

モンテ・カルロ法による風水害対策の研究について

高 橋 浩 一 郎*

1. まえがき

日本は災害国であり、災害を防ぐことが我々の生活を向上させる上から重要なことはいうまでもないことがある。しかし、災害を防ぐということは単なる自然科学の問題だけではなく経済問題が重要であり、経済を離れた防災対策は無意味である。正しい防災対策としてはこの両方を総合的に考察することが望ましいが、これは簡単に出来ることではない。そこで、この方面への努力の一歩として、非常に抽象化したモデルについて防災の問題を少しく考察してみた。

さて、災害は一般的にいって災害を起す破壊力が、災害を防ぐ防禦力（これを強度となずける）より大きくなつた時に起る。すなわち破壊力と強度との相対的の関係で定まるものであり、強度が大きければ大きな破壊力が働いても災害にはならない。しかし、強度を増す為には経費が必要であり、この経費と災害により起る被害高とのバランスが問題である。たとえば洪水を防ぐため河川の幅を大きくとれば、いわゆる災害は減るであろうが、一面それだけ田畠や宅地も減るのでむやみに大きな幅をとることは出来ない。すなわち災害の被害高とある強度にするための経費とか、あるいはその強度にするための利益の減少のバランスにより、もっとも効率のよい防災対策を考えられる。これを見出すことが防災対策をする場合の一つの中心問題であろう。この種の問題をここでは気象災害、とくに暴風と大雨による災害を中心として抽象的に考えてみたい。

ところで、この種の問題を解くのに、一般的な条件を入れて数式的に計算するのはなかなか難かしい。それにはいろいろの理由があるが、一つは災害という現象が突然的に起り、場合場合で非常に違うからである。また、災害は自然現象だけでなく、社会現象も入り、一般的に繰返しが行わぬからである。このような問題を取扱う際に、いわゆるモンテ・カルロ⁽¹⁾法を利用するのが適当のように思われる。この方法によると数値の精度はあまり望みえないが、一種の思考実験であり、割合簡単にいろいろの問題を解くことが可能になる。つぎにその方法を説明しよう。

風水害対策の場合を考えてみる。この場合問題となる破壊力としては暴風、大雨であり、これが年々複雑に変化する。そこで年々の暴風、大雨がでたらめにあらわれると考え、その出現度数分布を推定し、乱数表をつくる要領で、破壊力の年々の変化を示す時系列を求める。か

くして非常に長い期間の破壊力のモデルが求められることになる。そこで、たとえば家屋を適當な強度で設計したとし、モデルの破壊力の変化と照らし合せてみれば何年たてば災害が起るかがわかる。もし必要とあらば、老朽化による強度の変化を考慮することも可能である。このようにして、風水害対策に関するいろいろの問題が解けるわけである。

2. 暴風及び大雨の度数分布

さて、この問題をあつかう場合第一に必要なことは破壊力の度数分布である。気象現象は一般に顕著な年変化をする。また、一度破壊が起るとその復旧にはかなりの時間がかかるので、災害を問題とする場合、破壊力としては風速や日降水量の年の最大値が一つのよい目安となる。しかしこの場合の問題は長年の一様な観測値がないので、破壊力の正確な度数分布を求めることが非常に困難なことである。この種の問題については洪水予報と関連しては、古くから研究がある⁽²⁾が、観測値が少いということは何といっても致命的である。しかし、気象現象の場合には何カ所かの観測値があるので、これを適当に用いれば観測値を増し、したがってより正確な度数分布をうることが可能であろう。そこで我々はつぎのような仮定をする。

(1) 破壊力の度数分布は同一気候区では相似である。

(2) 年々の破壊力は統計的に独立であり、安定している。

このどちらの仮定も厳密には成立しない。たとえば気候に永年変化があり、年のくせに持続性があることは事実であり、この事は(2)の仮定が正しくないことを示している。しかし、これらは経験によればそれほど顕著なものでなく、一般的なことを論ずる場合には目をつむってよいであろう。そこでこの方針のもとに年最大風速と年最大日降水量の度数分布を求めた。

