

『「山口県における豪雨災害年の評価と予測」 に対する質疑と討論』に対する回答

張 繼 権*・早 川 誠 而**

二宮 (2001) による質疑と討論は本論文担当時の査読者及び担当編集委員の質問と類似しており、すでに対応済みと考えていたが、論文では説明が不十分であった部分と修正すべき部分もあったので、再度説明と修正を行った。

貴重なコメントをお寄せくださり説明の機会を与えてくださった二宮氏に感謝する。

1. 緒言…全体的な質疑に対する回答

気象災害の発生要因は非常に複雑でまだ十分に解明されていない。既知の要因と未知の要因ともに存在するため、単純な物理的モデルで災害予測を進めることに困難があり、他の予測方法を見付ける必要がある。既知の要因と未知の要因を共に考えることができる理論として灰色システム理論と呼ばれる理論がある。灰色システムとは、既知の情報と未知の情報を共に含むシステムを指し、これに関する理論は1982年に中国華中工学院の鄧聚龍によって提案された。独創的な見解とそれに応じた数学手法は各分野で応用されている。

これまでの物理的モデルによる気象災害予測は、気象要素値 (気候値) を対象値とし、次の時間に出現する気象要素の値がいくらであるかをもとに予測を行う。このような予測手法はデータの少ない、短い時系列に対しては応用しにくい面があり、しかも予測精度も低くなる。灰色システム理論による気象災害の予測は、気象要素も災害発生年も予測対象とすることができ、しかも短時系列にも応用可能である。張ほか(1998)

(以下「原論文」という。)では灰色システム理論による灰色予測モデルの一種としての灰色災害変化予測モデルを適用し、豪雨災害年の予測を試みた。

豪雨災害年の評価や予測を行う前に豪雨災害の定義、豪雨災害発生年の経年変化と原因を調べておく必要がある。また、灰色災害変化予測モデルは、災害値の大小を予測するのではなく、災害値が現れる時刻を予測する。モデルの作成において使用するデータは災害の特徴量ではなく、災害の特徴量の発生する時刻である (鄧, 1999)。したがって、豪雨災害発生年の予測には豪雨災害年の評価と区分、つまり、豪雨災害年の決定を行うことが大切である。

以上の原論文の目的、考え方と灰色災害変化モデルの原理をもとに、原論文では、まず、豪雨災害年の評価及び予測方法を述べた。また、豪雨災害年を定義し、豪雨災害の特性と誘因を調べた。さらに、1965年から1994年までの豪雨による被害資料をもとに数理統計手法を用いて豪雨災害の被害程度を定量的かつ総合的に評価できる被害指数を提案し、この指数を指標値としてファジィクラスタ分析法により各年の被害程度の評価と区分を行った。最後に、豪雨災害年の評価結果をもとに被害程度が重度程度以上に属する豪雨災害年を時系列として、灰色災害変化予測モデルを用いて豪雨災害発生年の予測を試みた。

ここでは二宮 (2001) に従って原論文を再度検討しながら、「豪雨災害と豪雨の区別」、「被害指数の算定結果」、「ファジィクラスタ分析法による豪雨災害年の評価と灰色モデルによる予測結果」について再度説明と修正を行う。

2. 被害指数の算定結果に対する疑問に関する説明

二宮 (2001) に基づき、原論文を再度検討したところ、被害資料の統計と被害指数の計算に誤りがあった

* 山口大学農学部 (現 京都大学防災研究所 日本学術振興会外国人特別研究員)。

** 山口大学農学部。

—2000年4月24日受領—

—2001年12月27日受理—

第1表 山口県における豪雨災害の被害状況と被害指数(G)の計算.

