教育実践論文

レプリカゲーティングを用いた「恒星の色と温度」の授業実践
.....五島正光・土橋一仁...(1~12)

〈特集〉地学現象の確率モデルと確率予測

地震活動の確率予測

—最近の余震活動予測とその課題—.....山科健一郎...(13~22)

天気予報の確率表現.....立平良三...(23~30)

地質現象に見られる確率過程とシミュレーション.....青野宏美...(31~35)

学会記事(36)

日本地学教育学会

263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33 千葉大学教育学部理科教育教室内

レプリカグレーティングを用いた 「恒星の色と温度」の授業実践

Teaching of the Color-Temperature Relationship of Fixed Stars Using Replica Grating

五島正光*1・土橋一仁*2

Masamitsu GOSHIMA and Kazuhito DOBASHI

Abstract: We report results of an experimental lesson to teach effectively the relationship between the color and temperature of fixed stars, given to 68 tenth-grade students in Japan. Students were instructed to use a replica grating to observe the spectra of electric bulbs powered at different voltages, and were given leading questions to help them understand how the spectra change according to the voltage (i.e., the temperature of filaments of the bulbs). The lesson revealed that about half of the students misunderstood the black body radiation in two specific aspects. First, they often confuse the change of color and that of brightness. Second, they tend to misunderstand the Planck distribution, as if the red side of the spectrum becomes weaker at higher temperature. To prevent these typical misunderstandings, we suggest that the color-temperature and temperature-brightness relationships should be taught at the same time, and that students are shown typical incorrect images of the Planck distribution.

Key words: high school, fixed star, spectrometer, spectrum, black body radiation, replica grating

1. はじめに

現行の学習指導要領において、恒星の色と表面温度の関係についての学習は高校地学Iと地学IIに位置づけられている(文部省, 1999)。地学Iの教科書は五つの教科書会社より5種類出版されている。それらの会社と種類数は旧指導要領での地学IBと同じである。地学Iの教科書は、地学IBに比べて多くの色を用いて印刷されている。以前はモノクロで印刷されていたスペクトルの写真やイラストも、カラーで掲載されている。同じ素材であっても、特に恒星の色の学習に際しては、色の表現が豊かになった分、生徒たちの理解を助けるために大いに役立つ。

また、スペクトルを観察させる課題の掲載も増えた。地学IBの教科書では5社5種類のうち、2種類に、直視分光器を用いた探究活動が掲載されていた。それに対して、地学Iの教科書では5社5種類のうち、2種類に直視分光器を用いた観察が、別の2種類にCDと牛乳パックを用いた簡易分光器の製作と観察が掲載されている。

しかしながら、それらの観察や探究活動においては、生徒に観察させるスペクトルと、その後で提示される天体のスペクトル画像に大きな違いがある。生徒に身近な光のスペクトルを観察させる際には、(携帯式的)直視分光器やCDを利用した簡易分光器を利用するのが一般的であるが、それに続いて提示される天

*1 巣鴨中学・高等学校, 東京学芸大学大学院連合学校教育学研究所自然系教育講座

*2 東京学芸大学教育学部地学科 2004年2月27日受付 2004年9月25日受理

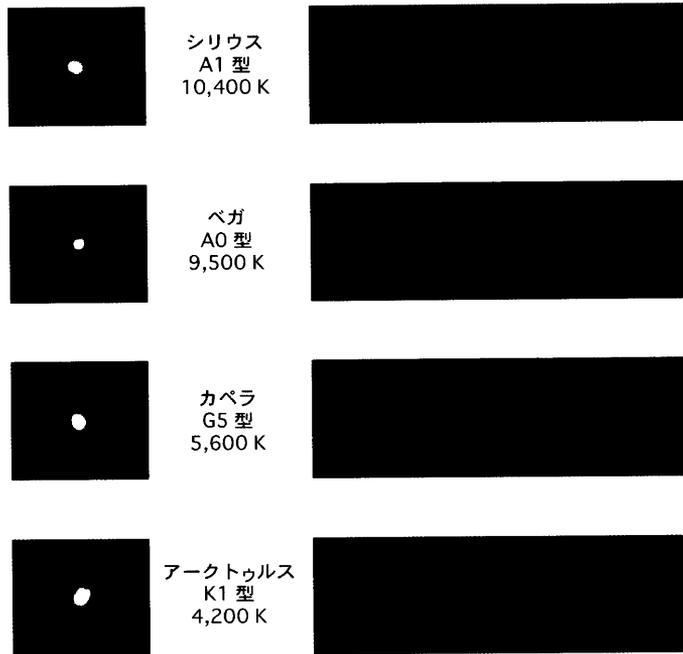


図1 この試行授業で用いたものと同じレプリカグレーティングで撮影した恒星（左側）とそのスペクトル（右側）の写真（土橋ほか，2004）
 スペクトルの写真は波長が概ね一致するように並べてあるが，色と温度の関係の定性的な理解のみに使用するため，正確な波長較正までは行っていない。撮影条件等の詳細については，土橋ほか(2004)を参照のこと。

体のスペクトル画像は，大型の望遠鏡に取り付けられた専用の分光器によるものである場合が多い。

筆者らは，白熱電球や蛍光灯などの身近な光源のスペクトルから天体のスペクトルまでを，生徒たちに同じ分光器で観察させることができないだろうかと考えた。しかし，肉眼でスペクトルを観察するためには一等星でも暗すぎる。そこで，レプリカグレーティングとデジタルカメラを組み合わせれば，明るい恒星のスペクトルを撮像できると考え，「デジタル分光カメラ」（土橋ほか，2004）を開発した。これを用いれば，身近な光のスペクトルから，恒星のスペクトルまでを同じレプリカグレーティングで観察できる。

筆者らは高校1年生68名を対象に，レプリカグレーティングによる恒星のスペクトル写真（図1）を教材とした授業を，通常の地学Iの授業を利用して試行した。身近な光源（豆電球と白熱電球）の有効温度を変え，そのスペクトルの違いを観察させた後に，同じレプリカグレーティングによる恒星の分光写真を提示した。その結果，黒体放射の理論に深く立ち入ることなく，恒星の色と表面温度の関係を体験として容易

に理解させることが可能であることがわかった。

また，この試行授業では問題点が二つ見つかった。一つは観察したスペクトルの様子を記述させた際に，「色は温度により変化する」と答えさせたい場面で，「色は明るさにより変化する」と答えた生徒が68名中27名（約40%）もいたことである。その原因は，試行授業においては温度と色の関係のみを扱い，温度と明るさの関係についての配慮が不十分であったためと考えられる。

もう一つは，「温度が高くなるとスペクトルの赤い部分が少なくなる」と誤解をしていた生徒が68名中32名（約47%）もいたことである。その原因は，彼らが「青い星は温度の高い星，赤い星は温度の低い星」という説明をすでにどこかで聞いており，スペクトルの最大強度の部分に関する法則（ウィーンの変位則）のみに注目し，プランク分布全体の温度依存性を誤解していたためと考えられる。

以上の二つの問題点について，本論文では実践内容を紹介した後に，恒星の色・温度・明るさの三つを同時に扱う指導法と，プランク分布に関する典型的な

表1 教具・教材

展開 (注1)	品目	数量	備考
1~3	レプリカグレーティングシート (格子定数 530本/mm)	1枚/人	(注2)
2	豆電球 豆電球用ソケット (リード線つき) 乾電池 1.5 V 乾電池ボックス (1本用) 同 (2本用)	3個/班 3個/班 3個/班 1個/班 1個/班	図2 単三を用いた
3	白熱電球 白熱電球用調光器 電球型蛍光灯 (昼光色) 同 (電球色)	1個 1個 1個 1個	60 W 図3, (注3) 60 W相当 (注4) 同上
4	恒星のスペクトル写真	1組/班	図1

注1 展開1~4は、表2に示した展開に対応する。

注2 大きさを24mm×36mmにし、スライド用マウントに挟んで使用した。

注3 電球用ソケットとコンセントの間に入れ、印加電圧を0~100Vまで、連続的に調整するもの。今回は家庭用のものを用いたが、スライダックでもよい。

注4 消費電力13Wで、60Wの白熱電球に相当する明るさのもの。

「誤った認識」を例示することにより、よくある誤解を未然に防止する指導法を示す。本論文で紹介する実践と二つの指導法により、体験を通して黒体放射の理論の本質をより深く理解させることが可能になると期待される。

2. 実践の概要

筆者のひとり五島が勤務する高校の1年生2クラス(男子68名)を対象として、2003年7月に試行授業を行った。内容を1時限(50分)で終わるものとして、同じ授業を各クラスに1回ずつ行った。

両クラスとも毎週1時限ずつ、年度始めの4月より、地学Iの天文分野を指導してきた。教科書に記載された順序に従い、太陽系の学習を終えた後に、恒星に関する内容を取り上げた。年周視差、見かけの等級、絶対等級についての指導を終え、恒星の色について指導する際に、今回の試行授業を行った。用いた教具を表1に示す。

3. 実践内容

授業の内容は、温度の違いによりスペクトルの様子が異なることを豆電球と白熱電球について観察させた後に、レプリカグレーティングによる恒星のスペクトル写真を提示するというものであった(表2)。

一人一人の生徒の反応を知るために3種類の質問

紙を作成した。授業の始めに事前アンケート(表3)を実施し、授業中にレプリカグレーティングを用いて観察したことをワークシート(表4)に記述させ、授業直後に事後アンケート(表5)を実施した。

授業の手順について述べる。

3.1 導入(5分)

まず、生徒を5,6名ずつ、六つのグループに分けた上で、恒星の色についての授業前の知識を確かめるために事前アンケート(表3)を実施した。

本時の学習課題を「この時間は、星の色がどうして違うのかについて考えます」と提示し、ワークシート(表4)を配布した。

3.2 展開1(5分)

1) レプリカグレーティングをはめたスライドマウントを1名に1枚ずつ配った。

2) レプリカグレーティングで、自然光(空や窓外の景色)、蛍光灯(教室の天井のもの)、電球型蛍光灯(昼光色、電灯色)、白熱電球を観察させ、スペクトルの見え方をたずねた。

3) 留意点

この指導のねらいは、レプリカグレーティングで分光できることを確かめさせることである。

なお、自然光の観察の際には教室の照明を消し、天井の蛍光灯の場合には暗幕を閉めた。電球型蛍光灯と白熱電球の場合には暗幕を閉め、教室の照明を消し、

表2 授業内容

	教師の言動
導入 (5分)	1. 事前アンケート(表3)を実施した。 2. 学習課題を提示し、ワークシート(表4)を配布した
展開1 (5分)	1. レプリカグレーティングを配布した。 2. 自然光や蛍光灯(昼光色、電灯色)などのスペクトルを観察させた。
展開2 (10分)	1. 豆電球と乾電池を次のようにつないだものを、各班に一組ずつ配った。 A 直列に接続した2個の豆電球を、1個の乾電池につなぐ。(0.75V) B 豆電球1個を、直列に接続した乾電池2個につなぐ。(3V) 2. 点灯させた双方の豆電球に触らせ、温かさの違いを確認させた。 3. 双方のスペクトルを観察させ、違いをたずねた。
展開3 (15分)	1. 白熱電球を生徒に提示し、点灯した。 2. 白熱電球にかかる電圧(温度)を変え、スペクトルの変化を観察させた。
展開4 (10分)	1. レプリカグレーティングによる恒星の分光写真を配布した。 2. 展開2、展開3との類似点をたずねた。 3. 星の色と温度の関係をたずねた。
まとめ (5分)	1. 学習課題「星の色は温度で決まる」を学べたかどうか、問いかけた。 2. 事後アンケート(表5)を実施した。

表3 事前アンケートの質問項目と生徒の回答

表3-1 事前アンケートの質問項目

Q. 星の色は何で決まるとお思いますか。君の考えを自由に書きなさい。

表3-2 事前アンケートに対する生徒の記述

温度	組成	距離	大きさ	年齢	明るさ	寿命
40名	16名	11名	9名	7名	6名	5名

複数回答。全体で68名。他の要素として、形(2名)、大気(2名)、動き、視線速度、性質、超新星、場所がみられた。

表3-3 温度をあげた生徒が他にあげた要素

温度のみ	組成	距離	大きさ	年齢	明るさ	寿命
16名	7名	5名	9名	3名	2名	2名

複数回答。全体で40名。他の要素として、形、大気、動き、視線速度、性質がみられた。また、温度のみをあげた上で「距離や大きさは関係ない」と記述した者が1名いた。

いずれの場合にも光源は観察対象のもののみとなるようにした。

3.3 展開2(10分)

1) 豆電球と乾電池を次のA、Bのようにつないだものを、各グループにそれぞれ一組ずつ配った(図2)。

A 直列に接続した2個の豆電球を、1個の乾電池につないだもの。1個の豆電球の印加電圧は0.75Vになる。片方の豆電球を箱で覆い、1個の豆電球だけのスペクトルを見るようにした。

B 豆電球1個を、直列に接続した乾電池2個につないだもの。豆電球の印加電圧は3Vになる。

2) 点灯させた豆電球の表面に触らせ、Aに比べBの方が温かいことを確かめさせた。

3) 暗幕を閉め、教室の照明を消し、豆電球の光をよく観察できるようにした。A、B双方のスペクトルを観察させ、「温かいBのスペクトルは、Aと比べると、どのように違うかな」とたずねた。さらに「スペクトルの赤い部分はどのように違うかな」、「スペクトルの青い部分はどのように違うかな」と、スペクトル

表4 ワークシートの質問項目と生徒の回答

表4-1 ワークシートの質問項目

- Q1. 外の景色（太陽光）・蛍光灯・白熱電球のスペクトルはどう違うか述べなさい。
- Q2. A（乾電池1個，豆電球2個）と，B（乾電池2個，豆電球1個）で，1個の豆電球にかかっている電圧を答えなさい。
- Q3. A（乾電池1個，豆電球2個）と，B（乾電池2個，豆電球1個）では，豆電球の温度が高いのはどちらか答えなさい。
- Q4. A（乾電池1個，豆電球2個）と比べると，B（乾電池2個，豆電球1個）のスペクトルはどのように違うか書きなさい。
- Q5. 白熱電球の電圧を上げると，電球の温度はどう変わりますか。(1)～(4)から一つ選びなさい。
① 高くなる ② 低くなる ③ 変わらない ④ わからない
- Q6. 白熱電球の温度を高くすると，電球のスペクトルはどう変わるか書きなさい。
- Q7. プリントの四つの恒星について，温度が高くなるとスペクトルはどう変わるか書きなさい。
- Q8. 今回の授業に基づいて，恒星の色は何により決まるか書きなさい。
- Q9. 今回の授業の意義について述べなさい。

表4-2 ワークシートのQ4, Q6, Q7に対する生徒の記述

		全体が長くなる	青が長くなる	赤が長くなる	青が長くなり，赤が短くなる	その他
Q4	豆電球	20	19	1	21	7(2)
Q6	白熱電球	19	23	1	25	0(0)
Q7	恒星	12	38	0	7	11(9)

数字は人数。全体で68名。自由記述での回答を重複のないように分類した。網掛けを施した「赤が短くなる」は間違った記述であり，延べ53名(実人数で32名)にみられた。なお，「全体が明るくなる」という記述が，Q4で7名，Q6で2名，Q7で16名にみられた。その他のカッコ内の人数は「全体が明るくなる」のみを記述した人数である。

表4-3 ワークシートのQ8に対する生徒の記述

温度の記述あり (57名)			温度の記述なし (11名)		
温度のみ	明るさ	スペクトル	スペクトル	光の強弱	他
51名	4名	2名	5名	2名	4名

全体で68名。他の4名の記述は，エネルギー，電圧，わからない，無回答であった。

の違いを細かく観察するように指示した。なお，観察したスペクトルの様子を，ワークシートのQ4（表4-1）に記述するように指示した。

4) 留意点

この指導のねらいは，B（3V）の方がA（0.75V）に比べ，温度が高いことを確認した上で，そのスペクトルの違いを認識させることである。観察するのはフィラメントから発せられる光のスペクトルであり，スペクトルの違いはフィラメントの温度の違いによるものである。しかし，発光しているフィラメントそのものに触ることはできない。ここでは定性的な扱いで十分であるので，フィラメントの代わりに豆電球の表面（ガラス）に触ったときの感覚でどちらがより高温かを判別させることにした。

研究の目的は，生徒たちが温度によるスペクトルの

違いを，この指導法でどのように認識するのかについて明らかにすることである。

3.4 展開3（15分）

1) 教師が1個の白熱電球（図3）を点灯し，生徒全員に見やすいように高くかざした。暗幕は閉めたまま，教室の照明は消し，白熱電球の光をよく観察できるよう配慮した。

2) 生徒全員に白熱電球に注目するよう指示した。

3) 調光器で白熱電球にかかる電圧を上げ，「電球の温度はどう変わりますか」とたずねた。

4) 繰り返し電圧を変化させ，そのときのスペクトルの変化を観察させた。生徒の様子を注意深く見守りながら，スペクトルの変化が見やすいように，電圧を変化させる度合いを加減した。

また，電圧を上げる際には，「いまは電圧を上げてい

表5 事後アンケートの質問項目と生徒の回答

表5-1 事後アンケートの質問項目

- Q1. 豆電球の電圧の違いによるスペクトルの違いは見やすかったですか。
 Q2. 白熱電球の電圧の変化によるスペクトルの変化は見やすかったですか。
 Q3. 恒星のスペクトルの写真は見やすかったですか。
 Q4. このような授業では、豆電球と白熱電球のどちらがよいと思いますか。
 Q5. 他の星の色や、宇宙のことをもっと知りたくなりましたか。

Q1, Q2, Q3 については下の表5-2 に示した5段階で、Q4 については二者択一で、Q5 については下の表5-3 に示した5段階で、それぞれ答えさせた。

表5-2 事後アンケートのQ1, Q2, Q3 に対する生徒の回答

		見やすい	少し見やすい	どちらでもない	少し見づらい	見づらい
Q1	豆電球	9名 (13)	32名 (48)	7名 (10)	15名 (22)	5名 (7)
Q2	白熱電球	33名 (49)	18名 (26)	11名 (16)	4名 (6)	2名 (3)
Q3	恒星	26名 (38)	21名 (31)	9名 (13)	8名 (12)	4名 (6)