風速の観測法はしばしば変更があるので、これを一様な値に直す必要がある。幸い斎藤(鍊)博士が1925年より1954年の30年間の年最大風速を、適當な仮定のもとに10分平均の倉石公式によるものに直されたものがある。この値をおかりして風速の度数分布をつくることにした。すなわち、日本を台風域、内陸、温帯低気圧域の三つの地域にわけ、それぞれに属する地点としてつぎのようにとった。

台風域…鹿児島、室戸、下関、潮岬、宮崎、八丈島

内陸……京都、岐阜、飯田、長野、高山、前橋

温帯低気圧域…浜田、金沢、伏木、秋田、寿都

そして各地点の年最大風速値に適當な係数をかけ、累

* 気象研究所予報研究部 —1956年12月13日受理—

年平均値がそれぞれの代表地点鹿児島、長野、秋田における値になるようにした。第1表はこのようにして求めた超過度数分布である。同様に1900年ないし1945年の年最大日降水量をとり、全国を三つの地域に大別し、つぎの各地点をとり、鹿児島、広島、札幌を代表地点として超過度数分布を求めた。

台風域………鹿児島、宮崎、高知、潮岬、室戸
内陸……………広島、神戸、岐阜、甲府、宇都宮
温帶低気圧域…札幌、福井、伏木、新潟、秋田

第1表 年最大風速及び年最大日降水量の超過度数分布

風速 m/sec	風速 (m/sec)			降水量 (mm)		
	鹿児島	秋田	長野	鹿児島	広島	札幌
日降水量						
10		180		20		268
12		179		40	251	275
14		166		60	250	264
16	180	150	90	80	244	215
18	178	149	35	100	214	151
20	170	141	12	120	196	104
22	145	106	7	140	181	61
24	115	71	4	160	91	34
26	74	37	3	180	68	19
28	47	18	1	200	41	15
30	29	7	1	220	25	10
32	21	3		240	19	4
34	13	2		260	11	3
36	7	2		280	7	3
38	1			300	4	3
				320	3	2
				340	3	1
				360		
				380	2	

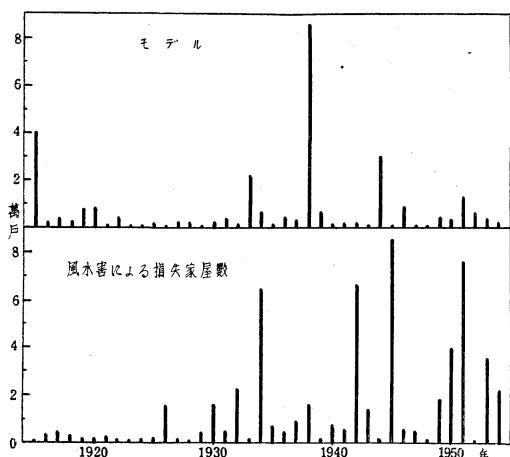
この方法は要するに暴風や大雨を支配するものに台風などと異常現象の出現の変動のほかに空間的位置による変動があり、エルゴード仮説を立て、空間的位置の変動を襲来度数に置き換えたことに相当する。そしてこれらの結果をみると、度数分布は降水量ではほぼ相似であり、したがって、累年平均年最大日降水量が分布曲線のよい母数になることがわかる。風速ではごく荒くは相似とみてよいが、正しくは内陸ほどひずみが大きく、尾をひいており、一般には弱いが、ごくまれにはかなり大きな風速を観測する場合があるのがわかる。

3. 災害による被害高の変動

かくして破壊力の度数分布がわかったので、つぎにはこの値をカードに記入し、でたらめに抜き出しては戻すという方法により、充分長い破壊力でのたらめな時系列

を求める。これが破壊力の時間変化を示すモデルである。そこでこのモデルについていろいろ思考実験を行う。

まず水害の被害高が年々どのように変化していくかを調べてみよう。ところで、この場合必要なことは破壊力と被害高との関係である。これはいろいろの条件で違うが、水害の場合にはほぼ降水量の3乗、風害の場合には風速の5乗に比例することは経験的にいえることであり、また理論的にも考えられることは前に述べたところである⁽³⁾。そこで、水害を例とし、被害高が年々の最大日降水量の3乗に比例するとし、鹿児島の場合について調べてみると第1図のようになる。図中下のグラフは日本における年々の家屋の風水害による被害を示したもので、風害も入っており、正しくは対応させられないのがわかるが、かなりよく似かよった変化しているのがわかるであろう。