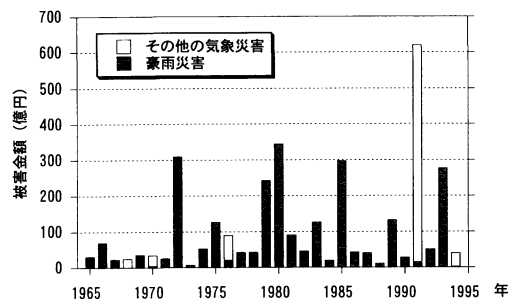
年	被害人数(p) (人)	被害家屋(h) (棟)	被害金額(e) (億円)	Ip	Ih	Ie	G
1965	21	21326	31	0.21	2.33	0.31	2.85
1966	12	5585	70	0.12	1.75	0.70	2.57
1967	2	5970	23	0.02	1.78	0.23	2.03
1968	0	0	0	0	0	0	0
1969	4	4530	36	0.04	1.66	0.36	2.06
1970	2	127	5	0.02	0.13	0.05	0.20
1971	1	1390	26	0.01	1.14	0.26	1.41
1972	54	34582	310	0.54	2.54	1.49	4.57
1973	0	147	7	0	0.15	0.07	0.22
1974	1	1409	53	0.01	1.14	0.53	1.68
1975	43	2988	127	0.43	1.48	1.11	3.02
1976	8	584	21	0.08	0.58	0.21	0.87
1977	11	574	43	0.11	0.57	0.43	1.11
1978	12	395	43	0.12	0.40	0.43	0.95
1979	17	4687	243	0.17	1.67	1.39	3.22
1980	17	5803	345	0.17	1.76	1.54	3.47
1981	1	622	91	0.01	0.62	0.91	1.54
1982	7	274	46	0.07	0.27	0.46	0.80
1983	26	4512	127	0.26	1.65	1.10	3.01
1984	0	61	20	0	0.10	0.20	0.30
1985	17	5550	298	0.17	1.74	1.47	3.38
1986	4	538	43	0.04	0.54	0.43	1.01
1987	1	173	41	0.01	0.17	0.41	0.59
1988	1	2	11	0.01	0.00	0.11	0.11
1989	19	4957	132	0.19	1.70	1.12	3.01
1990	0	637	28	0	0.64	0.28	0.92
1991	0	14	15	0	0.01	0.15	0.16
1992	0	161	51	0	0.16	0.51	0.67
1993	2	3511	277	0.02	1.55	1.44	3.01
1994	0	0	2	0	0	0.02	0.02

ことが判明した。誤りを修正し原論文第3図と第4節の豪雨災害年の評価と被害程度の区分をやり直した。原論文の式(1)による被害指数を改めて計算した結果を第1表に、第1表をもとに原論文第3図を修正したものを第1図に示す。

次に、第1表に示した I_p , I_h , I_e を特性値としてファジィクラスタ分析法により以下の第3節のように豪雨災害の年代別の被害度の評価と区分を行った。

3. 豪雨災害年評価に対するファジィクラスタ分析法の効果について

これまでの気象災害区分の研究を調べてみると、従来の分類方法として、例えば、水稻の遅延型冷害危険度による区分(坪井, 1986)、干ばつ危険度による区分(真木・黒瀬, 1987)、災害の組み合わせによる区分(大後, 1987)などが挙げられ、これらは主に災害と密接な関係にある気候要素の有無と実際の災害発生状況とを比較し、経験的に災害が発生する時の気候要素の限界値を決めている。この限界値を用いて分類を行っ



第1図 1964～1994年における豪雨災害とその他の気象災害による被害金額の経年変化.

たが、結局は主観的な部分に重きをおいた分類結果となった。また、これまでに気象災害区分に使用された指標は災害に関連する気象要素が多く、気象災害に関しては災害の被害程度の違いに関する定量的な研究はあまり見られない。そこで、本研究では、豪雨災害年の区分について豪雨災害による被害人数、被害家屋数と被害金額という災害に関する被害要素を指標とし、総合的な被害の程度を示すことを目的として、ファジィ