カッコ内の数字はパーセント、全体で68名。

表5-3 事後アンケートのQ5 に対する生徒の回答

知りたい	少し知りたい	どちらでもない	あまり思わない	思わない
20名 (29)	32名 (47)	9名 (13)	2名 (3)	4名 (6)

カッコ内の数字はパーセント、全体で68名。

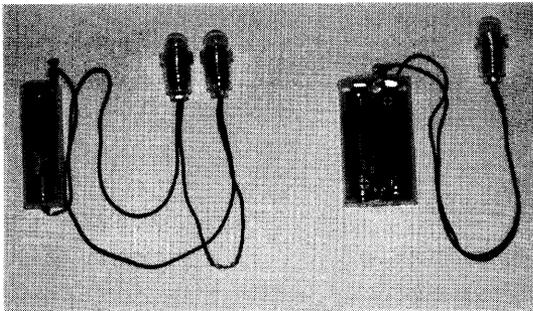


図2 豆電球 A (左) と豆電球 B (右)

左の A を観察させるときには、片方の豆電球を箱で覆い、1 個の豆電球のみの光を観察させた。



図3 白熱電球と白熱電球用調光器

ます。電球の温度は高くなっていきます。スペクトルはどのように変わっていきますか。」とたずねた。電圧を下げる際には、「いまは電圧を下げています。電球の温度は低くなっていきます。スペクトルはどのように変わっていきますか。」とたずねた。

5) さらに電圧を繰り返し変化させながら、「スペクトルの赤い部分はどのように変わっていきますか」、「スペクトルの青い部分はどのように変わっていきま

すか」と、スペクトルの変化の様子を細かく観察するように指示した。観察したスペクトルの様子をワークシートの Q6 に記述するように指示した。

6) 留意点

この指導のねらいは、展開2と同様に、温度の違いによるスペクトルの違いを認識させることである。

観察中に生徒たちはスペクトル全体の明るさの変化にはすぐに気がつくものの、スペクトル中の両端(青、

赤)の細かい部分には、なかなか注意がいかないようであった。そこで観察が深まるよう適宜指示を与えた。

研究の目的は、豆電球と同様に、白熱電球を用いた場合の温度の変化によるスペクトルの変化を、生徒たちがどのように認識するのかを明らかにすることである。

3.5 展開4 (10分)

1) レプリカグレーティングとデジタルカメラによる恒星のスペクトル写真(図1)を各班に1枚ずつ配った。「これは、君たちが豆電球や白熱電球のスペクトルを見る際に使ったものと同じレプリカグレーティングを、デジタルカメラの前において、恒星のスペクトルを撮影したものです。」と説明した後に、「四つの恒星のスペクトルをよく見て下さい。恒星のスペクトルと温度には、どのような関係があると思いますか」とたずね、ワークシートのQ7に記述するように指示した。

2) 今回の授業でみた豆電球、白熱電球、恒星のスペクトルに基づいて、ワークシートのQ8「恒星の色は何により決まるか」に答えるように指示した。

3) 留意点

この指導のねらいは、まさに授業全体のねらいであり、恒星の色は温度によって決まることを、豆電球や白熱電球での観察で得た経験から類推させることである。

研究の目的は、有効温度の違う身近な光のスペクトルを観察させた上で、同じレプリカグレーティングによる恒星の分光写真を提示する、というこの指導法が、有効かどうかを確かめることである。

3.6 まとめ (5分)

1) ワークシートと使用した用具を回収した。「恒星の色が温度で決まること」を学んだかどうかたずねた。

2) 事後アンケート(表5)を実施し、この指導法で生徒に観察させた、電圧の違いによる豆電球のスペクトルの違い、電圧の変化による白熱電球のスペクトルの変化、そして温度の違いによる恒星のスペクトルの違いについて、それぞれが生徒にとって見やすいものだったかどうかをたずねた。

4. 結 果

今回の授業の直前、授業中、直後に、生徒たちに合計3種類の質問紙に答えさせた。結果を順に述べる。

4.1 事前アンケート

開始直後に行った事前アンケートの質問項目(表3-1)に対する回答を七つに分類した(表3-2)。期待していた回答「温度」をあげたのは40名(約59%)であった。「組成」をあげた16名は、本実践に先行した授業での太陽光のブラウンホーファー線を念頭においたものと考えられる。「距離」をあげた11名と「明るさ」をあげた6名は、本実践の直前の学習内容である絶対等級が念頭にあったものと考えられる。「大きさ」をあげた9名、「年齢」をあげた7名、「寿命」をあげた5名は、教科書の先のページをすでに読んでいた可能性を指摘できる。

「温度」をあげた40名のなかで、「温度」のみをあげたのは16名(約24%)で、残りの24名は「温度」に加えて「組成」、「距離」、「大きさ」、「明るさ」などをあげた(表3-3)。

4.2 ワークシート

授業中に書かせたワークシートには質問項目を九つ設定した(表4-1)。

今回の授業のねらいであるQ8に対して、「温度」を記述したのは57名(約84%)であった(表4-3)。温度以外の要素として、4名が明るさを、2名がスペクトルの違いを併記した。「温度」を記述しなかった11名のうち、5名はスペクトルを、2名は光の強弱をあげた。特に光の強弱(明るさ)をあげた2名は事前アンケートに対し温度をあげていた。つまり、実践前には「温度」と答えていたのに、実践後には「明るさ」になってしまっていたのである。この「明るさ」の問題点については5章で考察する。

また、授業中に観察したスペクトルが温度により違う様子を、ワークシートのQ4、Q6、Q7で記述させた。期待される記述は、例えば、「温度が高いほど全体が長くなる」や「温度が高いほど、青が伸びるし、赤も少し伸びる」である。また、青い部分のみに着目して「温度が高いほど青い部分が伸びる」や、赤い部分のみに着目して「温度が高いほど赤が伸びたように見える」という記述もみられた。三つの質問項目について、いずれも期待した記述が半数を超えた(表4-2)。

意外なことに「温度が高いとスペクトルの赤い方が短くなる」という誤った記述が、Q4の豆電球で21名、Q6の白熱電球で25名、Q7の恒星で7名にみられた。豆電球と白熱電球では「全体が長くなる(青が長くなり赤が長くなる)」と記述した者よりも多かった(表4-2)。豆電球、白熱電球、恒星のいずれの場合

でも、「(温度が高いほど)赤が短くなる」と回答した者は一人残らず「青が長くなる」を併記していた。これはウィーンの変位則については理解しているものの、プランク分布については誤解している生徒が多いことを示唆している。

誤った記述が豆電球や白熱電球で多く、恒星で少なかったのは、恒星では1枚の写真にスペクトルが並べられており(図1)、比較しやすかったのに対し、豆電球と白熱電球では、交互に見比べたり、変化を追ったりしなければならず、比較が難しかったためと考えられる。このために、豆電球や白熱電球の場合に生徒たちの「温度が高いほど赤が短い」という誤解が浮き彫りになったのであろう。これは重要な問題点であるので、5章で検討する。

4.3 事後アンケート

授業直後の事後アンケートには五つの質問項目を設定した(表5-1)。Q1とQ2で豆電球と白熱電球について、それぞれのスペクトルの見やすさを5段階で回答させたところ、いずれも「見やすい」と「少し見やすい」の合計が半数を超えた(表5-2)。また、Q4で白熱電球の方がよいとしたものは50名(約74%)であった。このことより、今後の授業においては、白熱電球を用いた展開3に重点を置くことが推奨される。

5. 考 察

恒星の色と温度の指導に関する本実践で確認できた教育効果と、本実践により示唆された二つの問題点について論じる。

5.1 本実践の教育効果

ワークシートのQ8に対して「温度」を記述したのは57名であった(表4-3)。そのうち38名は事前アンケートでも温度で決まることをあげていた。つまり、19名(約28%)が本実践で恒星の色が温度で決まることを新たに学んだと考えられる。

温度のみをあげた51名のうち、事前にも温度のみをあげていたのは15名であった。つまり、本実践により36名(約53%)において、恒星の色と温度の関係についての理解が深まったと推測される。

また、ワークシート(表4-1)のQ9でたずねた今回の授業の意義について、「恒星の色と温度の関係を学ぶこと」に加えて、「身をもって体験でき、よかった」、「漠然としていただけの知識を観察によって明確なものにすることができた」、「恒星を電球に模し、実体験に基づいた強い印象づけを試みる」などの、教科書と

板書だけの授業に比べて意義深いと感じたことをうかがわせる記述がみられた。

以上のことより、身近な光源を用いた温度とスペクトルの関係についての観察と、レプリカグレーティングとデジタルカメラによる恒星のスペクトル写真を関連付けた指導が、恒星の色が温度により決まることを理解させる上で、より印象深いものとなることが確認された。

5.2 問題点1 恒星の色・温度・明るさ

ワークシートのQ8に対して恒星の色は明るさ(光の強弱)で決まるとする記述が6名に見られた(表4-3)。また、事前アンケートでは温度で決まると記述したにもかかわらず事後アンケートには明るさと記述した者が2名いた。さらに、Q4、Q6、Q7に対して「(温度が高くなると)全体的に明るくなる」という記述が延べ25名に見られた(表4-2)。これらの回答をした者の実数は27名(約40%)であった。

本実践では温度のみを変数として、同じ電球を同じ位置から観察させただけであるため、恒星の色と明るさの関係を混同した記述を直ちに誤りであると決めつけることはできない。しかしながら、これらの記述は、「恒星の温度と色の関係」と「恒星の温度と明るさの関係」を峻別していない生徒が多いことを示唆する。前者はウィーンの変位則に、後者はステファン・ボルツマンの法則に対応する。本実践は両法則を学習させる前に行ったが、後者の法則を「明るさは温度の4乗で決まる」という程度にしか理解していないと、本実践と同様に色と明るさを区別することができないと考えられる。つまり、ここでいう明るさは、その単位が W/m^2 であり、単位時間あたりの単位表面積からの放射量であることをはっきりと理解していなければならない。

「恒星の色は明るさで決まる」という記述は、「恒星の色は恒星全体の明るさのみで決まる」という意味であれば誤りであるが、「恒星の色と単位面積あたりの明るさには関係がある」という意味であれば正しい。単位面積あたりの明るさ(W/m^2)は表面温度の4乗に比例するが、恒星全体の明るさ(W)は単位面積あたりの明るさと表面積の積で決まる。

主系列星に限れば、表面温度の高い星は青くて明るく、表面温度の低い星は赤くて暗い。しかし、巨星には表面温度が低いにもかかわらず、表面積が大きいために明るい(光度の高い)星があるし、白色矮星は一般に表面温度が高いにもかかわらず、表面積が小さい

ために暗い（光度の低い）星である。つまり、「明るいほど青い」という理解は、本実践における観察（単位面積あたりからの放射）については正しくとも、恒星の大きさに関する学習の際に混乱をきたすおそれがある。

その混乱を防ぐためには、色・温度・明るさを同時に教える、つまりウィーンの変位則とステファン・ボルツマンの法則を関連付けて教える必要がある。この観点から本実践の改善法として、次のような二つの指導法が考えられる。

たとえば、スペクトルを見ながら白熱電球（光源）に近づかせ、スペクトル全体は明るくなるものの、スペクトルは変わらないことに気づかせる。明るさは距離で変わるがスペクトルは変わらないことから、明るさと色を峻別した観察を生徒が行うようになることが期待できる。実際に天文クラブの3名の高校1年生に、簡易分光器で白熱電球のスペクトルを見ながら、光源に近づいたり、遠ざかったりさせてみた。その距離は約30 cmから3 mであった。彼らの反応は、近づく「スペクトル全体が明るくなり、幅が大きくなるが、長さや色の様子は変わらないこと」と、明るさと色とを区別した観察を行うことができた。

5.3 問題点2 プランク分布の誤った理解

ワークシートのQ4, Q6, Q7に対して、「(温度が高くなると)赤が短くなる」という誤った記述をした者が延べ53名いた(表4-2)。この延べ人数をQ4, Q6, Q7のいずれかに誤った記述をした実人数にすると32名(約47%)であった。この「赤が短くなる」という誤った記述と、事前アンケートでの「恒星の色は何で決まるか」という問いに対する回答とを比べてみた。

事前アンケートで「温度で決まる」と答えた者のうち「(温度が高くなると)赤が短くなる」と誤った記述をしたのは、40名のうち半数以上の22名であった。

一方、事前アンケートで「温度で決まる」と答えなかった者のうち「赤が短くなる」と記述したのは、28名のうち10名にとどまった。つまり、授業を受ける前に「恒星の色は温度で決まる」ことを知っていた者の方に、「赤が短くなる」という誤った記述が多くみられた。このことより、「恒星の色は温度で決まる」ことを知っていても、「青い星は温度の高い星、赤い星は温度の低い星」という程度の理解であったものと思われる。「青い星は温度の高い星、赤い星は温度の低い星」という放射強度の最も強い部分についての説明を、スペクトル全体に関する説明であると誤解していること

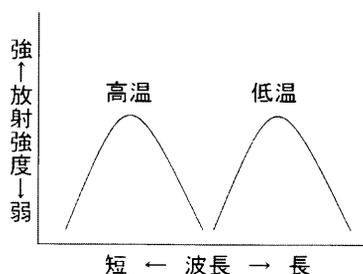


図4 筆者らが想定した、生徒のもつプランク分布に関する誤ったイメージ
温度が高くなるに従い、グラフ全体が形を変えずに波長の短い方へ移動する。

が示唆される。

筆者らは誤った記述をした生徒たちのプランク分布のイメージを、図4のようなものであったと考えた。この図に基づいて考えると、温度が高くなるとグラフ全体が短波長側にずれるので、スペクトルの青が明るく、赤が暗くなることになり、生徒たちの誤った記述と符合する。

また、生徒たちの誤った記述から、従来の指導の盲点を指摘することができる。温度と色の関係はウィーンの変位則で表すことができ、温度と明るさの関係はステファン・ボルツマンの法則で表すことができる。両法則は旧課程の地学IBの教科書に掲載されていた。同時にプランク分布も図示されていたのだが、計算問題にしやすいこともあり、両法則の指導に重きが置かれ、プランク分布全体の様子を把握させるような指導には重点が置かれていなかったように見受けられる。実際、地学IBの教科書5社5種類すべてにおいて、プランク分布に関する記述は「表面温度が異なると放射エネルギー分布が異なる」という程度であり、ウィーンの変位則やステファン・ボルツマンの法則に関する記述の量と比べると余りにも少ないといわざるを得ない。

以上の推理が正しいかどうかを確かめるために、本実践を行った高校で地学IBの選択授業を受けていた3年生76名に、センター試験で地学IBを受験した数日後にプランク分布を描かせてみた。

調査用紙にはプランク分布のグラフを1本だけ描いておいた(形は有効温度3,000 Kのもの)。縦軸と横軸には要素と大小関係を示すにとどめ、数値は示さなかった。また、本来のプランク分布図よりも左側(波長の短い側)を広くあけておいた(図5)。そして、図示されているものよりも表面温度の高い場合と低い

場合の放射強度分布図を描き加えさせた。

結果は正解を含め4種類に分類できた(図6)。正しく理解していたと考えられる類型アを描いた者は19名(約25%)にとどまった。最も多かった回答は類型イの35名(約46%)であった。これは、ウィーン

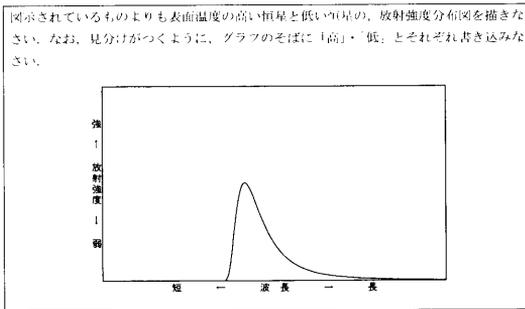


図5 ブランク分布の質問紙

実施時期: 2004年1月21日(センター試験受験直後)

対象生徒: 高校3年生76名(センター試験対策「地学」受講者)

変位則とステファン・ボルツマンの法則については理解しているものの、プランク分布については、「温度が高くなると、すべての波長にわたって、放射強度が増すこと」を理解していないことを示す。

筆者らの予想した誤解、ウィーンの変位則のみを理解しているもの(図4)にあたる類型ウは12名(約16%)であった。

また、ステファン・ボルツマンの法則については理解しているものの、ウィーンの変位則についての理解が不十分であることをうかがわせる類型エを、7名(約9%)が描いた。これもプランク分布についての学習が不十分であることを示唆している。

この高校3年生に対する調査結果は、恒星の色と温度の関係を指導する際には、ウィーンの変位則とステファン・ボルツマンの法則に加えて、プランク分布そのものについての指導が重要である、ということを裏づけるものである。