第1図 風水害被害高の年々の変化

すなわち、被害高の度数分布を調べてみると、少いものが圧倒的に多く、きわめてまれには大きな被害が起る。つぎに、モデルにつき被害高が長年の平均より大きくなる年を調べてみると、平均3.9年ごとに現われていることがわかる。もっとも、モデルと実際の風水害被害高の年々の変化の性質は違った点もある。大災害の起る年の間隔はモデルでは変動が大きく、大災害の翌年また大災害の現われることもあるが、長い間起きないこともあるが、実際の風水害の場合には4年周期がかなりはっきりしている。これは気候に4年周期があるためである。また、実際の風水害の被害高には顕著な永年変化がみられる。このように多少の違いはあるが、このような結果から、我々はかりに風水害保険を行ったとするとき、平均的には3年間災害が少く、収入が多いが、4年目には大災害が起きて多額の保険料を支払わなければならぬことがわかる。その年の保険料は場合によって違うが、10年に1回くらいは年平均の3倍くらいになる。すなわち保険としては非常に不安定であり、基本資金、

運転資金とともに多額のものを準備しておかなければならないことがわかる。

もっとも、初期の強度が充分にあれば、後に述べるよに耐用年限は割合一定し、災害が起るまでの期間の変動は比較的少い。したがって、この場合には保険というよりは投資金の回収という形をとれば実際的に可能となるであろう。

4. 防災対策の効果

さて、年々の被害高は正しくは同じような破壊力が働いても、災害対策の模様によって違う。つぎには防災対策の効果を考えてみよう。一般に被害は強度が増すとともに減少するが、反面強い強度のものが被害を受けるようなときは大きな破壊力が働くので被害高は大きいのが普通である。そこで、われわれは被害高 N は破壊力 f の n 乗に比例すると考え、破壊力 f が強度 S を越さない時は被害はないと考える。水害を例として考え、

$$N = \alpha R^3$$

$$N = 0$$

$$R > R_0$$

$$R \leq R_0$$

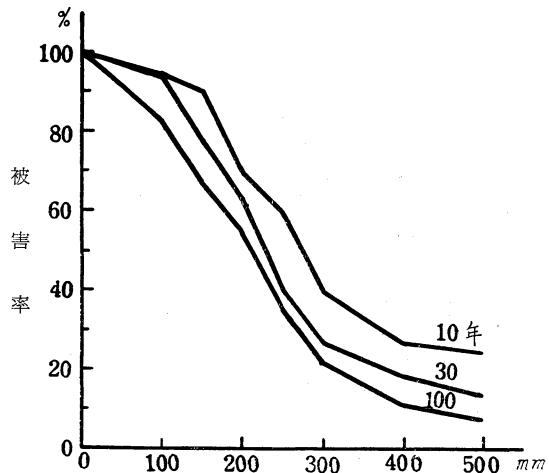
とする。ただし R_0 は計画最大日降水量で、この降水量までは破壊が起きないように作られているものと考える。そこで、年々の大雨の変化を示すモデルの時系列により、年々の被害高を調べ、その年平均値を求めてみる。しかし、これにはもう一つ考えるべき点がある。すなわち、防災施設をした時、その強度が永久に不变であることはまずなく、時間とともに老朽化するのが普通である。そこで、強度を降水量になおして表わした時、強度は時間の一次式で弱るとし、その程度を強度が半分になる時間で表わすものとする。これを強度の半減期と呼ぶことにする。そこで、強度半減期をパラメーターとして計画降水量をいろいろ変えた場合の平均の被害高を求めてみると第2図のようになる。

これをみるとわかるように初期の設計強度を増していく時、被害高はじめはゆっくりへり、あるところから急激にへり、ある程度以上になるとふたたび減少の程度がへる。この事から、われわれはなまじっかな防災対策は無意味であり、さればといってあまり強度を大きくとりすぎてもあまり効果は増さないことがわかる。また当然のことながら、寿命が長いほど被害は少くなる。鹿児島では450mm、広島では400mm、札幌では200mmくらいにすれば水害そのものは非常に少くなることがわかる。この値はほぼ平均年最大日降水量の3倍に当り、累年観測値の極値の4割増しくらいに当る。