第2表 豪雨災害の年別被害度タイプ毎の被害の特徴

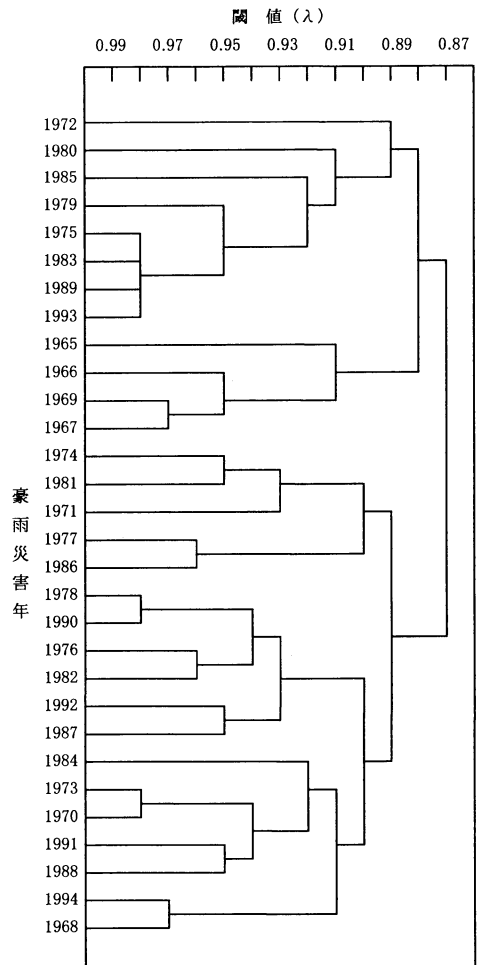
統計期間：1965～1994年.

タイプ	I			II			III			IV			V		
年	1972			1980, 1985 1979, 1975 1983, 1989 1993			1965, 1966 1969, 1967			1974, 1981 1971, 1977 1986			1978, 1990 1976, 1982 1992, 1987 1984, 1973 1970, 1991 1988, 1994 1968		
被害特徴	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小
Ip	0.54	0.54	0.54	0.20	0.43	0.02	0.10	0.21	0.02	0.04	0.11	0.01	0.02	0.12	0.00
Ih	2.54	2.54	2.54	1.65	1.76	1.55	1.88	2.33	1.66	0.57	1.14	0.54	0.19	0.64	0.00
Ie	1.49	1.49	1.49	1.31	1.54	1.10	0.40	0.70	0.23	0.37	0.91	0.26	0.22	0.51	0.00

イクラス分析をもとに、災害程度の違いの面から災害のタイプを区分した。

はじめに、豪雨災害の被害特徴を被害人数、被害家屋数と経済損失額という3つの被害指標で数量的に表し、各災害年の被害指標値を求めた。次に、各災害年の被害指標値（各指標の数量的な差異を考慮し、計算した時、それぞれの基準化指数 I_p , I_h , I_e を使用した）を特徴値として相関係数を計算し、類似関係行列を作った。最後は、類似関係行列のデータの大きさをもとに、閾値 λ の範囲とカットレベル λ 値を設定し、豪雨災害被害程度の分類を行った。各レベル λ 値を与えることによって得られた豪雨災害の被害程度の区分分割樹を第2図（原論文第4図を修正したもの）に示した。 $\lambda = 0.89$ の時、1965～1994年の30年間に豪雨災害の年の被害度が5つのタイプに区分される。この5つのタイプ毎の被害指標の特徴を第2表に示す。表に示すように、被害人数、被害家屋数と被害金額の違いに各型の特徴がはっきりと現れている。つまり、タイプIに属するものには、被害人数、被害家屋数と経済損失額がともに最も大きく、タイプIIに属するものには、被害家屋数と経済損失額が大きく、タイプIIIに属するものには、被害家屋数は大きい。タイプIV、タイプVに属するものには、被害人数、被害家屋数と経済損失額がともに少なく、特に人的被害が最も少ない。この結果はファジィクラス分析による客観的な分類の可能性を意味するものと考えられる。

次に、豪雨災害年を簡単に推定・評価するために、分類結果をもとに、原論文の式(1)により計算した被害指数を用いて種類別の豪雨災害年の限界値を求めた。第2表をもとにして得られた各型の推定被害指数の限界値を第3表に示す。これは原論文第2表を修正したものである。被害指数はタイプIが最も大きく、



第2図 1964～1994年における豪雨災害被害程度の分割樹.