現行の指導要領では両法則そのものは地学IIの学習内容とされ、地学Iから削減された。「恒星の色と温

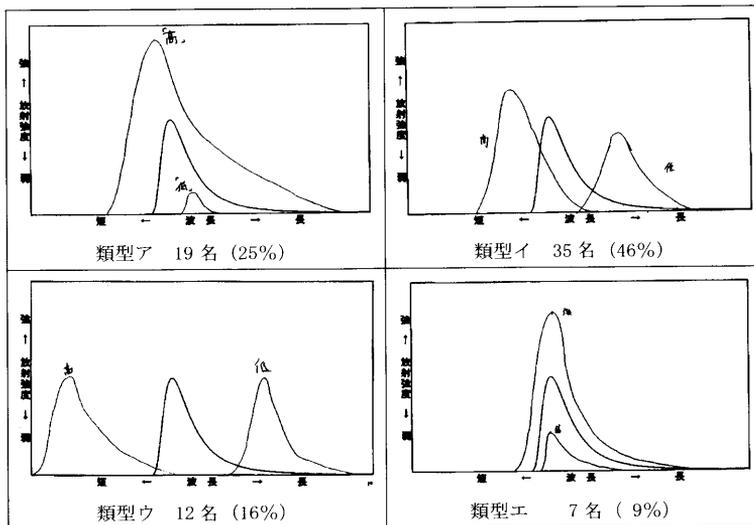


図6 生徒たちが描いたプランク分布

結果: 生徒のもつプランク分布のイメージには四つの類型がみられた。

類型ア プランク分布らしくなっているもの

類型イ ウィーンの変位則とステファン・ボルツマンの法則についての考慮がみられるものの、プランク分布としての理解には至っていない。

類型ウ ウィーンの変位則については考慮しているが、ステファン・ボルツマンの法則については考慮していない。

類型エ ステファン・ボルツマンの法則については考慮しているが、ウィーンの変位則については考慮していない。

なお、その他に、いずれの型にも属さないものが3名(4%)。

度の関係」の学習は地学Ⅰと地学Ⅱの双方の学習内容に含まれていることから、地学Ⅰでの授業に際しては、従来とは異なる指導展開が要求されている(買手屋, 2000; 永田, 2000). しかしながら、文部科学省(2002)は、現行の指導要領を「これまでの学習指導要領より、最低基準としての性格が一層明確になっている」としていることから、従来どおりにウィーンの変位則とステファン・ボルツマンの法則の双方を取り上げて授業を展開する教員も多いものと思われる。その場合には、本論文の結論として得られた『両法則に加えてプランク分布の指導を徹底する』ことが重要である。

また、両法則はどの地学Ⅰの教科書にも掲載されていないことから、両法則を取り上げない教員も少なからずいるであろう。その場合でも、4社4種類の教科書にはプランク分布が図示されており、また資料集などにもプランク分布は掲載されている。2つの法則の名称や内容を生徒に説明しなくとも、教科書や資料集に掲載されているプランク分布の図を用いて、ウィーンの変位則については、「温度が高くなるほどグラフのピークの位置が短波長側に移動する」ことを、ステファン・ボルツマンの法則については、「温度が高くなるほど、グラフで囲まれた面積つまり明るさが増す」ことを指摘すればよい。つまり、両法則を個々に指導するのではなく、プランク分布が温度により変化する様子を図形として認識させることが重要である。

今回の実践はプランク分布を図示する前に行ったが、事前に学習させるか、正しいプランク分布(図7)を示し、温度が高くなると、スペクトル全体が明るくなる(スペクトルは青、赤の両方へ伸びる)ことを示し、再度観察させることが有効であると考えられる。その際に正しいプランク分布(図7)を書き写させることも効果的であろう。

また、生徒たちの誤解を未然に防ぐために、典型的な間違い(図6の類型イ、ウ、エ)を示し、誤っている箇所を説明することも、高い効果を期待できる。

これは同時に、前節で述べた恒星の色・温度・明るさの三者の関係を同時に指導することにもなり、黒体放射についてより深く学習することにつながると思われる。

6. まとめ

レプリカグレーティングとデジタルカメラによる恒星のスペクトル写真と、豆電球や白熱電球のスペクトル

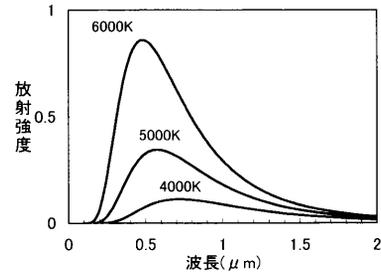


図7 生徒に提示するプランク分布の図
縦軸は単位時間・単位面積・単位波長あたりのエネルギー流束(単位は $10^8 \text{ Js}^{-1} \text{ m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$)。温度が高くなると、全体に明るくなり、ピークが短波長側にずれる。

ルの観察を組み合わせた授業を、高校地学Ⅰに位置づけて試行した。その授業展開は、豆電球や白熱電球を用いて温度の違いによるスペクトルの違いを観察させた上で、それと関連づけて、レプリカグレーティングによる恒星のスペクトル写真を提示するというものであった。恒星の色と表面温度の関係を体験として理解させる、この教授法の有効性が確認された。

また、恒星の色と温度の関係の指導について、二つの問題点が見出された。第一の問題点は、温度の変化に伴う「色の変化」と「明るさの変化」を混同する生徒が多数いることである。温度の違いによるスペクトルの違いを観察させる際には、温度の変化による色の変化と同時に、温度の変化による明るさの変化も観察されるためである。そのため、恒星の色・温度・明るさの三者を合わせて指導する必要がある。

第二の問題点は、「温度が高くなるとスペクトルの赤い側が短くなる」というように、プランク分布を誤解している生徒が多いことである。これについては追加の調査を行い、生徒のもっている間違っただプランク分布のイメージを明らかにし、それを三つのタイプに分類した。この誤解を防止するために、正しいプランク分布を明示すると同時に、誤ったプランク分布図の典型的な三つの例を示す指導法を提案した。

謝辞 本研究は2001年に美星天文台で開催された「星の学校」での経験に基づいています。本研究を進めるにあたり、半田利弘氏(東京大学天文教育センター)、大島修氏(岡山県立鴨方高校)、川端哲也氏(美星天文台)には有益な助言をいただきました。また、実践に際しては、千代間憲雄氏をはじめとする巣鴨中学高等学校の理科教員の皆さんおよび生徒の皆さんに

ご協力いただきました。ここに感謝いたします。

引用文献

土橋一仁・菊池紘之・五島正光・瀧崎智佳・森 厚・
上原 隼(2004): 恒星の色と温度を体感させるデジタル分光カメラの開発. 地学教育, 57(1), 1-13.
買手屋 仁(2000): 地学 II. 江田 稔・三輪洋次(編), 改訂
高等学校学習指導要領の展開 理科編, 明治図書出

版, 東京, 231 p.

文部省(1999): 高等学校学習指導要領.

文部科学省(2002): 個に応じた指導に関する指導資料—
発展的な学習や補充的な学習の推進—(中学校理科
編). 教育出版, 東京, 10 p.

永田 洋(2000): 地学 I. 江田 稔・三輪洋次(編), 改訂
高等学校学習指導要領の展開 理科編, 明治図書出版,
東京, 215 p.

五島正光・土橋一仁: レプリカグレーティングを用いた「恒星の色と温度」の授業実践 地学教育 58 巻 1
号, 1-12, 2005

〔キーワード〕 高校, 簡易分光器, 恒星, スペクトル, 黒体放射, レプリカグレーティング

〔要旨〕 高校 1 年生 68 名に対してレプリカグレーティングと白熱電球等の身近な光源を利用した試行授業
を行い, 恒星の色と表面温度の関係を体験として理解させることを試みた. 印加電圧を変化させれば電球
の見かけの色やスペクトルは変化し, また電球の表面に触れば内部のフィラメントの温度変化を体感で
きる. 試行授業で用いたものと同じレプリカグレーティングを使って得られた恒星の分光写真と比較する
ことにより, 恒星の色がその表面温度を反映していることを効果的に理解させることが可能であることが
分かった.

また, 試行授業を通して, 黒体放射の教授法に関する問題点が二つ明らかになった. 1 点目は, 温度の
変化に伴う「色の変化」と「明るさの変化」を混同する者が多数いることである (68 名中 27 名, 約
40%). 2 点目は, 「温度が高くなるとスペクトルの赤い側が短くなる」というように, プランク分布を誤
解している生徒も多いことである (32 名, 約 47%). 本論文では, 試行授業の内容について述べた上で,
二つの問題点を紹介する. また, これらの問題点を解決するために, 恒星の色・温度・明るさの三者を合
わせた指導法と, プランク分布の典型的な誤解を防止するための指導法を示す.

Masamitsu GOSHIMA and Kazuhito DOBASHI: Teaching of the Color-Temperature Relationship of
Fixed Stars Using Replica Grating. *Educ. Earth Sci.*, 58(1), 1-12, 2005

特集 〈地学現象の確率モデルと確率予測〉によせて

2004年は9月の浅間山の噴火、10月には震度7を含む大規模な災害をもたらした新潟県中越地震、引き続き11月には北海道釧路沖には震度5強をもたらした地震が発生し地球内部の活動が活発期に入っていることを示唆する年であった*。たとえば10月23日に新潟県中越地震が発生しているが、同26日に気象庁は「3日以内に震度6強クラスをもたらす地震が起きる可能性について20%」という発表をしている（朝日新聞10月26日、夕刊）。東海地方に予想される海溝沿い巨大地震などの予測は観測も整備され、過去のデータや物理的なモデル、あるいは経験的な法則を基に長いこと議論されており、いわゆる「地震予知」の花形的な議論である。しかし、上記のように大地震が発生した際、引き続き起こるであろう余震の発生確率なども立派な「予測」であり我々の日常生活に多かれ少なかれ影響のある情報である。にもかかわらずその意味するところが何であるか、についての知見あるいは理解についてはおおよそ乏しいといえる。余震の発生確率を知って人は何をどう判断すればよいのか、について戸惑いを覚えるに違いない。

地球内部の活動もさることながら、2004年の夏は異常なほどに暑い日が続く、いわゆる「異常気象」の年でもあった。こと“天気”に関しては「異常な夏」を取りざたする以前に日常的な関心事であり、天気予報はもはや日常生活における「必須情報」ともいえる。この天気予報に関しても、たとえば「降水確率」などに代表されるように「確率予測」が横行しているし、この予報形態は地震（余震）の予測以前に確立・定着したものである。しかしこの確率予測なるものの意味するところが果たして国民に十分に理解されているのか、はなはだ心もとない。いったい「xx地方に雨の降る確率はyy%」と発表されたときに、空間的そして時間的な詳細情報も意味するところが不明である。また、この予報から人は何を準備すればよいのであろうか。準備にかかるコストや如何に？このように日常的な地球現象は私たち人間の社会生活に対して大きな影響を及ぼすわけであるから、おおよそ「地学教育」に携わる人にとって、その予報の意味するところを知ることは必須であるに違いない。本特集では最初に「地震」と「天気」の確率予報の専門家あるいは立役者に登場していただき、その意味するところの解説をお願いした。

ひるがえってみれば、地学現象は多かれ少なかれ、発生論的に見てもあるいは物理モデルとしても確率的な要素を持つ現象であるとも言える。「地震」の項で登場する「地震の規模とその頻度」を示すグーテンベルグ・リヒターの式などは全くの経験式であるが、それを説明する物理モデルも登場している。また「規模とその頻度」に関する経験式は他の地学現象、たとえば「月のクレーター サイズとその頻度」についても同様な統計式が成立し自然界においてかなり普遍的に存在する法則のようである。このように経験的に見出された普遍的な法則を説明するのに現在では「シミュレーション」という手法が有効であることが認められている。「シミュレーション」は現実の事象を“似せて”示すことを意味することであり大きくいって2種類ある。一つは物理実体を用いての「室内実験」であり、他の一つはコンピュータによる「数値シミュレーション」である。後者はとくに昨今、コンピュータの性能が飛躍的に向上し、その可能性がますます広がりつつある。コンピュータによるシミュレーションにより自然現象を再現することは、現象の背後にあるメカニズムを理解する上で強力な道具となる。コンピュータシミュレーションの強みはマイクロから巨大な（宇宙規模の）スケールに至るまで、時間軸を自在に変化させながら自然現象を擬似体験できるところにある。つまり現実の人間生活を規定する時間・空間のスケールを飛び越えた世界をバーチャルリアリティとして我々の頭脳にインパクトを与えることにあるといえよう。本特集では地質現象の中で「地層の堆積」の様子をコンピュータによってシミュレートする試みをも解説として掲載することにした。地質現象は2次元、3次元の広がりを持つ世界であるが、それらを扱うにはコンピュータの性能の面からも教育の現場ではまだ現実的ではないことから、1次元の「地層の堆積作用」に絞ってシミュレーション結果を披瀝していただいた。現実の堆積層の解析から「マルコフ性」（簡単には、ある事象が時間的にあるいは空間的に過去あるいは隣接の事象に確率的に依存する現象）が示唆されることから、このような現象に対して乱数を扱っての「モンテカルロ法」によってその現象を再現するという意欲的な試みである。したがって、このシ

ミュレーションも敷衍すれば地質現象の「確率予測」につながるということもできる。いずれにしても「シミュレーション」は現象を理解する上で、“モデリング”というキーワードから窺えるように教育的には十分に有効な手段であると考えられる。「天気」、「地震」を含めて教育現場で大いに利用されれば编者にとって望外の喜びである。

2004年12月

(特集号担当編集委員 山崎謙介)

* 追記: この「はしがき」を脱稿後、12月26日にはインドネシアのスマトラ沖にマグニチュード9クラスの巨大地震が発生し、インド洋全体を津波が襲った。2005年1月現在、死者、行方不明者が18万人にも達している。

地震活動の確率予測

—最近の余震活動予測とその課題—

Probability Prediction for Earthquakes:
Recent Trials on Aftershock Activity and Several Problems

山科 健一郎*

Ken'ichiro YAMASHINA

Abstract: Probability prediction for earthquake aftershock activity is typically undertaken using empirical rules, e.g., the Modified Omori Formula. In order to review current methods of aftershock prediction and their problems, recent trials on the aftershocks of the 2003 Tokachi-oki earthquake of magnitude 8.0 are discussed, with a probabilistic evaluation.

1. はじめに

2003年9月26日04時50分、北海道の太平洋側沖合いでマグニチュード8.0の大きな地震が発生した。これは、“2003年十勝沖地震”と呼ばれることになったが、最大震度6弱を記録した地震動による建造物の倒壊、火災の発生、津波の襲来などで被害を生じたことは、記憶に新しい。

マグニチュード8級の地震は、1994年10月の北海道東方沖地震のマグニチュード8.1以来、9年ぶりのことであった。このような大きな地震が起こると、引き続いて“余震”と呼ばれる小地震が多数発生する(図1, 2)。先行する大きな地震は“本震”と呼ばれるが、本震が大きいと、余震の中にも大きなものが含まれる可能性があり、場合によっては被害の追い打ちを受けることも心配される。そのため気象庁では、大きな余震が発生する恐れがどのくらいあるか、検討する態勢を整えるようになった。2003年の十勝沖地震の場合も、本震発生から半日経過した26日午後、『9月26日16時から3日以内に、M7以上が発生する確率は20%、M6.5以上が発生する確率は40%、M6以上が発生する確率は70%』などと発表した。この期間にM(マグニチュード)7の余震は発生しなかったが、27日05時38分にM6.0、29日11時36分には

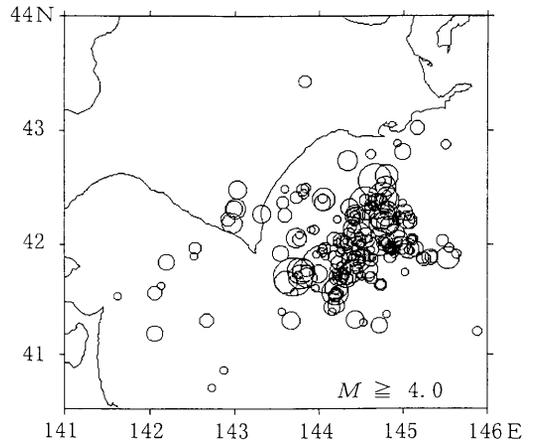


図1 2003年十勝沖地震の余震と周辺の地震活動: 2003年9月26日~12月31日, マグニチュード4.0以上. 気象庁の資料による.

M6.5が起きている。

地震の発生という身近な現象は、確率予測の意味について考える一つのよいきっかけではないかと思われる。そこでここでは、このような確率予測がどうして可能なのか、その背景となる余震の性質について確認するとともに、具体例として2003年十勝沖地震の余震活動を取り上げ、予測が実際にどのくらい当たっているのかを検証する方法とその結果について、議論し

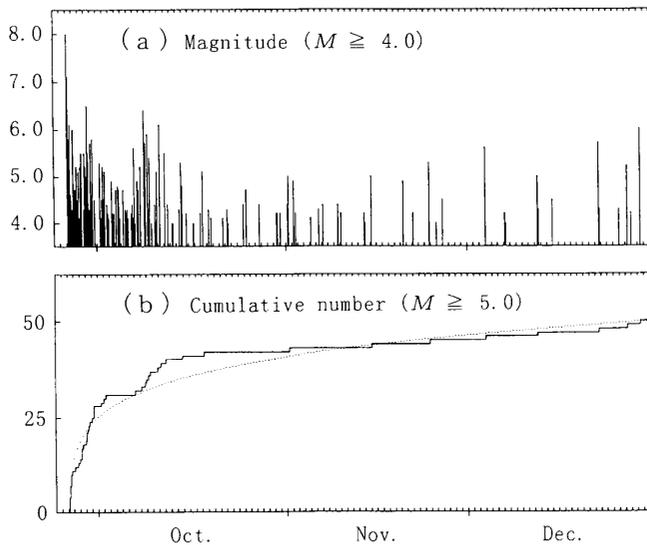


図2 2003年十勝沖地震の余震活動(2003年9月~12月): (a) 本震と余震のマグニチュードの推移(マグニチュード4.0以上). (b) マグニチュード5.0以上の余震の累積の数(折れ線)とそれに当てはめた改良大森公式(点線). ただしここでは, 東経142.9~145.6度, 北緯41~43度の範囲で起きたものを余震として数える. 気象庁の資料による.

てみたい.

2. 改良大森公式とグーテンベルク・リヒターの式

余震活動を考えるとき, 二つの基本的な関係式について理解しておく必要がある.

本震の発生に引き続いて活発化する余震活動は, 図2のように時間の経過とともに徐々に衰えていくが, その減り方は,

$$n(t) = \frac{K}{(t+c)^p}$$

という式でかなり表すことができる. それを示した宇津(1957)は, この式を“改良大森公式”と呼んだ. ここで, $n(t)$ は単位の期間に起こる余震の数, t は, 本震発生時刻を0として, そこから測った経過時間, K, c, p は, それぞれの本震-余震活動ごとに定まる適当な定数である. ただし, 余震の数は, 小さいものまで数え上げると切りがない. $n(t)$ や K は, 取り扱う余震の大きさの下限を定めて初めてその値が決まる. なお, 図2bでは, $n(t)$ そのものではなく, 時刻0から通算した累積の余震数を示している.