5. 設計破壊力及び設計強度

我々は適当な破壊力を想定し、これに応じた強度をもとにして防災対策をするのがよいことを知ったが、しかばどれ位にしたらばよいだろうか。

具体的な例として、家屋を設計する場合、どれくらいの風速に耐えるようにすればよいか調べてみよう。



第2図 計画降水量と被害率
(鹿児島、平均年最大降水量154mm、極値306mm)

仮定として

- (1) 木造家屋とし、強度半減期は30年
- (2) 建築費用は風圧に比例すると考え、設計風速の自乗に比例する。
- (3) 風速は10分平均値でよい。

とする。(3)の仮定は正しくなく、風の息などがあるので一般にはこの値の5割増しぐらいにしなければいけないが、ここではこの点にはふれないことにする。

さて、鹿児島の例についてでたらめな年最大風速の時系列をつくり、この時系列について家屋の強度変化曲線と比較し、風速が強度より大きくなれば破壊するとなれば、何年後には家屋が暴風で破壊するかがわかり、これが家屋の寿命となる。この方法でいろいろの設計風速に対する家屋の寿命を調べてみると第2表のようになる。

これは求めた沢山の寿命の中から抜いた標本であるが平均寿命は設計風速とともに増すことがわかるであろう。

また寿命のばらつきを見ると、設計風速が小さい時は相対的の変動が大きく、設計風速が大きくなると割合そろってくるのがわかるであろう。

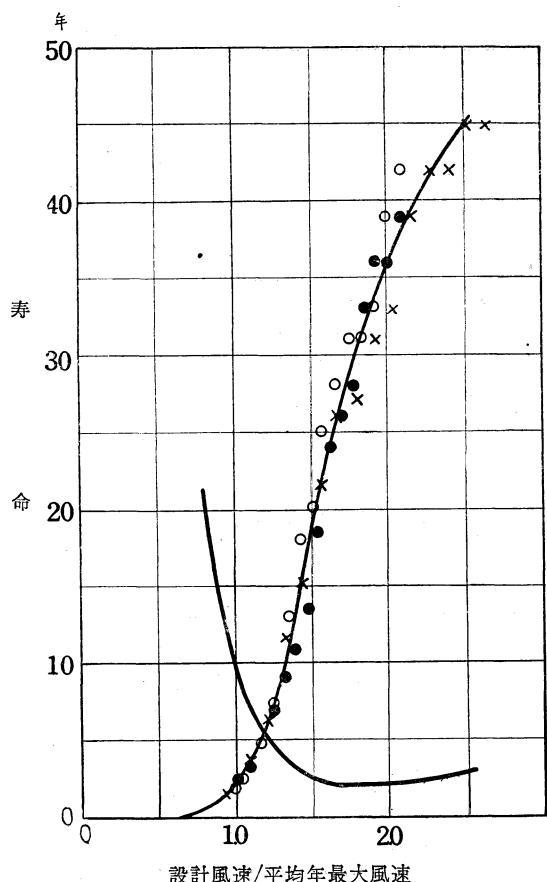
つぎに、経費が設計風速 V の自乗に比例するとして、寿命 L で割ると、これが単位時間の家屋使用に対する費用である。この値を計算してみると、第2表でわかるように設計風速が大きくなればはじめは急に減るが、44 m/sec 辺りで極小になり、それからゆっくり増加することがわかる。もちろん、この表の値はモンテ・カルロ法によって求めたものであり、変動があるが、定性的のことはよくわかるであろう。

第3図は3つの地域についていろいろの設計風速についての平均寿命を求め、縦軸に寿命、横軸に設計風速と平均の年最大風速との比をとってグラフにしたもので、いずれもほぼ同じ曲線上にのることがわかる。そして、使用単位時間に対する経費の率を求めてみると、図中の

第2表 家屋の寿命

台風域(鹿児島) 平均年最大風速 25.9m/sec.