第3表 ファジイクラスタ分析法による豪雨災害程度のカテゴリ

統計期間：1965～1994年.

災害程度	被害指数(G)	年
極重度災害年	≥ 4.00	1972
重度災害年	3.00～4.00	1980, 1985, 1979, 1975, 1983, 1989, 1993
中度災害年	2.00～3.00	1965, 1966, 1967, 1969
軽度災害年	1.00～2.00	1974, 1981, 1971, 1977, 1986
微度災害年	≤ 1.00	1978, 1990, 1976, 1982, 1992, 1987, 1984, 1973, 1970, 1991 1988, 1994, 1968

次いでタイプII, タイプIII, タイプIVとタイプVの順になっている。以上の結果より, タイプI, タイプII, タイプIII, タイプIV, タイプVをそれぞれ極重度被害年, 重度被害年, 中度被害年, 軽度被害年, 微度被害年と呼ぶことにする。

以上のように, 豪雨災害の被害指標間の関係の度合に着目したファジイクラスタ分析により, I_p, I_h, I_e を用いて豪雨災害の被害程度を分類することにより, 第2表に示されたような特徴ある5つのタイプに分類できた。このことは, 今回行った分類の客観性及び有効性を示すものとする。即ち, ファジイクラスタ分析による災害分類は, 災害と関連する要素間の度合に着目し, 従来の手法より客観的かつ定量的に分類することが出来, 気象災害の限界値を定量的に評価することに応用できることが分かった。分類(区分)変量をどのように選ぶかは分類(区分)結果の正しさに大きな影響を与えるが, この点については今後の課題として解析を進めたい。

単純に被害指数Gの大小で統計的分布を考慮するなどの手法によって被害年が第3表のようにいくつか分類されるが, 第2表のような被害人数, 被害家屋数と被害金額の違いに各型の特徴が現れず, ファジイクラスタ分析により分類した結果の方が実用性を持つかどうかについては今後さらに調査と検討を進めたい。

二宮(2001)が指摘したように人的損失は価値観に依存するが, これに関する研究はあまりなされておらず, 被害の統計に死亡者, 行方不明者, 負傷者等をどのような比重で計算するかは明らかではない。このため, 既往の文献(馮, 1993; 沼本ほか, 1999)を参考として, 本論文では上述の計算式で被害指数をもとめ, 死亡者, 負傷者, 行方不明者を同じ比重で計算した。

4. 豪雨災害と豪雨との関係について

豪雨は最も頻繁に起こる突発的な異常気象現象の1つであり, これによる気象災害, つまり豪雨災害は日本における重大な気象災害の1つである。災害学的観点から, 自然災害は誘因が素因に作用することによって生ずる(水谷, 1993)。すなわち, 豪雨という現象は豪雨災害発生時の主な誘因であり, 豪雨災害は誘因(豪雨)と地域の地形, 植生, 地質, 土壌等の自然条件と人口密度, 経済状況等の社会的条件とが組み合わさって素因に作用することによって発生する地域性の大きい現象であり, 時間とともに変質する条件と重なった複合的な現象(自然・社会現象)であると考えられる(張・早川, 1998)。

豪雨が豪雨災害発生時の主な誘因となるが, 豪雨が発生しても, 必ず豪雨災害がもたらされるとは限らない。このため, 豪雨の定義と災害発生の一応の目安(早川, 1996; 近藤, 1994)に従って本論文では山口県内アメダス観測点の日平均降水量が100 mm以上の日数を豪雨発生回数とし, 豪雨発生回数の中で被害が発生した回数を豪雨災害発生回数とした。この定義に従い, 山口県の降水量データと災害データから得られた年別と月別の豪雨災害発生回数を原論文第1図と第2図に示した。