ここで, p の値は, 通常は1.0前後の値をとる. 初めから $p=1$ とした式は, 今から100年以上も前に大森(1894)によって提案され“(余震の減衰に関する)大森公式”の名で知られていた.

時間の経過とともに徐々に収まっていく現象と言え, 指数関数的な減衰 $n(t) = a \exp(-ct)$ がすぐに思い浮かぶ. ウランの壊変現象などがこれに従う代表的な例であろうが, 個々の事象がでたらめに発生して互いに影響を及ぼし合わないこと, また, 減衰の度合いが比較的速いこと, がその特徴として挙げられる. 改良大森公式に従う場合, 初期の減衰はかなり速いが, 時間が経過すると緩やかになり, ずっと後々まで尾を引くことになる.

一方, 地震の大きさ分布に関する式として, “グーテンベルク・リヒターの式”がよく知られている. 一般に, 大きな地震はめったに起こらないが, 小さな地震は, それを記録する精密な観測を行えば, 頻繁に起きているのを確かめることができる. この関係を表すのがグーテンベルク・リヒターの式(またはG-R式)で, 地震の大きさをマグニチュード M という測り方で表すと,

$$\log N(M) = A - bM$$

と表現される. 式の呼び名は, 地震の大きさ分布についていろいろ調べた2名の研究者(B. Gutenberg と C. F. Richter)の名に因んでいる.

ここで, $N(M)$ は M 以上の大きさの地震の総数, A と b は適当な定数で, b は, 1.0前後か, それより少しだけ小さい値をとることが多い. $b=1.0$ であれば, M

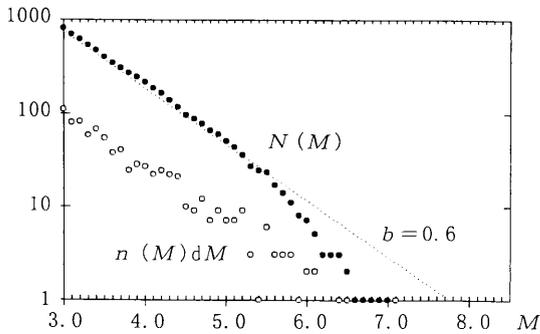


図3 2003年十勝沖地震の余震活動(2003年9月26日~12月31日): マグニチュード別の余震の数. 大きい方から累積した数 $N(M)$ (●) と, $M 0.1$ 刻みで数えた数 (○; $n(M)dM$ に相当) を示す. 気象庁の資料による. 点線は, $M 3.0$ 以上の余震について最尤法で求めたグーテンベルク・リヒターの式. 数が多い $M 3$ や $M 4$ の余震によく当てはまるように求められているが, この例では, 通例よりも小さな b 値が得られていること, M の大きいところできなり外れていることが分かる.

の値が1小さくなるごとに, その数が10倍に増えることを意味している. 実際に, 日本付近で $M 8$ 級の地震が起こるのは, 平均するとおおよそ10年に1回くらいの割合であるが, $M 7$ 級になると毎年1回くらい, $M 6$ 級なら1年に平均して10回くらい起きている.

グーテンベルク・リヒターの式は, ある地域, ある期間の活動について成り立つ関係として主に考えられたが, 個々の余震活動をそれぞれ取り出すと, やはりほぼ同様に成り立つと考えられている(図3). ただし本震は, 通常はその中に含まない. 本震は, 他の余震よりも飛び抜けて大きいことが多く, 本震を含めしまうと, グーテンベルク・リヒターの式の一番大きい部分の形が崩れることが多い.

改良大森公式やグーテンベルク・リヒターの式がどうして成り立つのかという点に関しては, いろいろな解釈が提案されていて, 宇津(1999)や山科(2001)の中にも紹介がある. しかし, 必ずしも理論的に導かれる関係というわけではない. 経験則の域をまだ出しておらず, その仕組みについて解明する余地を残している.

3. パラメータの値の最尤推定

改良大森公式やグーテンベルク・リヒターの式には, いくつかの定数項が含まれる. そのため, 具体的

な議論を進めるためには, これらのパラメータの値を求める必要がある. そこでここでも, パラメータを求める手順について, 簡単に触れておこう.

パラメータの値は, “最尤推定”と呼ばれる方法で決めるのが便利であろう. これは, 「一番もっともらしい値を各パラメータの値として用いる」という考えに立っており, 「観測されたデータが出現する確率が一番大きくする値」と言い直すこともできる.

時刻 T_1 から T_2 までの期間に起きた(ある大きさ以上の)余震の数を N とし, それぞれの余震の発生時刻を t_1, t_2, \dots, t_N と表す. これらの発生が改良大森公式に従うとすれば, 時刻 $t_i \sim t_i + dt$ の間に余震が起こる確率 p_i は,

$$p_i = \frac{K}{(t_i + c)^p} dt / \int_{T_1}^{T_2} \frac{K}{(t + c)^p} dt$$

と表現できる. これから, N 個の余震がそれぞれの時刻 $t_i + dt$ の間に起こる総合的な確率 P は, 上記の式の t_i を t_1, t_2, \dots, t_N で置き換え, それらを掛け合わせるによって得られる.

これより, P を最大にする K, c, p を求めることになるが, それは同時に, P の対数値 $\ln P$ (または $\log P$) も最大にする(ただし, $\ln P = \log P / \log e \approx \log P / 0.4343$). 掛け算の形をとっている P よりも, 足し算の形に書き直せる $\ln P$ の方が取り扱いやすいことが多いから, その場合は, $\ln P$ を最大にするパラメータの値を求めればよい. そのためには, $\ln P$ をそれぞれのパラメータで微分して, それらが0になるようにパラメータの値を決める. このとき, c と p を含む式は少し複雑な形になるから, 簡単な計算プログラムを組んで, 解を漸近的に求めることになる. 一方, パラメータ K は, p_i の式の分母分子に同じようであって消えてしまう. c, p の最尤推定値を求めた後, p_i の分母が, この期間に起きた余震の数 N に一致するように, K を決めればよい. なお, 確率という用語を限定的に使う立場, あるいは, 合計して1になるようにその値を規格化することにこだわらない立場からは, P は“尤度”, その対数は“対数尤度”と呼ばれている.

先にも記したように, p の値は1.0前後になることが多い. 一方, c の値は数分~数時間程度のもので多く, 本震から十分な時間が経過していれば, これを0とみなしてもそれほど差し支えない. しかし, 全期間を通じてなるべくよく当てはまる見積もりをするためには, $\ln P$ の計算に, 本震直後の早い時期からの余震データが含まれることが望ましい. ただ, 本震発生か

ら例えば数分～十数分くらいは、本震の大きな地震動や立て続けに起こる大きな余震のために、多かれ少なかれ数え落とされる余震があると思われる。推定した改良大森公式よりも直後に観測された余震の数が少ない場合は、このような数え落として説明できる可能性がある。しかしそれが逆に多い場合は、改良大森公式に単純に当てはめることへの限界を示しているかもしれない。

K, c, p の推定値は、いつからの余震データを利用するか (T_1 をどのようにとるか) によって違いが生じ、少し問題がある。しかし、その値が多少異なっても、期間の最終部分 (T_2 付近) での違いは、あまり大きくない。予測に利用するという観点からは、全期間にわたってよく当てはまるかどうかという点には、それほどこだわらなくてよいかもしれない。

ゲーテンベルク・リヒターの式 $\log N(M) = a - bM$ の場合は、その式の両辺を M で微分し、 $dN(M)/dM = -n(M)$ と表すことにすれば、 $a = A + \log(b \ln 10)$ と置いて、

$$\log n(M) = A - bM$$

が導かれる。これを用いれば、観測された余震の M が $M_i \sim M_i + dM$ に入る確率 p_i は、取り上げる余震の大きさの下限を M_{\min} と置いて、

$$p_i = 10^{a-bM_i} dM / 10^{A-bM_{\min}}$$

と書ける。ここで、観測された余震の数を N とし、その M が M_1, M_2, \dots, M_N であったとする。上記の M_i を M_1, M_2, \dots, M_N で置き換え、それらを掛け合わせるによって総合的な確率 P が得られる。

ここで、 P の常用対数 $\log P$ をとり、これを b で微分して 0 と置けば、 $b = \log e / (\sum M_i / N - M_{\min})$ が得られる (例えば、宇津 (1999))。また、 $N(M_{\min}) = N$ の関係を用いれば、 $A = bM_{\min} + \log N$ となることが知られている。なお、 M の値は通常 0.1 刻みで与えられる。その場合、四捨五入の影響を入れて、例えば下限の M が 5.0 なら、 $M_{\min} = 4.95$ として取り扱う。

4. 余震の発生回数と発生確率

観測データによく合う改良大森公式が具体的に得られれば、その曲線を未来へ延ばして、これから先の予測をすることができる。

改良大森公式の $n(t)$ を時刻 T_1 から T_2 まで積分すれば、

$$x = [K(t+c)^{1-p} / (1-p)]_{T_1}^{T_2}$$

となることがすぐに分かる。これは、時刻 $T_1 \sim T_2$

の間に、あらかじめ定めた下限以上の大きさの余震が平均して x 回起こることを示している。このとき、その大きさの余震が $T_1 \sim T_2$ の間に 1 回以上起こる確率は、

$$1 - \exp(-x)$$

となることが知られている。

ここで、平均的な発生回数 x から余震が起こる確率を計算する際に、指数関数 $\exp(-x)$ が出てくることを確かめておこう。注目する期間に平均的に x 回の事象が起こるとする。この期間を細かく分割して、 N 区間に分ける。このとき、それぞれの区間に事象が起こる確率がいずれも x/N となるように、区間を分ける。そうすると、全期間に一度も事象が起こらない確率は $(1-x/N)^N$ 、少なくとも 1 回は事象が起こる確率は $1 - (1-x/N)^N$ と表すことができる。ここで、 N は便宜的に定めた大きな数であり、理想的には、限りなく大きいことが望ましい。そこで、 $N \rightarrow \infty$ の極限をとると、

$$\lim_{N \rightarrow \infty} (1-x/N)^N \rightarrow \exp(-x)$$

となることが分かる。これは、指数関数を定義する式と考えてもよいが、さらに確かめるなら、 $f(x) = (1-x/N)^N$ と置いて、これを x で微分すると、 $df(x)/dx = -(1-x/N)^{N-1}$ となる。ここで $N \rightarrow \infty$ を考えれば、 $df(x)/dx$ は $-(1-x/(N-1))^{N-1}$ 、したがって $-(1-x/N)^N$ に限りなく近づき、結局、 $df(x)/dx \rightarrow -f(x)$ が得られる。これを解けば、 $f(0) = 1$ であることを考慮に入れて、 $f(x) \rightarrow \exp(-x)$ が導かれる。

5. 大きな余震の発生確率予測

(1) 余震の発生確率を予測する方法

前述のように、改良大森公式を利用すると、ある大きさの余震が起こる確率がどのくらいあるか、推定することができる。これをゲーテンベルク・リヒターの式と組み合わせれば、もっと大きな余震が起こる確率に換算することもできる。例えば、 x 回という予測が $M 4.0$ 以上の余震について得られた値なら、 $M 5.0$ 以上、 $M 6.0$ 以上が起こる確率は、 $1 - \exp(-x/10^0)$ 、 $1 - \exp(-x/10^2)$ で計算することができる。

このような試みをカリフォルニアの地震について提案したのは Reasenber and Jones (1989) であったが、示された式の中に不備があり、細野・吉田 (1992) によって訂正された。その後、気象庁では、被害を出すような大きな地震について、大きな余震の発生確率を公表する準備を進め、1998 年から実際にそれを開

表1 気象庁による2003年十勝沖地震の余震の発生確率予測：()内は前日～3日前に発表された値

期 日	M7以上の余震が発生する確率	
	3日間以内	7日間以内
9月26日 16時から	20%	30%
27日 15時から	10%	20%
28日 "	20%	30%
29日 "	20%	40%
30日 "	30%	50%
10月 1日 "	20%	40%
2日 "	20%	40%
3日 "	20%	30%
(4日 "	20%	30%)
(5日 "	10%	20%
(6日 "	10%	20%)
(7日 "	10%未満	20%
(8日 "		10%)
9日 "	10%	20%
(10日 "	10%未満	20%)
11日 "	10%	20%
(12日 "	10%	20%)
(13日 "	10%未満	20%)
14日 "	10%未満	20%
(15日 "		20%)
(16日 "		20%)
17日 "	10%未満	10%
(18日 "		10%)
(19日 "		10%)
20日 "	10%未満	10%
(21日 "		10%)
(22日 "		10%)
23日 "	10%未満	10%
(24日 "		10%)
(25日 "		10%)
(26日 "		10%)
27日 "	10%未満	10%
(28日 "		10%未満)

照)に掲載されるとともに、報道機関にも伝えられた。また、同様の計算結果は、政府の地震調査研究推進本部の中に設けられた地震予知調査会の検討会合にも提出され、そこを通じて発表されたものもあった。

十勝沖の地震では、M7以上、M6.5以上、M6以上の余震が、それぞれ3日間以内、7日間以内に起こる確率が提出された。そのうちの一部を、表1に示す。ただし、本震発生から間もない9月26日午後に出された最初の予測は、過去のいろいろな地震の平均的な傾向から推測されたものであったと説明されている。

(2) 余震の発生確率予測の検証

確率予測では、懸念する事象が起こる場合と起こらない場合の両方が、確率という形で同時に想定されている。したがって、実際に事象が起きても起きなくても、予測が適切だったかどうかを判断することは、にわかには難しい。しかし、例えば40%の確率で出された予測なら、2.5回に1回くらいの割合で、その事象が実際に起きてほしい。したがって、予測の事例数が増えれば、予測の適否が具体的に見えてくるであろう。ここでは、確率予測の結果をどのように見ていけばよいか、その検証法について考えておこう。

十勝沖では、気象庁が予測を公表し始めた9月26日の午後以降、M7級の余震は結局起こらなかった(表2)。M7以上の余震が3日以内に10%以上の確率で起こるという予測を出したのは10月12日までに14回、7日以内のそれは10月27日までに32回だった。各予測の予測期間はそれぞれ重なっているが、期間が同一でない限り、別々の予測として数えた。

対象の事象が一度も起こらない場合は、取り扱いが簡単になる。例えば「3日以内」の予測値の場合、1から各予測確率値を引いたものをそれぞれ掛け合わせた

表2 2003年十勝沖地震の本震とM6以上の余震

発 生 日 時	マグニチュード
2003年 9月26日 04時50分	M8.0
06時08分	M7.1
15時26分	M6.1
9月27日 05時38分	M6.0
9月29日 11時36分	M6.5
10月 8日 18時06分	M6.4
10月11日 09時08分	M6.1
12月29日 10時30分	M6.0

始した(塚越ほか、2000)。特に2003年には、5月の宮城県沖(宮城県北部沖; M7.1)、7月の宮城県北部(M6.4)、9月の十勝沖と、大きな余震の発生確率予測が相次いで出され、報道でも取り上げられた。これらの予測は、気象庁のホームページ(文献末の注1参

値、 $(1-0.2)(1-0.1)(1-0.2)\cdots(1-0.1)$ を計算すると、0.078を得る。これは、もしも予測の数値が正しければ、それが1回も当たらないのは、8%くらいの確率にすぎないことを示している。「7日間以内」を想定した予測でも同じように計算すると、値はさらに小さくなり、1回も当たらないのは0.05%にすぎないことが見えてくる。この数字を見る限り、十勝沖のM7以上の余震について出された発生確率予測の値は、かなり過大だったと判断される。

一方、予測確率をすべて足し算することも考えておこう。そうすると、「3日間以内」の予測の場合は2.3(合計230%)、「7日間以内」の予測の場合は6.5(合計650%)を得る。これは、平均すると2.3回と6.5回、それぞれ予測が当たる(懸念する大きさの余震が起こる)と期待されていることを示している。実際には1回も当たっていないから、当たり方が少ないことは、この数字からもすぐに分かる。

M6.5以上の発生確率予測は、「3日間以内」が30回、「7日間以内」が39回出された。9月29日11時36分にM6.5が起きており、予測としては、それぞれ3回ずつ当たったことになる。これに対し、予測確率を合計すると、「3日間以内」の予測は6.7、「7日間以内」の予測は12.8を得る。実際に予測が当たった回数(3回)は、それよりもかなり少ない。

30回のうち3回、または39回のうち3回が当たる確率を式で書き表すことは、かなり煩雑になって事実上難しい。それを検討するには、一つ一つの予測について乱数を発生させ、予測が当たるかどうかを模擬的に決めるようなプログラムを作成し、合計で何回当たるかを見る必要がある。例えば、40%の確率で出された予測なら、0と1の間の値をとる乱数を発生させ、それが0.4以下なら予測が当たったものとする。「3日間以内」の30回の予測について具体的に確かめてみると、1回も当たらないのは0.1%未満、1回、2回、3回だけ当たるのはそれぞれ0.4%、1.6%、4.5%くらいあることが分かる。結局、たかだか3回しか当たらないのは7%弱にすぎず、当たり方はかなり少ない。同様の模擬計算(シミュレーション)をすると、「7日間以内」の予測の場合には、たかだか3回しか当たらない確率は、0.01%というわずかな値にしかならない。これらの結果は、M7以上の場合と同様、各予測の確率値が大き過ぎたことを示している。

M6以上の発生確率予測の場合、12月26日までの間に「3日間以内」の予測は44回、「7日間以内」の予

測は48回出されたが、そのうち、実際に当たったのは8回と13回だった。ここでも、確率値の合計から期待される回数、13.8回と22.0回に比べて、いずれもかなり小さい。この場合も、上と同じような模擬計算で定量的に確かめると、それぞれ3%、0.2%という小さな確率値が得られる。