設計風速	26	30	34	38	42	46	50	54m/sec
	2	3	4	4	35	35	42	48年
	4	5	5	30	20	30	40	36
	1	10	19	20	27	25	30	34
	4	8	19	27	24	22	37	31
	1	6	7	8	12	36	31	31
	4	2	9	16	30	24	33	42
	2	11	17	6	24	24	43	45
	1	7	2	6	14	28	29	41
	4	9	6	6	27	36	44	42
	5	1	5	23	25	25	34	43
	1	8	10	1	42	23	44	45
	2	8	6	18	28	31	40	38
平均寿命L	2.4	4.6	9.1	13.4	24	28	36	39年
V^2/L	280	195	127	107	73	75	69	75



第3図 建造物寿命と設計風速との関係

右下りの線のようになる。そのことからもっとも効果的な設計風速は強度半減期が30年の場合、平均年最大風速の1.7倍であることがわかる。

同じような方法で年最大日降水量につき、いろいろの強度半減期について平均寿命を求めてみると第3表のようになる。

第3表 計画降水量と寿命

強度半減期	年最大日降水量 計画/年平均	最も効果的な計画降水量/年平均									
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
10年	1.0	1.7	3.5	6	8	10	12	13	14	15	2.1
30	1.0	2.0	5.8	13	20	26	30	35	38	42	2.8
50	1.0	2.3	7	16	26	35	46	55	62	66	3.2
100	1.0	2.5	9	21	43	67	85	99	131	123	3.3

そして、経費が降水量の1.5乗に比例するとして最も効果的な計画降水量を求めてみると、表中最後の項のような結果になる。すなわち、強度半減期が50年とすると平均年最大日降水量の3.2倍を計画年最大降水量とすれば一番能率的であり、鹿児島の場合について調べてみると154mm × 3.2 = 494mmとなる。

6. 防災対策予算の配分

つぎには防災対策費の予算の配分の問題を考えてみよう。経費が充分ある場合には前節で述べたような最も経済的な設計強度にしたがって予算を算出すればよいが、充分ない場合にはどうしたらよいだろうか。

問題を簡単化し、国の予算などを考えることにし、多くの必要な同じ種類の建造物をつくるものとする。この場合予算が充分ない時には均等にわけるのは意味がない。なんとなれば、いくらつくってもすぐ破壊するから全く何も残らないことになる。そこで適当な設計強度を定め、一つの建造物にはこの設計強度になるような充分の経費を出し、予算で可能な範囲の個数のものを作り、残りは次年度にまわすことにする。この場合設計強度を大きくすれば、一つのものをつくるのに多くの経費がとられるから、出来る建造物の数は減ることになる。この設計強度をきめる原理は前節の場合と違う。なるべく早く多くの必要な建造物を完成することであろう。

数値的な例について考えてみよう。簡単のため強度半減期は無限、すなわち強度の老朽化はないものとする。降水量の場合を例にとり、一つの建造物をつくるに必要な経費は計画降水量に比例するとする。このような建造物をN個作りたい。どのようにしたら最も早く完成するだろうか。ただし一年間に出来るだけの個数をつくるとする。我々は経費が充分ないので、適当な計画降水量を定めこれに応じて一年間に出来るだけの個数をつくる

ことにし、残りは次年度以降にまわすものとする。すなわち、今年度につくる建造物の個数を n とすると、

$$n A R_d = C = \text{一定}$$

である。ただし、 R_d は計画降水量で、 $A R_d$ は一個の建造物をつくるに必要な経費である。いま平均の年最大日降水量を R_0 とし、

$$\frac{C}{N} = C_0 = \gamma A R_0$$

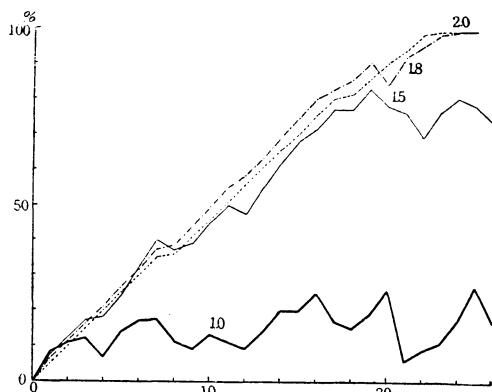
とおくと、

$$n A R_d = N \gamma A R_0$$

すなわち、 $n/N = \frac{\gamma R_0}{R_d}$ となる。

一年を時間単位とし、全国を10の地区にわけ、各地区ではでたらめに年最大日降水量が現われるものとする。年最大日降水量が R_d より大きければその地方は全部破壊し、作りなおさなければならぬとする。経費は各地区に一律にわけ、適当な計画降水量のもとに各地区毎に出来るだけ多数の建造物をつくることにする。もしある地区が全部完成したとすると、その経費はあるが、それは残りの地方に平等に追加配分するとする。