原論文では, 上述したように「豪雨災害(自然・社会現象)」と「豪雨(気象現象)」とは, 厳密に区別したが, 記述が曖昧であった点はお詫びしたい。

5. 豪雨災害発生年の予測について

気象災害予測に対してこれまで使われた手法(回帰分析, 時間序列分析, 確率分析など)はデータの少ない短時系列に対して応用しにくい面があり, しかも予測精度も低くなる。灰色システム理論による気象災害の予測は短い時系列にも応用可能である。また, 灰色

第4表 モデル精度の検定基準.

精度の等級	P(小誤差頻度)	C(検証比)
良好(<i>Good</i>)	> 0.95	< 0.35
合格(<i>Qualified</i>)	> 0.80	< 0.5
適当(<i>Just</i>)	> 0.70	< 0.65
不合格(<i>Unqualified</i>)	≤ 0.70	≥ 0.65

予測モデルは計算の手順が簡便で、予測の精度がかなり良く、特に気象災害年を取り扱った短い時系列に対して他の予測方法より有効性があることが報告されている(李・呉, 1988; 強, 1991; 顧ほか, 1993; 袁, 1993; 高, 1993).

統計的手法で豪雨災害に関する予測を行うこれまでの研究は、そのほとんどが豪雨災害に関連する気象要素値を時系列として解析するものであり、豪雨災害年を直接時系列として用いて予測する例はあまり見られない。この原因の1つは豪雨災害年時系列のデータが少ないことである。本研究は灰色予測モデルの気象災害の長期予測への有効性を確かめたものである。

灰色災害変化予測法は灰色システム理論に基づいて微分方程式のモデルを構築することにより予測を行う方法である。どのような予測方法に対しても、予測モデルの精度検証は予測モデルの実用性を検定する上で重要な手段である。予測方法により予測モデルの精度検証方法は異なっている。例えば、気象分野では単純な予測法の結果、例えば気候値予測や持続値予測と比較をする方法があり、数理統計分野では残差(モデルによる推定値と真値の差)大小の検証という算術の検証と後驗差検証という統計的検証等の検証方法がある。灰色理論でモデルを立てるには三種類の検証方式をとらねばならない(鄧, 1999)。すなわち残差大小の検証、後驗差検証、関連度検証である。残差大小の検証はモデルの精度をモデルによる推定値と真値の差によって検証しているの、直観の検証で、算術の検証である。後驗差検証は残差の確率分布によって検証をしているので、統計的検証に属する。関連度検証はモデルの代表曲線とデータ曲線との幾何学的な相似の度合によって検証していく1つの幾何検証である。

灰色災害変化予測の特色は、災害の特徴量の予測ではなく、災害が現れる時刻を予測することである。したがって、災害変化の予測に対するモデルの作成において使用するデータは災害の特徴量ではなく、災害の発生する時刻である。その時刻に対しては等時間間隔

にはならない(鄧, 1999)。原論文は豪雨災害年の評価結果をもとに被害程度が重度(被害指数(G)が3)以上に属する豪雨災害年(異常豪雨災害年と呼ぶ)、を時系列として、その時系列の灰色予測モデルを作り、豪雨災害発生年の予測を試みた。

次に、原論文に示したように、得られた予測モデルの精度を検証した。まず、原論文第3表に示したように残差大小の検証によりモデルの精度を検証した。平均相対誤差の絶対値は0.13%であり、つまり予測モデルの精度が99.87%で、長期予測の精度から考えれば高いと言える。また、後驗差検証によるモデル精度検証の基準を第4表に示す(鄧, 1999)。原論文で得られたPとC値(原論文第5.2節)と比較すると得られた予測モデルは最も精度の高いレベル(良好)と判定できる。さらに、豪雨災害年の実測値と得られたモデルによる推定値との関係による検証(幾何検証)の結果(原論文第5図)、推定値と実測値の間には有意な相関が得られた(有意水準5%)。両者の相関が高ければモデルの精度が高く、予測値の信頼度が大きいことが認められる。これらの検証結果は何れも予測モデルの精度が高いことを示す。なお、原論文での1997年の被害指数は第2節で述べたと同様誤りであり、9.26を3.09に修正する。