(3) 余震の発生確率を予測するときの問題点

2003年9月の十勝沖地震の余震について出された発生確率予測を振り返ると、予測された確率値から期待されるほどには、大きな余震が起こらなかったことが分かる。これは、予測の確率値が実際よりも過大だったことを示している。結果的に見ると、同じように過大な傾向は、2003年5月の宮城県沖の余震や、7月の宮城県北部の余震の予測でもうかがえる。

現在行われている余震の発生確率の予測では、なるべく小さい余震まで含めて、たくさんのデータを用いて改良大森公式やゲーテンベルク・リヒターの式のパラメータの値を決める。その方が、パラメータを推定する際の信頼度が高まると考えられるからであろう。その上で、ゲーテンベルク・リヒターの式を大きい方へ延ばし、大きな余震の発生確率を算出する。

確かに、改良大森公式やゲーテンベルク・リヒターの式は、確立した関係式として広く知られている。しかしそれは、たくさんのデータがあって初めてよく成り立つ関係である。わずかな数しか起こらない大きな余震のところまでそれらを延ばして当てはめることは、かなり無理があることを否めない。

このような難点を少しでも和らげるためには、改良大森公式などのパラメータを決める際に参照する余震の大きさの下限 M_{\min} は、予測をしたい大きさの M になるべく近づけることが望ましいであろう。逆に言えば、そういうことがしがたい大きな余震、例えば上位10番目くらいまでの余震、あるいは本震との M 差が2.0ないし2.5以内くらいの余震の発生を予測することは、信頼度がかなり下がることをあらかじめ覚悟しておく必要がある。

なお、やや細かい問題点として、次のような限界があることも考えておくとよいであろう。改良大森公式を用いた予測では、余震活動が想定よりも下がると次の期間の予測確率が下がり、逆に、活動が活発になると次の期間の予測確率が上がる。しかし、大きな余震が起こる前に、余震活動が一時的に静穏化する場合があることが知られている(例えば、Matsu'ura(1986))。また、大きな余震が起こると、その余波で、

一時的に小さな余震の数が増えることがある。したがって、予測確率が下がったから安心、上がったから心配、とは必ずしも言えないことに注意する必要がある。

6. 余震の発生回数予測

(1) 余震の発生回数とポアソン分布

改良大森公式は、先に記したように、適当に定めた期間に、その式で取り扱っている大きさの余震が何回起こるかということを示している。

ただし、改良大森公式で計算されたちょうどその数だけ余震が起こるかどうかは分からない。例えば、予測された回数が5回だったとしよう。このとき、実際にちょうど5回起こる確率は、後述するポアソン分布の式を用いて計算すると、18%弱にしかならない。前後の4~6回を加えると50%弱まで増えるが、それでもまだ残りの50%強は、もっと多いか、もっと少ないことになる。

そのため筆者は、適当な幅を与えて発生回数を予測することが役に立つのではないかと考えている。このとき、幅を狭く限定すれば、その予測はしばしば外れてしまうが、余裕を持たせて幅を広くとれば、よく当たる予測になることは言うまでもない。したがってその幅は、予測をどのくらい当てたいかによって決められることになる。それについて議論を進める前に、どうしてポアソン分布が出てくるか、見ておこう。

改良大森公式によって、ある期間に m 回の余震が

起こることが期待されたとしよう。前と同様にそれを N 区間に細分して、それぞれの小区間に懸念する余震が起こる回数が m/N 回になるようにとる。 N が十分に大きければ、これはそのまま、懸念する大きさの余震がそれぞれの小区間に起こる確率を示している。

このとき、合計して x 回の余震が起こる確率は、

$${}_N C_x (m/N)^x (1-m/N)^{N-x}$$

となるが、これは“二項分布”と呼ばれる関数になっている。ここで、 N は適当に定めた大きな数であった。 N を限りなく大きくしていくと、この式は、

$$m^x \exp(-m)/x!$$

という形に近づくことが知られている。これが、ポアソン分布と呼ばれる関数にほかならない。二項分布の式から、 $N \rightarrow \infty$ の極限をとってポアソン分布の式を導くことは、それほど難しくはないであろう。

(2) 余震の発生回数を予測する試み

予測を出す以上は、それがなるべく当たってほしい。そこで筆者は、例えば90%くらいは予測が当たるように、その幅を選ぶことを考えた。それには、期待される回数 m を求めた後、ポアソン分布の5%点と95%点を捜し、それを予測回数の下限と上限に選べばよい。ただし、活動が低下して下限が0に下がったときは、そのままでは0~95%の範囲を取るのと同じになってしまう。想定確率を95%に引き上げてもよいが、想定確率を90%のままに抑えるのであれば、0から90%点までの範囲を取ればよい。

ポアソン分布の例えば5%点と言うのは、 $x=0, 1,$

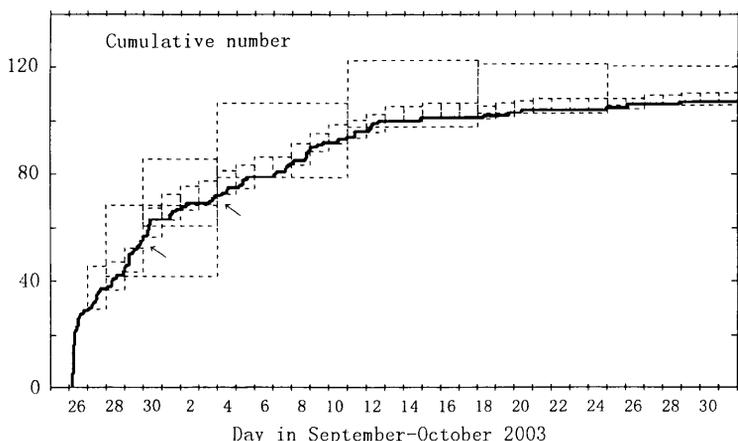


図4 2003年十勝沖地震の余震活動(2003年9月26日~10月31日):震度1以上の余震の累積の数(折れ線、気象庁の資料による)とその発生回数の予測(□)。小さな□は1日ごと、大きな□は1週間ごと(最初の2回は6日間と4日間)の予測数。観測された数が□から飛び出しているところ(矢印)は、予測が外れたことを示す。

2, … のポアソン分布の値を順次計算してそれを積算し、その値が5%を超えるところの x の値を指している。これは、適当な数表を参照するか、筆者が用意した表や近似式 (Yamashina, 2000) を利用してもよいが、ポアソン分布の式を実際に計算して確かめることもできる。

このようにして、かなりよく当たる回数予測が可能になるが、やや問題もある。ポアソン分布の5~95%点をとって、90%くらい当たる回数予測を行ったとしよう。このとき、この予測が実際に90%の確率で当たるかどうか、必ずしも保証されない。改良大森公式のパラメータが、正しく推定できていないかもしれないからである。特に、本震の発生からしばらくの間は、パラメータを確度よく決めるだけのデータ数がそろわないことが多い。また、それだけでなく、観測データの処理が間に合わないために、リストから抜け落ちる余震が少なくないことも予想される。

このような不確かさの程度について、それを客観的に見積もることは難しい。筆者の試みでは、不確かさの係数 α を導入し、 m の代わりに m/α 、および am を考えることにした。 α の値としては、改良大森公式への当てはまりが十分によくなるまで、経験的に1.5を使うことが多かった。活動が落ち着いてくるのを見届けて、 $\alpha=1.2$ 、さらには1.0へ下げることにしたが、十勝沖の活動では、予測が外れるのをなるべく避けたいと考え、かなり後まで $\alpha=1.5$ を用いた。

(3) 余震の発生回数予測の例と予測の適否

2003年の十勝沖地震では、筆者は、9月26日13時から余震の回数予測の試みを開始した。このときの予測は、『9月26日12~24時に M 5.5以上は0~3回、9月27日00~24時に M 5.5以上は0~2回(90%くらいの確率を想定)』という内容であった。実際には、 M 5.5以上の余震はそれぞれ1回ずつ発生し(26日15時26分の M 6.1と27日05時38分の M 6.0)、予測の幅の中に収まった。

9月27日15時には震度の予測も追加され、例えば、『9月27日に震度1以上は1~16回、9月28日に震度1以上は0~10回、9月29日に震度1以上は0~8回』などとされた(想定確率はいずれも90%くらい)。実際には、それぞれ8回、7回、13回の有感級の地震が発生し、 M 6.5ほかの余震が続いた29日分の予測は、外れることになった。

震度1以上の余震回数を1日ごとに予測する試みは、10月31日分まで、35回繰り返された(表3、図

表3 2003年十勝沖地震の余震活動予測: 震度1以上の余震回数予測の例(想定確率90%)

予測日	予測($\alpha=1.5$)とその適否	$\alpha=1.0$ なら	観測
9月27日の予測	9月27日には 1-16回○	3-11回○	8回
	28日 0-10回○	1-8回○	7回
	29日 0-8回×	1-6回×	13回
9月29日の予測	30日 0-10回○	1-8回○	6回
	10月1日 0-9回○	1-7回○	4回
	2日 0-8回○	1-6回○	2回
10月3日の予測	3日 0-8回○	0-5回○	4回
	4日 0-8回○	0-5回○	2回
	5日 0-8回○	0-5回○	4回
10月10日の予測	6日 0-7回○	0-5回○	0回
	7日 0-7回○	0-4回×	5回
	8日 0-7回○	0-4回×	5回
	9日 0-6回○	0-4回○	3回
	10日 0-6回○	0-4回○	2回
	11日 0-6回○	0-4回○	2回
	12日 0-6回○	0-4回○	4回
	13日 0-5回○	0-4回○	0回
	14日 0-5回○	0-4回○	1回
	15日 0-5回○	0-4回○	0回
10月17日の予測	16日 0-5回○	0-4回○	0回
	17日 0-5回○	0-3回○	0回
	18日 0-4回○	0-3回○	1回
	19日 0-4回○	0-3回○	1回
	20日 0-4回○	0-3回○	1回
	21日 0-4回○	0-3回○	0回
	22日 0-4回○	0-3回○	0回
	23日 0-4回○	0-3回○	0回
	24日 0-4回○	0-2回○	1回
	10月24日の予測	25日 0-3回○	0-2回○
26日 0-3回○		0-2回○	1回
27日 0-3回○		0-2回○	0回
28日 0-3回○		0-2回○	1回
29日 0-3回○		0-2回○	0回
30日 0-3回○		0-2回○	0回
31日 0-3回○		0-2回○	0回

4). 予測の幅から外れたのは9月29日分の1回だけで、予測の適中率は97%だった。このように高い適中率は、不確かさの係数 $\alpha=1.5$ を続けて余裕を持たせたことによるが、不確かさを考慮せずに $\alpha=1.0$ としても、90%に近い適中率が得られることが多い。今の場合も、35回中32回は予測の幅の中に収まり、91%の適中率が確保される。ただしその計算では、下限が0に下がった10月3日分以降は、ポアソン分布の0~90%点を取った。その日以降も95%点まで取れば、実際に試みられた予測と同じ97%の適中率を得る。予測が時々外れても構わなければ、不確かさの

係数を特に考えなくてよいのかもしれない。いずれにしても、このように想定に近い高い適中率が実現するのは、余震の発生が、改良大森公式に実際にかなりよく当てはまっていることを証明している。

ここで、「震度1以上」という表現は、「どこかの観測地点で震度1以上」という意味で用いた。身近に大きな地震を経験するような機会に出会ったときは、もよりの特定の地点の震度に注目し、このような予測を自ら試してみるとよい経験になるかもしれない。

7. 終わりに

改良大森公式により、余震活動の活発さを表現することができる。したがって、それを未来に外挿すれば、活動予測が可能になる。ただし、起きたり起きなかったりする現象を相手にしているため、予測には、確率の考えが入ることになる。

改良大森公式を利用した余震活動の予測には、注目する事象が与えられた期間に 1) 起こるか起こらないかを確率的に予測する、または 2) 何回起こるかを予測する、という二つの形がある。前者の場合、ほぼ必ず起こるような事象を予測してもあまり意味がないので、確率の値が低くて希にしか起こらない事象、今の場合には、「大きな余震の発生」を予測することが主眼になる。しかし、希にしか起こらない数の少ない現象は、予測の根拠となる式（改良大森公式および補助的に利用するグーテンベルク・リヒターの式）に実際にどのくらい当てはまるか、その出発点があやふやになることが避けられない。

大きな地震が起きたときには、それに応じた大きさの余震が起こる可能性に、注意を払う必要がある。気象庁が取り組んでいる余震発生確率の公表は、そうした注意を喚起する上で、有用な情報と思われる。もちろん、そこで示される確率の値は、なるべく実態に合っていることが望ましい。例えば、40%や20%の確率が想定されていれば、平均して2.5回に1回、5回に1回の割合で、それらの予測が当たってほしい。

余震の発生確率を公表する気象庁の試みは、開始してからまだそれほど年数が経っていない。2003年の十勝沖の余震活動では確率値が大き過ぎる傾向が見られたが、平均的な傾向から偶々外れただけなのかどうか、経験を重ねていけば、自然に答えが見えてくるであろう。しかし、大きな余震に限定すればするほど、確率値を推測する方法にはかなりの無理がある。それを念頭に置いて、信頼される予測を出す工夫を少して

もできないか、追求していくことが必要と思われる。公表される予測が実際にどのくらい当たるのか、情報を受ける側でも、それを検証しながら見守っていけば、確率現象についての理解がいつそう深まるのではないと思われる。

一方、2) の回数予測は、時々、あるいはしばしば起こるような事象を予測することが中心になる。90%とか95%とか、かなり高い確率で予測が当たるように予測回数の幅を与えれば、その予測が、実際によく当たることを確かめることができる。この場合、被害の追いつきを受けるような大きな余震に備えるという意味合いはかなり弱まるが、余震活動の活発さについてあらかじめ心づもりできれば、被災地において生じやすい必要以上の不安を多少とも和らげることができるであろう。

余震の回数予測については、必要に応じて気象庁も言及することがある。十勝沖の余震の場合、2003年10月9日に『M4.3以上の余震は、今月末には1日当たり1回程度』、12月26日に『M4.3以上の余震の回数は1月下旬には、5日当たり1回程度』と予測され、いずれの場合も、M4.3という大きさは、『ところによって震度1程度を観測する規模』と補足された。

M4.3以上の余震の実際の発生回数は、10月末頃の10日間（10月27日～11月5日）には5回（1日当たり0.5回）、2004年1月下旬頃の10日間（1月22～31日）には0回だった。震度1を記録した余震は、10月27日～11月5日の10日間に5回（1日当たり0.5回）、2004年1月22日～31日の10日間に2回（5日当たり1回）起きている。予測は、だいたい当たったとも言えるし、少し違ったとも言える。先の見通しについてのこのような予測は、今後とも望まれる情報ではないと思われるが、見込まれる回数を示すだけでは、それが当たったのか外れたのかを評価することが難しい。予測値の幅や、そのときに想定される確率の大きさにも言及できれば、予測内容のあいまいさを減らすことができる。

改良大森公式に基づいた余震活動の予測は、特別なことを目指しているわけではない。地震記録に日常的に接している者なら多かれ少なかれ抱くであろう先行きの見通しを、確率的な数値で、定量的に表したものである。しかし、このような定量化は、自然現象の一面を改良大森公式というモデルに当てはめて切り出し、それを通して自然現象を眺め直すことによって実現する。その際、どのような観点から現象を切り出し、

また、それをどのような形で予測として表現するか、課題は多い。本稿では、現在既にできていること、また、問題点として考えていかなければいけないことのいくつかを議論した。よく当たる予測、あるいはいっそう役に立つ予測を実現していくためには、情報を提出する側とそれを受ける側の双方からの提案や希望が、有機的に結びつくことが望ましい。

なお、2004年10月23日17時56分に新潟県中越地震(M6.8; 最大震度7)が発生した。気象庁は、翌24日10時に『本日8時から3日以内にM6.0(ところによって震度6弱~6強)以上の余震の発生する確率は10%, M5.5(ところによって震度5強)以上の余震が発生する確率は20%, M5.0(ところによって震度5弱)以上が発生する確率は30%』などと発表し、大きな余震への注意を呼びかけた。以後、3日以内、および7日以内に大きな余震が発生する確率の大きさが推定され、公表された。推定された確率値の妥当性については後日の検討に委ねられるであろうが、10月25日にM5.8(最大震度5強)、27日にM6.1(最大震度6弱)が起るなど、災害の現場で救援や復旧作業を進める際、その情報が役立てられた。

本稿の作成に当たり、査読者の先生と東京学芸大学の山崎謙介先生には貴重な指摘を多々いただき、原稿を改善することができた。厚く感謝したい。

引用文献

- 細野耕司・吉田明夫(1992): 余震活動の予報. 気象研究所研究報告, **42**, 145-155.
- Matsu'ura, R. S. (1986): Precursory quiescence and recovery of aftershock activities before some large aftershocks. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **61**, 1-65.
- 大森房吉(1894): 余震活動ニ就キテ. 震災予防調査会報告, **2**, 103-139.
- Reasenber, P. A. and Jones, L. M. (1989): Earthquake hazard after a mainshock in California. *Science*, **243**, 1173-1176.
- 塚越利光・細野耕司・若山昌彦・吉川一光・伊藤秀美・吉田明夫(2000): 余震活動確率予測の実践. 験震時報, **63**, 49-74.
- 宇津徳治(1957): 地震のマグニチュードと余震の起り方. 地震 **2**, 10, 35-45.
- 宇津徳治(1999): 地震活動総説. 東京大学出版会, 東京, 876 p.
- Yamashina, K. (2000): Experimental prediction of the number of aftershocks of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **75**, 79-91.
- 山科健一郎(2001): 地震活動の性質. 地震の事典・第2版(第5章), 朝倉書店, 東京, 164-209(初版の刊行は1987年).
- 注1) www.seisvol.kishou.go.jp/eq/seismo.html (気象庁による地震・津波の資料のホームページ). 必要に応じて、余震の発生確率の情報がここに掲示される。気象庁全体のホームページ(www.jma.go.jp)からたどることもできる。

山科健一郎: 地震活動の確率予測—最近の余震活動予測とその課題— 地学教育 58巻1号, 13-22, 2005

〔キーワード〕 余震, 確率予測, 改良大森公式, グーテンベルク・リヒターの式, 2003年十勝沖地震
 〔要旨〕 大きな地震の後に起こる余震活動について, 改良大森公式などの経験則を利用し, 活動を確率的に予測する試みが始まっている. そこで, 2003年十勝沖地震(マグニチュード8.0)の余震活動予測を例にとり, 確率予測を行う手法やその結果を確率的に評価する方法について議論し, 予測の問題点を考える.