このようにした場合、計画降水量をいろいろ変化していった時の建造物の出来上り具合はどうであろうか。鹿児島の場合を例にとり、 $\gamma=0.1$ の場合を調べてみよう。いま、 $R_d=R_0$ 、 $1.5R_0$ 、 $1.8R_0$ 、 $2R_0$ ととり、全国平均の完成した構造物の100分率を思考実験で求めてみると第4図のようになる。図中の数字は R_d を表す係数である。



第4図 計画降水量と建造進行率

これからわかるように設計降水量を R_0 にとった場合はすぐに破壊が起るので、すぐ飽和し、完成率は平均16%程度を上下する。計画降水量を $1.5R_0$ とするとほぼ時間に比例して増し前よりも完成率はよくなり、70%程度で飽和に達する。つぎに $2R_0$ とすると、ほぼ同じ割合で増加し、23年後にはほとんど100%完成する。もし $1.8R_0$ とすると、 $2R_0$ の場合よりは幾分早く増加するが、20年後にははえって $2R_0$ の場合よりは小さくなる。もし $3R_0$ にすると、100%出来上る時間はかなりお

くれることになる。これから、なるべく早く完成するには $1.8R_0$ ないし $2R_0$ を計画降水量にすればよいことがわかる。そして、100%出来上れば、あとは稀に起る災害を除いて年々経費は余ることになるので、資本の蓄積となるのである。この資本の蓄積を見ると、稀に起る災害に支出されるので、前節の考え方を導入し、非常に長い目では $3R_0$ 程度にした方が多く残ることになる。すなわち、これから考えると、なるべく早く多くの建造物を作るという点では計画降水量を $2R_0$ くらいにしておくのがもっともよく、これは非常に長い目でみた経済的な計画降水量にくらべ6割程度であるということになる。

ここでは一つの例について考察したのであって、上述のような結論が一般的にいえるかどうかはわからない。しかし、定性的な結論はかなり一般化されるようと思われる。

7. む す び

以上非常に抽象化したモデルについて防災対策の方針を考察して来たが、これらの考察から定性的ではあろうがいくつかの結論が得られるよう思われる。

第一に不徹底な防災対策は無意味であり、いくら費用を注いでも無駄になる。

つぎに防災対策に気象の方面から寄与する資料は計画破壊力の大きさであり、これには年最大値の平年値を指數にするのが適当のように思われる。これに経済条件を入れ、平均の年最大値の何倍かを計画破壊力とすればよい。たとえば少い費用でなるべく多くのものを作るには場合により違うが雨の場合平年値の2倍を設計降水量にすればよいが、長い期間について経済的にするためには3倍くらいにする必要がある。この計画破壊力をきめる要素としては建造物の経費の違い、強度の半減期があり、半減期が長い程、また計画破壊力の増加に対する経費の増加が少いほど大きな計画破壊力にした方が経済的である。

これらの結論はすでに抽象的には知られていたことであろう。しかし、ここに述べた方法によると概算ではあるが数値的に考察出来る利点がある。具体的な防災対策をすることは筆者の任務ではないが、この方法がその方面に取り入れられ、より効果的防災対策の一助となれば幸いである。

なお、計算に際し、いろいろお手伝いを得た喜島則子嬢に感謝する。また、この研究の費用の大部分は損害料率算定会より出ているので厚く御礼申し上げたい。

文 献

- (1) 1955, マク・クラッケン; モンテ・カルロ法; アメリカーナ, 1, 1号
- (2) 1952, 安芸皎一; 河川工学序説(アルス)
- (3) 1955, 高橋浩一郎; 災害のオペレーション・リサーチ, 天氣, 2, 1号