灰色予測法の物理的意味や予測結果の気象学的説明あるいは気候値予測や持続値予測に比べ有意に精度が良いかなどの点について、いくつかの不明点が残っており、これらについて、今後も更に検討する必要がある。

6. 結語

二宮氏からコメントを頂き、大変な勉強になった。著者の知識不足で、いろいろと御迷惑をかけ、心よりお詫びする。また、質問者からのコメントをもとにファジイクラスタによる分類や灰色予測モデルの気象災害への応用について今後も更に検討・研究していきたい。

参 考 文 献

- 大後美保, 1987: 新編農業気象学通論, 養賢堂, 331-347.
- 鄧聚龍著, 趙君明, 北岡正敏訳, 1999: 灰色理論による予測と意思決定, 日本理工出版会, 11-111.
- 馮利華, 1993: 災害損失の定量計算方法的研究, 災害科学, 8 (2), 17.
- 高建華, 1993: 江淮地区大洪水災害の灰色予測, 自然災害学報, 2 (2), 71-74.
- 顧衛, 早川誠而, 鈴木義則, 1993: 灰色システム理論により気象災害発生年を予測する研究—福岡夏季干ばつについて—, 自然災害科学, 12, 141-149.
- 早川誠而, 1996: 気象学的側面からみた豪雨と災害, 土と基礎, 44 (7), 1-5.
- 近藤純正, 1994: 身近な気象の科学—熱エネルギーの流れ—, 東京大学出版会, 90-91.
- 李徳, 呉寛, 1988: 災害性天気事件長期予測的灰色理論方法及実例応用, 災害科学 3 (4), 11-15.
- 真木太一, 黒瀬義孝, 1987: 瀬戸内海周辺域における干ばつ危険度の地域区分に関する研究, 四国農試報, 49, 79-93.
- 水谷武司, 1993: 自然災害調査の基礎, 古今書院, 8, 7-114.
- 二宮洸三, 2001: 「山口県における豪雨災害年の評価と予測」に対する質疑と討論, 天気, 48, 313-315.
- 沼本晋也, 鈴木雅一, 太田猛彦, 1999: 日本における最近50年間の土砂災害被害者数の減少傾向, 砂防学会誌, 51 (6), 3-12.
- 強中發, 1991: 青海省干害及雹害の灰色災害変化予測, 農業系統科学と総合研究, 7 (3), 168-170.
- 坪井八十二, 1986: 気象と農業生産, 養賢堂, 173.
- 袁嘉祖, 1993: 灰色系統理論及応用, 科学出版社, 122-123.
- 張繼權, 早川誠而, 山本晴彦, 鈴木賢士, 1998: 山口県における豪雨災害年の評価と予測, 天気, 45, 773-779.
- 張繼權, 早川誠而, 1998: 山口県における豪雨災害危険度の評価と危険地域の区分に関する研究, 自然災害科学, 16, 277-292.

Reply to 'Comment and Discussion on "Assessment and Prediction of the Years of Disaster Caused by Heavy Rainfall in Yamaguchi Prefecture"' by K. Ninomiya

Jiquan ZHANG*¹ and Seiji HAYAKAWA*²

*¹ (Corresponding author) Faculty of Agriculture, Yamaguchi University
(Present affiliation: Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University,
Uji, Kyoto 611-0011, Japan Foreign Research Fellow of the Japan Society
for the Promotion of Science)
E-mail: zhang@imdr.dpri.kyoto-u.ac.jp

*² Faculty of Agriculture, Yamaguchi University

(Received 24 April 2000; Accepted 27 December 2001)