Ken'ichiro YAMASHINA: Probability Prediction for Earthquakes: Recent Trials on Aftershock Activity and Several Problems. *Educat. Earth Sci.*, **58**(1), 13-22, 2005

天気予報の確率表現

Probabilistic Weather Forecasts

立 平 良 三*

Ryozo TATEHIRA

Abstract: Weather forecasts are used in various decision-making processes to protect human activities against adverse effects of weather. Since weather forecasts are not always correct, it is essential for decision makers to understand precisely the limitations in the accuracy of forecasts. Probabilistic weather forecasts are considered a most practical way to achieve this objective. At the same time, decision makers need to assess the cost of protection against the adverse weather as well as the loss to be reduced by the protection.

1. 精度を内臓した予報…確率予報

昔から、気象台は天文台とよく間違えられた。共に自然現象を扱い、しかも「台」という字を共有しているためだろうか。

天文関係の予報は、「日の出・日の入り時刻」とか「日食・月食」など、誤差は実用的に無視できる。一方、気象関係の予報は、明治 17 年の天気予報開始以来、しばしば「当たらないもの」の代表として引き合いに出されてきた。

最近、時に「よく当たりますね」という声を聞く

こともあるが、客観的に適中率の推移を見ると、図 1 のようにまだまだ外れがある。終戦以来の 60 年間に、適中率は約 10% 向上して、80% 強にたどり着いたが、このペースを維持できたとしても 100% になるにはあと 100 年はかかる。

もし 100% に届いたとしても、利用者は決して天気予報に満足することはない。なぜなら図 1 の適中率は明日の 24 時間を一括して、予報と実況の降水を比較して適中かどうかを検証しているからである。例えば、明日の日中「降水あり」という予報で、実際には夜に降水があった場合、図 1 では適中としてカウント

東京地方の予報精度(夕方発表の明日予報)

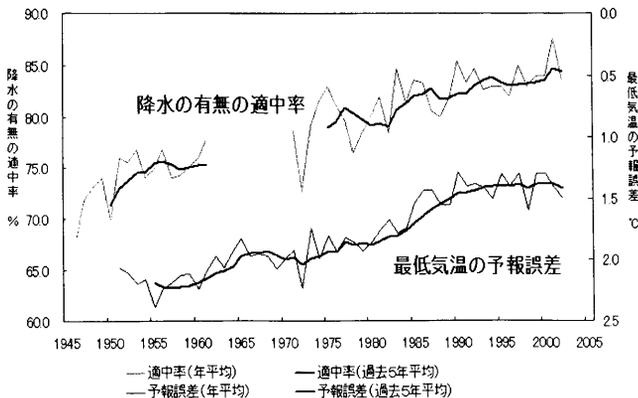


図 1 明日の「降水の有無」および「最低気温」の予報精度の年次変化

* (財)気象業務支援センター 2004 年 9 月 24 日受付 2004 年 12 月 11 日受理

表1 夕方発表された明日の天気予報の分割表 (1992~1997, 全国平均)

予報	実況	降水ナシ	降水アリ
	降水ナシ	59%	10%(見逃し)
降水アリ	8%(空振り)		23%

適中率: 82%

されているが、利用者の実感としては「外れ」であろう。ということで、気象関係の予報は今後とも長期にわたってかなりの誤差を伴うものであることを覚悟しなければならない。

ちなみに、このような誤差の要因としては、大気現象のメカニズムの解明が十分でないこともあるが、最大の要因は観測データが時間的・空間的に不足していることである。近年、レーダーや衛星などが登場しているがまだ十分ではない。

天気予報のような誤差が不可避の情報を効果的に利用するには、その誤差についての的確な認識が必要である。明日の天気予報の利用者は、経験的にその適中率について大よその数値(%)を承知しているものと思われる。しかしその経験的適中率はかなり主観的で、行過ぎた不信や過信になりがちである。また図1のような適中率を認識しているだけでは、適切な利用には十分でない。

明日の天気予報の誤差を利用者に伝えるには、表1のような分割表が実用的である。分割表のメリットの一つは、2種類の外れ、つまり「空振り」と「見逃し」を分離して表示していることである。

- ・「空振り」…「アリ」と予報して降らなかった
- ・「見逃し」…「ナシ」と予報して降った

図1の適中率にはこの情報はない。利用者にとって、この2種類の外れによって被る損害は一般に大きさが異なるので、分離して表示することが不可欠である。

例えば「明日は雨」という予報を聞いて、それがどれくらい信頼できるかは、平均の適中率が図1のように82%程度だから、その程度と考える人もいよう。しかし、表1の分割表によると、「降水アリ」と予報して実際に降った比率は

$$23/(23+8)=74\% \cdots \text{「アリ予報の適中率」}$$

と計算され、平均適中率82%より低い。一方、「降水ナシ」と予報して実際に降らなかった比率は

$$59/(10+59)=86\% \cdots \text{「ナシ予報の適中率」}$$

と計算される。つまり、予報の信頼度は「降水アリ」

か「ナシ」かで12%もの差があるということである。通常の適中率だけではこのような信頼度情報は得られない。

「明日は雨」という予報は原則として雨の降る可能性が50%以上と予想されたときに発表される。だから、日によって50%すれすれのこともあれば90%を超えると確信の持てる日もある。であれば、その確信の度合いをそのまま発表すればより詳細に予報の信頼度を利用者に伝えることができる。これがつまり確率予報であって、予報のたびごとにその精度を表示する精度内臓型の予報なのである。

断定型の予報というのは、先に計算した「アリ予報の適中率」「ナシ予報の適中率」の値から、

- ・「アリ予報」のときは「降水確率74%」
- ・「ナシ予報」のときは「降水確率14%(100% - 86%)」

という確率予報と等価であることが分かる。結局、断定型予報と言うのは、たった二つの確率値しか予報しない確率予報である。

確率予報のほうは、50%を境として「アリ」「ナシ」と翻訳すれば通常の断定型の予報になる。しかし、断定型予報から確率予報を導くことはできない。このことから確率予報はより情報価値の高い予報であることが分かる。さらに、予報を最大限に利活用するためには、確率形式が要求されることを次節で説明しよう。

2. 確率予報による意思決定

我々は大気中に生存しており、風雨や寒暖などの大気現象は人間活動に大きな影響を及ぼす。今後の大気現象の変化が分かれば、それに備えて災害を避けたり、逆にその変化を有効利用しようとする。どのような災害防止あるいは有効利用のための対策を取るべきかを天気予報によって意思決定すること、これが天気予報の利用のエッセンスである。卑近な例を挙げれば、朝の天気予報を聞いて「傘を持つかどうか」「洗濯物を干すかどうか」の意思決定をするといったことである。もっと社会的・経済的に重大な意思決定も天気予報(特に各種の警報)によってなされている。

天気予報を利用して、対策の意思決定をする際に問題になるのは、天気予報が時々外れる、つまり誤差を含むことである。対策には必ず有形無形のコストがかかる。天気予報をいつでも信用して対策をとると、外れたときに対策コストが無駄になる。かといって、天気予報を無視していつも対策をとらないでいると、天

気予報どおりに大気現象が発現したときに、大きな損害を被ることなる。

では、天気予報による意思決定をどのようなルールでやれば最も適切な(最も有利な)結果が得られるのだろうか。天気予報利用者は多種多様で、また時と場合によって状況が違うので統一されたルールを導くことは容易ではない。そこで、意思決定の状況を簡単なモデルに集約し、ルールを導くという手法が用いられてきた。

最も単純なモデルは「コスト/ロス・モデル」と呼ばれており、対策をとることにより「損失が軽減」(あるいは「利益が増大」)できるという状況を想定している。対策にかかるコストを C とし、その対策によって軽減できる損失(ロス)を L とすると、その比 C/L (コスト対ロス比)が意思決定に重要な因子になるというものである。

コスト/ロス・モデルの場合、最適な意思決定のルールは次のように表される。

$$P > C/L \quad \text{のとき対策} \quad (1)$$

ここで、 P は問題にしている大気現象。例えば降水が発生する確率である。

このルールは次のようにして導かれる。発生確率が P と予報されたケースが N 回あったとしよう。このすべての回で対策をとったとすると、対策費の合計は $C \times N$ である。一方、 N 回のうちで現象が実際に発生する回数は、 N が十分大きければ $N \times P$ と考えてよい。現象が発生したとき対策をとってれば損失は L だけ軽減できるわけだから、損失軽減額の合計は $N \times P \times L$ である。これが対策費の合計を上回るようなら、対策をとった方が有利なわけだから、「対策」をとると意思決定すべきである。したがって、意思決定のルールは、 $N \times P \times L > C \times N$ となる。これを整理すれば、式(1)となる。

ここで注意しなければならないのは、式(1)を導く際に、 N を十分大きいとしていることである。つまり多数回の平均の利益(利益の期待値)が、式(1)のルールに従った場合に最大になるということである。だから、小数回の場合の意思決定にはそのまま適用できない。

さらに、現象の発生回数を $N \times P$ としていることは、確率予報値 P の信頼度が高いこと、つまり発生確率60%という予報が100回発表されれば、約60回は実際に発生することが検証されていなければならない。ちなみに気象庁の降水確率予報については、信頼

度は十分高いことが確かめられている。

気象庁から定期的に発表されている降水確率予報を例にとってコスト対ロス比(C/L)がどんな値になるか具体的に考えてみよう。老人など体の弱い人が雨に濡れることは辛いことでそのロス L は大きく、傘を持参する負担(コスト C)に比べ十分大きいと考えられる。つまり C/L は0.2(20%)とか0.3(30%)といった小さな値となろう。一方、普段着の元気な若者などの場合は、多少濡れてもロスは小さく、むしろ傘を持ち歩く負担の方を大きく感じるだろう。つまり、この場合はコスト対ロス比(C/L)は0.7(70%)とか0.8(80%)といった大きい値になろう。

ここで、式(1)のルールを適用すれば、

- ・老人など弱者: 降水確率予報20%程度でも傘を持つ
 - ・元気な若者: 降水確率予報80%以上で傘を持つ
- といった対応が適切だということになる。このような対応は、50%を境に「降水アリ」「降水ナシ」と発表する通常の断定型予報では不可能である。

実際に天気予報を利用する際、コスト/ロス・モデルをそのまま適用できるような単純なケースは少ない。しかし、コスト/ロス・モデルの基本的な考え方を応用して、より複雑なケースについても、予報の効果的な利用の研究が進められている。

3. 確率予報による意思決定の実例

ここでは一例として、シドニー空港の悪天予報を利用して航空機の燃料積載量を決定し、ダイバージョン(悪天による着陸空港変更)による損失をどれくらい軽減できるかを検討してみよう(Leigh, 1995)。

航空機はシンガポール空港を出発するとき、シドニー空港の悪天予報を入手し、着陸時に悪天が予想されているようなら、予備燃料を積載するという対策をとる。このとき当然コストがかかるが、予備燃料を積載しておればシドニー空港の周辺でしばらく待機して悪天の隙間について着陸できることが多い(90%)。積んでいないと、直ちにダイバージョンで代替空港へ向かわねばならないので、大きな損失を被る。

以上のようなコストとロスの関係は表2のコスト(損失)マトリクスで表現できる。このようなマトリクスによる表現では、コスト/ロス・モデルよりもより現実に近い状況も扱うことができる。

空港予報の精度は表3の分割表で示される。適中率は96.4%と極めて高いが、これは悪天の度数が3%

表2 シンガポール～シドニー航路における予備燃料搭載に関するコスト（損失）マトリクス (Leigh, 1995)

単位はオーストラリア \$.

シドニー空港の天気実況	対 策	
	予備燃料搭載	予備燃料ナシ
悪 天 (予備燃料必要)	(a)=6000	(b)=33000
好 天 (予備燃料不要)	(c)=2700	(d)=0

- (a) : まずシドニー空港に着陸を試み、駄目なら代替空港ブリスベンに着陸することにより発生するコスト、および予備燃料を搭載するコスト。平均10回に1回はブリスベンに着陸する。
- (b) : シドニー空港への着陸を事前に断念し、代替空港ブリスベンに着陸することにより発生するコスト
- (c) : 予備燃料を搭載するコスト

表3 シドニー空港における悪天予報の分割表 (Leigh, 1995)

シドニー空港の天気実況	空 港 予 報		計
	悪 天 (予備燃料必要)	好 天 (予備燃料不要)	
悪 天 (予備燃料必要)	1.2%	1.8% (見逃し)	3.0% (悪天発生度数)
好 天 (予備燃料不要)	1.8% (空振り)	95.2%	97.0%

と小さいからである。このような希な現象の予報の場合、適中率で予報精度を判断することはできない、例えば毎回「悪天ナシ」と予報していても、適中率は97%と高率になる。適中率という尺度が誤解を生じやすいことの一例である。1節で説明した「アリ予報適中率(悪天と予報して実際に悪天になった%)」を計算すると、40%と低い値となり、悪天予報の難しさが明らかになる。

表2の損失マトリクスと表3の予報分割表の対応する欄の数値を掛け合わせ、合計すると悪天予報に従って予備燃料を積載した場合の損失の期待値が計算できる。実際に計算してみると、

$$(\$6000 \times 1.2 + \$33000 \times 1.8 + \$2700 \times 1.8) / 100 = \$715$$

となり、予報を無視していつも予備燃料を積載しなかった場合(\$990)に比べ一定の損失軽減ができたことになる。この損失軽減額(\$990-\$715=\$275)は悪天予報の経済価値とみなすことができる。

この例の場合、表2の損失マトリクスによると、空港悪天時に予備燃料を積載していないと\$33000という莫大な損失を被る。このような損失は悪天予報が悪天を「見逃し」した場合に生ずる。つまり、表3の分割表で、「見逃し」「空振り」は共に外れではあるが、

見逃しの方が特に甚大な損失をもたらすということである。

それなら、予報官はもっと「見逃し」を減らすよう努力せよということになるが、予報技術のレベルが同一の場合、「見逃し」を減らせば必然的に空振りが増大する。その状況を図2に示す。これは、「6時間刻みの降水の有無について」、現行の降水確率予報を断定型予報に翻訳して計算している。「見逃し」を減らそうとすれば、20%とか30%といった小さな確率を境(閾値)とし、それ以上の発生の可能性が予想されるときに「アリ」と予報すればよい。「見逃し」と「空振り」はシーソー関係にあることが理解できよう。

シドニー空港の悪天予報の場合、もし9%以上の発生確率があれば「悪天」と予報することにすれば、分割表は表4のようになることが図2より類推される(立平, 1999)。「見逃し」は1.8%から0.23%に激減したが、「空振り」は10%近くまで増大している。適中率は90.8%に低下し、表3の予報より劣るのではないかと錯覚させる。しかし、表4に従って予備燃料を搭載した場合の期待損失は、これと表2のマトリクスを掛け合わせて\$485と計算され、現行の悪天予報のときの\$715に比べ大幅に損失軽減できることが分かる。ちなみに、完全に適中する予報があったとしたら、それに従って予備燃料を搭載すれば損失は\$180に抑えられる。

以上のように、シンガポール～シドニー航路では、閾値9%の悪天予報は損失軽減にもっと有効であった。ここで9%というのは、表2の損失マトリクスから最適の閾値として導かれたものである(立平, 1999)。他の航路、あるいは他の機種など、条件が違えば、閾値を調整しなければならない。しかし、悪天予報を確率表現にしておけば、「悪天確率予報の%がそれぞれの航路や機種に応じた最適の閾値を超えたら予備燃料を積載する」という対応で済む。

最近、オーストラリアの空港で予報官が悪天予報を確率形式で発表する実験が行われた。それを利用して予備燃料積載の意思決定をした一例を図3に示す

表4 シドニー空港における悪天予報の分割表 (確率閾値9%の場合)

シドニー空港の天気実況	空 港 予 報		計
	悪 天 (予備燃料必要)	好 天 (予備燃料不要)	
悪 天 (予備燃料必要)	2.77%	0.23% (見逃し)	3.0% (悪天発生度数)
好 天 (予備燃料不要)	9.0% (空振り)	88.0%	97.0%

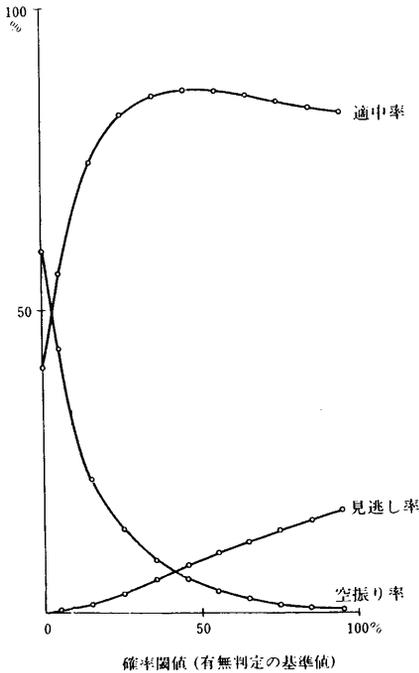


図2 降水確率予報から変換したカテゴリー予報 (降水の有無予報) の精度 (立平, 1999)

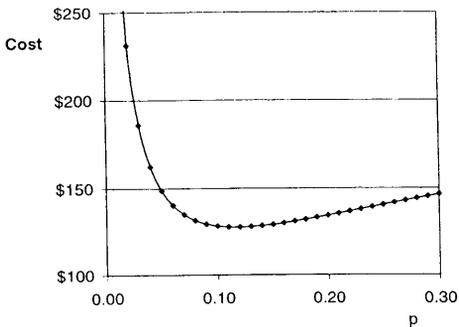


図3 シンガポール～メルボルン航路における予備燃料搭載に関するコスト
横軸は確率閾値 (P) で、予報された確率がこの値を超えたとき、「予備燃料搭載」と意思決定するものとする (Keith, 2003).

(Keith, 2003). このケースでは、悪天になる確率が0.10 (10%) 程度を閾値として予備燃料を積載すると最も損失を小さくできることが分かる。通常の断定型の悪天予報のように50%付近を閾値にした場合に比べ、かなりの損失軽減になることが読み取れる。

4. 確率予報のメリットのまとめ

確率形式の予報のメリットもう少し一般的な形で説明しよう。図4は確率予報および断定予報 (カテゴリー予報ともいう) を利用して対策の意思決定をした場合に得られる利益 (あるいは減らせた損失) をグラフにしたものである (立平, 1984)。この利益 (あるいは損失) は利用者のコスト/ロス比とともに変わるの、横軸にはこの比をとってある。

意思決定のルールは、確率予報の場合は、式(1)のように、発生確率 P がコスト/ロス比 C/L より大きいと予想されたとき対策をとるものとする。カテゴリー予報の場合は、「発生アリ」と予報された場合に対策をとるものとする。

ここで、確率予報としては、現行の6時間ごとの降水確率予報を例にとり、カテゴリー予報としては、この確率予報が「50%以上」のとき「発生アリ」、「50%未満」のとき「発生ナシ」として作成するものとしている。参考のため、完全に適中する予報の場合も示してある。縦軸の利益は「対策により軽減できる損失」を単位として表現している。

図4から読み取れる確率予報とカテゴリー予報の特徴を列記しよう。

- 1) どのコスト/ロス比についても、利益の大きさ

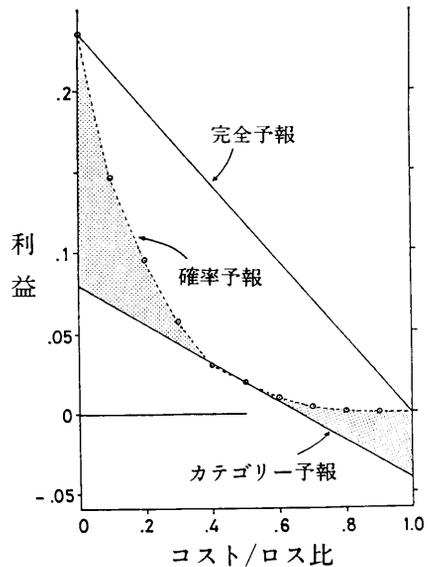


図4 確率予報、カテゴリー予報および完全適中予報に従って対策をとった場合の利益の期待値 (立平, 1999)

は「完全適中予報>確率予報>カテゴリー予報」である。

- 2) カテゴリー予報に従うと、コスト/ロス比が約0.7より大きい場合、対策をとることによりかえって損をする(利益がマイナス)。つまり、対策費がそれにより軽減できる損失額を上回ってしまうということである。確率予報に従っておれば、利益がマイナスになることはない。
- 3) コスト/ロス比が小さくなると、確率予報の利益は完全予報の利益に限りなく近づき、カテゴリー予報の利益を大きく上回ることになる。例えば、大雨の際の避難などは、コスト/ロス比が極めて小さい対策であり、確率予報が有効な例である。また、3節の「悪天に備える予備燃料搭載」もこの類である。

以上のことは、コスト/ロス・モデルが適用できるような状況の下では、降水確率予報に限らず、確率予報一般について言えることである。

このように、確率予報の優位性は疑いのないことであるが、一方で確率予報は分かりにくいとか、誤解を生じやすいといった声もある。確率というのは、ある事象(ここでは降水などの天気現象)が発生する可能性の大小を示すもので、確率予報は事象発生に対する予報官の自信の度合いと考えても実用上問題ない。

現行の降水確率予報で事象の定義は「6時間内にある地点で1mm以上降ること」であるが、これが正しく認識されていないために生ずる誤解が多い。その原因の一つは、降水確率予報が「神奈川県東部」といった地域ごとに発表されているところにある。

「神奈川県東部60%」という予報は、正確に言えば「神奈川県東部に含まれる各地点における降水確率はすべて60%」ということである。可能なら「神奈川県東部60%」ではなくて、せめて川崎、横浜、鎌倉などもっと細かく予報したいところだが、予報技術の水準からしてそのように細分しても意味がない。

地域ごとの発表のため、「神奈川県東部60%」を、「神奈川県東部のどこかで降る確率60%」と誤解されることがよくあった。「神奈川県東部のどこかで降る確率60%」といった形式の予報は「地域確率」予報と呼ばれ、気象庁の発表する「大雨確率」や「発雷確率」はこのタイプである(表5)。共に都府県をいくつか分割細分した地域に対して発表される。一方、降水確率予報のようなタイプは「地点確率」予報と呼ばれている。

降水確率予報については、「降水確率60%」を「対象とする6時間のうちの60%の時間に降る」といった誤解もある。現行では、「6時間のうちの10%の間でも確実に降る」と予想されれば、降水確率予報は「100%」と発表される。これらの誤解は、確率についての知識不足、馴染みのなさというよりも、降水事象の定義をよく理解していないことに起因するものである。

5. 確率予報を作成する技術

気象庁の発表する各種の確率予報(表5)を作成する技術は、すべて数値予報を基礎としている。数値予報というのは、気象観測データを基にして現在の大気の3次元的な状態を解析し、それが各種の物理法則に従って時間的に変化する状況をコンピュータで数値シミュレーションすることにより、将来の大気の状態を予測する技術である。

過去のある地点における気圧・気温・湿度・風などの数値予報結果(Model Output)と、それに対応する過去の気象観測データ(降水や雷など)の間の統計的関係式を求めておき、日ごとの数値予報の結果にこの関係式を適用して、天気予報に含まれる各種の予想値を求める技術をMOS(Model Output Statistics)といい、30年ほど前から実用化されている。MOSによれば、降水確率や発雷確率などの予想値も次のようにして計算することができる(立平, 1984)。

ある地点で降水があったときは「100」、なかったときは「0」という数値を気象観測データとみなし、MOSの統計的関係式を求めておく。これに日ごとの数値予報結果を代入すれば降水確率の予想値(%)が計算できる。また、発雷の有無も、「100」「0」と数値化して統計的関係式を導いておけば、発雷確率の予想

表5 気象庁の発表している確率形式の予報の種類

降水確率予報(地点確率)	1次細分区域	6時間刻み
大雨確率予報(地域確率)	2次細分区域	3時間刻み
発雷確率予報(地域確率)	2次細分区域	3時間刻み
週間降水確率予報(地点確率)	府県予報区	1日刻み
台風の暴風域に入る確率	2次細分区域	3時間刻み
1ヶ月予報の確率表現	地方予報区	1~2週間刻み
3ヶ月予報の確率表現	地方予報区	1ヶ月刻み

1次細分区域というのは、府県を数区分した地域、2次細分区域は1次細分区域をさらに数区分した地域。

値(%)が求められることになる。

数年前から、1カ月予報や3カ月予報といったいわゆる長期予報の分野にも確率形式の予報が付加されるようになった。これらの確率予報の技術としては、以下に述べるようなアンサンブル数値予報が用いられている。

気象観測データに基づいて解析された現在の大気の状態(初期値)は現実の大気と比較して、何がしかの誤差を含むことは止むを得ない。この誤差は、いわゆる大気のカオスの性質によって将来の状態をシミュレーションする際に時間とともに急速に拡大する。そこで、観測誤差程度のわずかの差のある多数(数十程度)の初期値解析からスタートして将来の状態の数値シミュレーションを行い、その結果を平均することにより精度を向上させようというのがアンサンブル数値予報である。さらに、その結果のばらつきの程度から、予報の信頼度(つまり確率)を導くことができる。

6. 確率予報の普及へ向けて

気象庁の発表する確率形式の予報は表5のようにかなりの種類がある。しかし、降水確率予報以外はマスメディアで取り上げられることはほとんどない。その理由としては、利用者が「確率形式に馴染んでいない」「確率予報のメリットが理解されていない」などが考えられる。

降水確率予報が発表され始めてもう20年を経過するが、今でも確率予報のメリットの認識は十分とは思えない。防災活動や経済活動など各種の人間活動において、天気予報を利用して意思決定する際に、確率形式の予報が優れていることは、3節の空港悪天予報の場合や、4節の図4でも明らかである。

しかし確率予報のメリットは、対策のコスト C や対策による損失軽減額 L 、あるいは表2のような損失マトリクスを利用者側できちんと把握できていて初めて顕在化する。このような準備の必要性が認識されていないことが、確率予報の普及を妨げる大きな要因と思われる。

天気予報の利用者は、常に「天気予報の精度向上」を気象庁や民間気象会社に要望している。確かに完全適中予報なら、その利用は容易であろう。しかし、その実現ははるか先のことでであろうから、天気予報の効果的な利用には、気象庁や民間気象会社など提供者側の努力とともに、一般市民や企業など利用者側でも対

策のコスト/ロスの把握など利用のための準備が必要である。

気象庁の発表する確率予報は表5に限られるが、個々の利用者の多様な意思決定システムの入力として必ずしも適合するものではない。気象庁の予報は一般向け(万人向け)のものであり、個々の利用者は特別注文の予報を利用することによってより優れた意思決定が可能になる。民間気象会社はこのような特注の予報の提供者であり、意思決定の優劣が企業利益に大きく影響する場合は、民間気象会社と契約するわけである。

どのような確率予報を特別注文するのが最適かを知らするためには、企業側と民間気象会社が協同して、想定される天気対策についての「コストとロス」を分析する必要がある。

「コストとロス」の分析にあたり、よく議論になるのはロスの中に人的被害が含まれてくる場合の扱いである。交通事故の際の保険金を参考に人命を評価するなどの試みはあるが、ケースバイケースで慎重に扱わねばならない。

物的損失の場合でも、その金銭的な評価額をそのままコスト/ロス・モデルにおけるロスとして扱えない場合もある。例えば、対策をとらなかった場合に生ずるロスが、企業の存続にかかわるような大きなものだとしたら、対策の意思決定にコスト/ロス・モデルをそのまま適用することはできない。つまり、このような場合には、その企業にとって金銭的に表示された額以上の重みがあるわけである。

このような状況に対応するために、金額の代わりに「効用(Utility)」という尺度を導入し、効用の値でコスト/ロス・モデル的な考察を行うといった手法がとられる(立平, 1999)。

引用文献

- Keith, R. (2003): Optimization of Value of Aerodrome Forecasts. *Weather and Forecasting*, **18**, 808-824.
 Leigh, R. L. (1995): Economic Benefits of Terminal Aerodrome Forecasts for Sydney Airport, Australia. *Meteorol. Appl.*, **2**, 239-247.
 立平良三・保科正男(1984): 確率予報. 気象研究ノート, **150**, 1-22.
 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, 142 p.

立平良三：天気予報の確率表現 地学教育 58 巻 1 号, 23-30, 2005

〔キーワード〕 確率予報, コスト/ロス・モデル, MOS, コスト(損失)マトリクス, 分割表, 適中率

〔要旨〕 天気予報の利用に際しては, 誤差, つまり時々外れることを認識しておく必要がある。誤差を含む天気予報の利用, つまり予報によって天気に備える対策を意思決定するには, 天気予報の誤差が利用者に的確に提供されねばならない。その最も実用的な手段が降水確率予報のような天気予報の確率表示である。一方, 利用者側でも, 適切な意思決定のために, 対策のコストや対策によって防げる損失(ロス)をあらかじめ調査しておくという準備が不可欠である。

Ryozo TATEHIRA: Probabilistic Weather Forecasts. *Educat. Earth Sci.*, 58(1), 23-30, 2005

地質現象に見られる確率過程とシミュレーション

Stochastic Process in Geological Phenomena and Its Simulation on a Computer

青野 宏美*

Hiromi AONO

Abstract: We performed a computer simulation of the accumulation of geological strata using the Monte Carlo method. Using this method, we can reconstruct present stratigraphic phenomena, based on past geological processes, as well as predict future phenomena. It is important that we can apply the results of the simulation to a complex natural system, even though the underlying physical phenomena affecting the system are not necessarily clarified. The computer simulation of the development of a geological column is interpreted in detail, with a concrete example in this paper. This model is a useful tool for Earth Science education.

Key words: geological phenomena, stochastic process, Markov chain, Monte Carlo method, computer simulation

1. はじめに

地質現象には、時空間的な連続性をもつさまざまな現象が見られる。これらの地質現象は、ある確率過程に従い、次に生じる現象が直前の現象に左右されて起こることが多い。こうした確率過程をマルコフ過程と考へて、解析を行うと地質現象のシミュレーションの基礎となるデータが得られる。野外調査によって得られたデータからモンテカルロ法によって、コンピュータに乱数を発生させて、この確率過程をシミュレートすれば、莫大な量のデータを瞬時に解析し、地質現象を再現または復元できる。ここでいう、モンテカルロ法 (Monte Carlo method) とは、「反復計算と乱数を用いて、数値実験によって問題の近似解を求める数学的手法。コンピュータで乱数を大量に発生させて、複雑な問題を解く。運まかせのゲームに似ていることから、カジノで有名なモンテカルロの地名をとって名づけられた」(日経 BP 社, 2003) とある。モンテカルロ法は、フォン・ノイマン (V. Neumann) やウラム (S. M. Ulam) によって 1945 年頃から用いられ、「確定的な問題を乱数を利用して解くこと」とされたが、今日

では「決定的および確率的な問題の処理に、無作為抽出を用いること」と定義されている (武隈, 1975)。移動する粒子の運動の様子から、ランダムウォーク (酔歩) と呼ばれることもある。

モンテカルロ法のシミュレーションには、1 次元・2 次元・3 次元・ \dots n 次元での過程がある。1 次元の例としては、時系列の要素が連続して並ぶ柱状図や、遺伝暗号である DNA の塩基配列、楽譜の音符や言語などがある。柱状図での地層の積み重なり方に規則性があるのか否かを判定することは難しい。一見ランダムに見えても、規則的に積み重なることもある。房総半島に分布する上総層群中のタービダイトと呼ばれている乱泥流堆積物もモンテカルロ法によって復元できる。これらの地層は完全にランダムに積み重なっているのではなく、堆積場ごとの堆積環境の違いを反映している (青野, 2003)。

平面である 2 次元の地質現象の例としては、火山灰の分布 (宮地, 1988) やタービダイトを主とする深海扇状地の広がり (徳橋, 2002)、網状河川の形態 (Rachochi, 1981)、砂州や砂嘴の発達過程 (King and McCullagh, 1971; 宇田・山本, 1992) などがあ

3次元の例としては、マグマの噴出による火山体などの立体的な地質現象があげられる。2章以降では、1次元での確率過程とモンテカルロ法によるシミュレーションについて解説する。

2. 地質データの解析法

地質資料に見られる情報から、有効なものを選択して可視化するには、ある種の選択眼が必要である。つまり、精選されたデータをグラフ化したものでは、一瞥してわかりやすいか否かが勝負となる。また、データどうしがどれくらい似ているのかを判別することも重要である。この地質情報を可視化したときの類似性(類似度)を判定する方法(青野, 2002)を応用することにより、地質調査で得られたデータの解析が効率的にできる。統計的なデータ解析法である堆積層解析の手法として、時系列解析(石原・徳橋, 2002)、マルコ

フ解析(Davis, 1973; Hattori, 1976a; 牧野・増田, 1978; Hiscot, 1980; Allen, 1982; 青野, 2003)、エントロピー解析(Hattori, 1976b; 青野・桂, 1995)、クラスタ解析(八田, 1979; 青野, 2002)などがあり、表計算ソフトのエクセルで簡単に計算できる。

3. 地層中の堆積相のマルコフ表示

地層は、時間の経過に伴って地層累重の法則により、一般的には上に積み重なる。その各堆積相間の推移は確率過程であり、マルコフ過程として取り扱うことができる。これは、ある時点において堆積した地層中の堆積相が、その直前に堆積した地層中の堆積相に確率的に依存することを意味する。マルコフ解析により各堆積相の異なる堆積環境間の相違を明らかにし、堆積盆における乱泥流の堆積作用の根本的な特徴をより明確にできる。乱泥流堆積物は、タービダイトとも

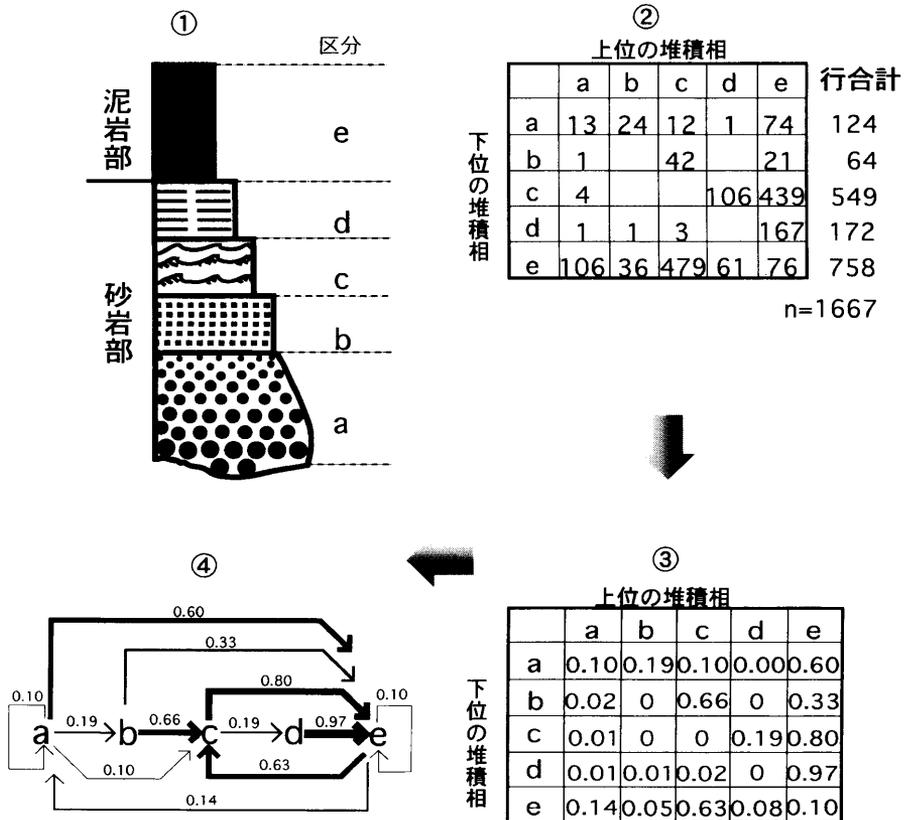


図1 モンテカルロ法による1次元のシミュレーション過程
地質データからマルコフ鎖を作成する。①ブーマ・シーケンス(Bouma, 1962), a: 級化層理部, b: 下部平行葉理部, c: 斜交葉理部, d: 上部平行葉理部, e: 泥相部, ②推移頻度行列F, ③推移確率行列P, ④マルコフ鎖。

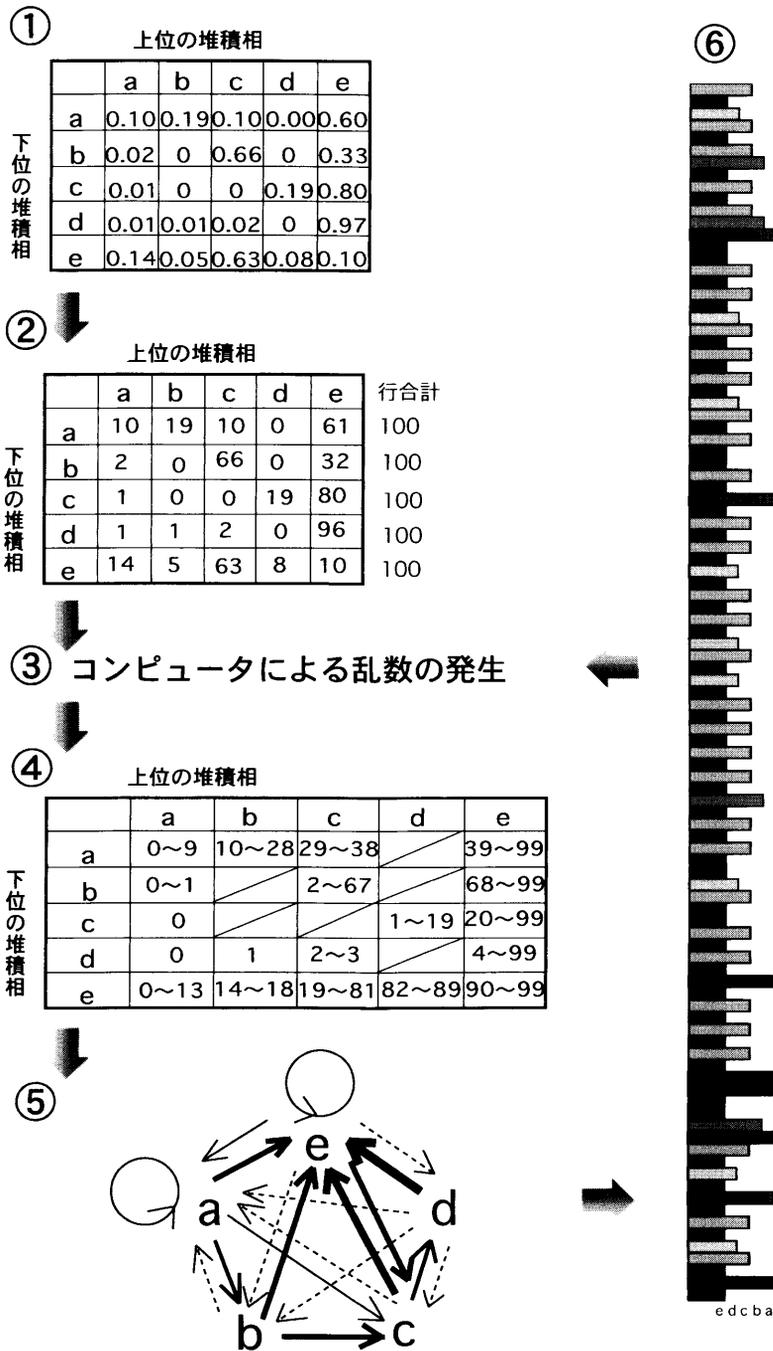


図2 モンテカルロ法による1次元のシミュレーション過程
推移確率行列 P から柱状図を復元する。

①推移確率行列 P の選定, ② $P_{ij} \times 100$ を計算, ③0~99 までの乱数を発生, ④乱数による次の条件の行き先の決定, ⑤ランダムウォークを繰り返す, 矢印の太さは, 推移確率の大きさを表す, ⑥下位の堆積相から積み上げて疑似柱状図を作成し, 必要な回数だけ③~⑥の手順を繰り返す。

呼ばれ、水中での重力流あるいは密度流によって海底または湖底などに堆積し砂泥互層を形成する。典型的な乱泥流堆積物は、クラシカルタービダイト (Stow, 1985) と呼ばれており、特徴的な堆積構造をもつブーマ・シーケンス (Bouma, 1962) が見られる (図1の①)。これらの区分 a~e の堆積構造がすべてそろっていることは、むしろまれであり、1枚のタービダイトの中には、ae, abe, abce …, cde, de などの連続した堆積構造が露頭で観察されることが多い。また a→a のように、自分自身に戻る場合もありうる。これは、侵食面を挟んで、乱泥流堆積物が上位に重なるためである。堆積相解析を行うに当たり、乱泥流堆積物中のブーマ・シーケンスの区分 a~e を推移頻度行列 F 、推移確率行列 P の要素として用いた。推移確率行列 P から各シーケンス間の遷移確率を示すマルコフ鎖を作成するには、次の(1)~(3)の手順で行えばよい。この行列 P は、房総半島上総層群に分布する深海平坦面の堆積環境を示す堆積物の例である (青野・桂, 1995)。

(1) ルートマップや柱状図をもとに、ある堆積相から次の堆積相への変化の頻度をカウントし、各要素を F_{ij} (i, j は自然数) とする推移頻度行列 F を作成する (図1の②)。

(2) 推移頻度行列 F に基づき、推移確率行列 P を計算する。行列 P の各要素 P_{ij} は、行列 F の各要素 F_{ij} を行合計 F_i で割ったものである (図1の③)。

$$P_{ij} = F_{ij} / F_i = F_{ij} / \sum_{j=1}^5 F_{ij}$$

(3) 行列 P に基づき、各層 (シーケンス) の推移確率をグラフとして表現したマルコフ鎖を作成する。上位の堆積相へ移行する確率が高いほど太い矢印の線を用いて表す (図1の④)。

マルコフ鎖表示では、a~e の各要素間の推移関係が読み取れるが、各堆積環境どうしのマルコフ鎖を比較した場合、それらの類似性を判定することは難しい。マルコフ鎖は、推移確率行列 P を可視化したものであるが、これらの行列の類似性を比較するには、クラスト解析 (八田, 1979; 青野, 2002) が必要となる。

4. モンテカルロ法による柱状図の復元

まず、復元すべき地質柱状図の基礎となるデータを選定する。ここでは、推移確率行列 P (図1の③) をもとにして、この推移確率の値に基づいて、ランダムウォークを行い、柱状図を復元する。条件としては、 5×5 の行列とし、ブーマ・シーケンスの a~e の積み

重なり方のみに着目し、地層の厚さは無視する。地層の一定の厚さごとに堆積相のデータを拾う方法もあるが、圧密による影響の差もあるので、地層の厚さが必ずしも堆積に要した時間を表すとは限らない。よって、ここでは各堆積相の積み重なり方の順だけを問題としているのである。復元の具体的な手順を以下に記す (図2の①~⑥)。

①復元するデータの選定 (図2の①)。

②推移確率行列 P の各要素 P_{ij} の値を 100 倍する。さらに、区分 e の列の値を調整して、行合計が 100 となるようにする (図2の②)。

③コンピュータを用いて、0~99 までの乱数を発生させる (図2の③)。

④区分 a~e のどこからスタートしてもかまわないが、柱状図の最下位として、まず始めに、泥相である区分 e からスタートする。始めの乱数の値によって、0~13 ならば a へ、14~18 ならば b へ、19~81 ならば c へ、82~89 ならば d へ、90~99 ならば e を最初の区分 e の上に重ねて柱状図に記載し、次の区分の条件に飛ぶ (図2の④)。

⑤ a~e までの各区分の条件に従って、次の乱数の値を④と同様に処理し、柱状図に区分 a~e のいずれかを復元柱状図の上位に重ねて記載して、次の区分の条件へ飛ぶ。③~⑤を任意の回数だけ繰り返す (図2の⑤)。例えば、乱数の値が、10, 68, 26, 3, 97… の順に出たとすると、復元した柱状図は、e→a→e→c→d→e→…となる (図2の⑥)。

⑥復元した疑似柱状図をプリントアウトする。ここで復元された柱状図は、ブーマ・シーケンスの区分 a~e の積み重なり方の要素だけを抽出した地層の厚みをもたないものとなることに注意する必要がある。

5. おわりに

モンテカルロ法によるシミュレーションの利点は、過去の地質データから現在の現象を再現できるだけでなく、将来の形態をも連続再生して予測が可能な点にある。物理的な過程が必ずしも明らかになっていない複雑系に対しても応用可能な点は特に重要である。さらに、2次元・3次元のモンテカルロ法によるシミュレーションを可視化できれば、現実的でよりリアルな感動が得られ、地学教育において複雑な自然現象を理解するうえでも有効な教材開発のツールとなりうるものである。動画を含んだ地質現象のシミュレー

ションを体験できるデジタルコンテンツの開発が急務である。

引用文献

- Allen P. A. (1982): Cyclicity of Devonian fluvial sedimentation, Cunningsburgh Peninsula, SE Shetland. *Jour. Geol. Soc. London*, **139**, 49-58.
- 青野宏美・桂 雄三(1995): 房総半島, 上総層群における堆積相の情報解析. 情報地質, **6**(4), 178-187.
- 青野宏美(2002): 地学的データの類似と相違の表現方法. 地学教育, **55**(6), 259-266.
- 青野宏美(2003): モンテカルロ法による地質柱状図の復元. 地学教育, **56**(5), 173-189.
- Bouma, A. H. (1962): *Sedimentology of some flysch deposits*. Amsterdam, Elsevier, 168 p.
- Davis, J. C. (1973): "Statistics and Data Analysis in Geology." John Wiley & Sons, 456-473 pp.
- 八田明夫(1979): 続・似ている程度の定量化. 地学教材へのクラスター解析の導入, 地学教育, **32**(5), 147-154.
- Hattori, I. (1976a): Lithology and Markov analysis of the Paleozoic strata in the Fujibashi area, Central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **82**(1), 19-33.
- Hattori, I. (1976b): Entropy in Markov chains and discrimination of cyclic patterns in lithologic successions. *Jour. Math. Geol.*, **8**(4), 477-497.
- Hiscott, N. R. (1980): Depositional framework of sandy mid-fan complexes of Tourelle Formation, Ordovician, Quebec. *Amer. Assoc. Petro. Geol. Bull.*, **64**(7), 1052-1077.
- 石原与四郎・徳橋秀一(2002): 時系列解析結果からみた新潟堆積盆鮮新統川口層中の半深海および浅海成タービダイトサクセッションの堆積システム. 地質学雑誌, **108**(3), 164-175.
- King, A. M. C. and McCullagh, M. J. (1971): A simulation model of a complex recurved spit. *Jour. Geol.*, **79**, 22-37.
- 牧野泰彦・増田富士雄(1978): 紀伊山地中央部柏木地域の秩父系のマルコフ解析. 茨城大学教育学部紀要, 自然科学, **27**, 53-83.
- 宮地直道(1988): 新富士火山の活動史. 地質学雑誌, **94**, 433-452.
- 日経 BP 社(編)(2003): デジタル用語辞典 2002-2003 年版, 1264 p.
- Rachochi (1981): "Alluvial Fans: An attempt at an empirical approach." Wiley, 171 p.
- Stow, D. A. V. (1985): Deep-sea clastics: where are we and where are we going? *Sedimentology, Spec. Publ. Geol. Soc. Lond.*, **18**, 67-93.
- 武隈良一(1975): 偶然の数学. 科学ブック 26, 共立出版, 225 p.
- 徳橋秀一(2002) タービダイトの話 (「地質ニュース」復刻版), 実業公報社, 251 p.
- 宇田高明・山本幸次(1992): 北海道野付崎の形成過程. 地形, **13**(1), 19-33.

青野宏美: 地質現象に見られる確率過程とシミュレーション 地学教育 58 巻 1 号, 31-35, 2005

〔キーワード〕 地質現象, 確率過程, マルコフ鎖, モンテカルロ法, シミュレーション

〔要旨〕 モンテカルロ法によるシミュレーションの利点は, 過去の地質データから現在の現象を再現できるのみならず, 将来の予測が可能なる点にある. 物理的な過程が明らかではない自然界の複雑系に対しても, 応用可能な点は重要である. このモンテカルロ法によるシミュレーションとして, 1次元の「柱状図」モデルについて解説した. このモデルは, 地学教育において, 有効かつ強力な教材開発のツールとなりうる.

Hiromi AONO: Stochastic Process in Geological Phenomena and Its Simulation on a Computer. *Educat. Earth Sci.*, **58**(1), 31-35, 2005

学会記事

第3回 常務委員会議事録

日時：平成16年10月6日(水) 午後6時00分

場所：慶応義塾幼稚舎

出席者：下野 洋・渋谷 紘・宮下 治・濱田浩美・
相場博明・南島正重

議 題：

1. 岡山大会の終了について
平成16年度岡山大会終了の報告があった。地学教育への大会報告、会計報告とも終了し、正式に岡山大会本部の解散承認がなされた。
2. 平成17年度以降の大会について
茨城大会の組織および日程の確認がなされた。大会実行委員長は牧野泰彦副会長。日程は、平成17年8月6日(土)7日(日)が研究発表、8月8日(月)および9日(火)は巡検に当てられる。
3. 役員選挙日程について
例年どおり役員選挙を行うことが承認された。公示は次号の地学教育で、本年度は、評議員8名・監査1名の改選が行われる。
4. 入会者・退会者について
以下、3名の入会が認められた。
入会者：岡本 研(北海道)・境 智洋(北海道)・藤本光一郎(東京)
5. その他
 - 1) 各種委員会のまとめの一覧表、および各種委員会についての評議員からの意見が出された。今回十分な議論はできなかったが次回常務委員会には各種委員会についての具体的な方向性を決めることになった。

報 告：

1. 各種常置委員会から
 - 1) 編集委員会から57-4号の編集状況について報告があった。電子メールを活用した編集委員会に

移行するために、委員長を甲南大学の林 慶一会員より東京学芸大学の松川正樹会員に、事務局が広島大学から慶應義塾幼稚舎に移行した旨報告があった。

- 2) 第37回学校科目「地学」関連学会連絡協議会の報告があった。教科の枠組みについては、地球惑星科学関連学会連絡会、理数系諸学会からの教育課程等教育に対する改革の提言などいくつかの動きがあること、天文が脱会する旨公式な表明があったことが報告された。
 - 3) 教科「理科」関連学会連絡協議会の報告があった。第9回シンポジウムが開催される。そのために学会として意見をまとめる場を設ける必要がある、最小限の意見のコンセンサスを学会としてもつ必要があるという意見があった。
2. 寄贈交換図書などについて
以下の図書・雑誌の寄贈があった。
- ・日本理科教育学会(2004): 理科の教育, 通巻621~629号, Vol.53.
 - ・日本理科教育学会(2004): 理科教育学研究, Vol.45, No.2.
 - ・産業技術総合研究所地質調査総合センター編(2004): 地質ニュース, 第598~602号.
 - ・神戸大学発達科学部(2004): 神戸大学発達科学部研究紀要, 第10巻, 第3~4号特集号.
 - ・神戸大学発達科学部(2004): 神戸大学発達科学部研究紀要, 第11巻, 第1~2号.
 - ・(財)下中記念財団(2004): 下中記念財団2004年報.
 - ・東京電力(株)(004): ILLUME, 32.
 - ・熊本地学会(2004): 熊本地学会誌, 136~137.
3. その他
 - 1) 理科振興法50周年式典の報告書が慶應幼稚舎に届いた。

編集委員会より

編集委員会は、12月11日（土）午後に開かれました。新規投稿、著者修正による再提出の10論文が審査されました。原著論文2、解説3、教育実践論文1が受理されました。平成16年は、30論文（原著論文、総説、教育実践論文、解説、資料）が投稿されました。昨年も30論文が投稿されました。

地学教育 第58巻 第1号

平成17年1月20日印刷

平成17年1月25日発行

編集兼 日本地学教育学会
発行者 代表 下野 洋

〒263-8522

千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33

千葉大学教育学部理科教育教室内

電話 & FAX 043-290-3682（濱田）

振替口座 00100-2-74684

印刷所 株式会社 国際文献印刷社

169-0075 東京都新宿区高田馬場3-8-8

電話 03-3362-9741～4

EDUCATION OF EARTH SCIENCE

VOL. 58, NO. 1

JANUARY, 2005

CONTENTS

Practical Article

Teaching of the Color-Temperature Relationship of Fixed Stars Using Replica
GratingMasamitsu GOSHIMA and Kazuhito DOBASHI... 1~12

〈Feature〉 Stochastic model and probabilistic prediction in Earth Science phenomena

Probability Prediction for Earthquakes: Recent Trials on Aftershock Activity and
Several ProblemsKen'ichiro YAMASHINA...13~22
Probabilistic Weather ForecastsRyozo TATEHIRA...23~30
Stochastic Process in Geological Phenomena and Its Simulation on a Computer
.....Hiromi AONO...31~35

Proceeding of the Society (36)

All communications relating this Journal should be addressed to the
JAPAN SOCIETY OF EARTH SCIENCE EDUCATION

c/o Faculty of Education, Chiba University; Chiba-shi, 263-8522, Japan