地震が来る「確率」とは？

1. 今年中に地震が来る確率
2. 予測の根拠となるデータ
3. 確率的な予測の考え方
4. 確率的地震予測の数理

確率論的 地震動 予測地図

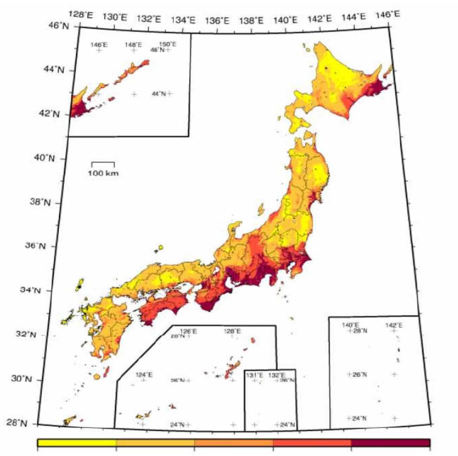
今後30年以内に
震度6以上の
地震が来る確率

⇩

地震の強さ、期間、確率の
うち2つを固定して、残る1
つを求めている

⇩

地震ハザードステーション
防災科学技術研究所



引用：2011 国立研究開発法人
防災科学技術研究所 HPより

2011年5月、政府の「地震調査委員会」が発表

87% の確率で地震が来る

2011年5月14日
浜岡原子力発電所
が運転停止

首相が要請した

今後
- 30年以内に
- 確率 87 % で
- M 8.0 規模の
- 東海地震が
- 単独で

発生する

東日本大震災：2011年（平成23年）3月11日（金）14時46分

今年中に地震が来るのか？

【疑問】
30年以内で87%の確率ならば → 確率 Q =0.87
1年以内に発生する確率は？ → 確率 P =????

【そもそも確率とは？】
1. 事象が何度も発生する（発生した） ←大前提！
2. 発生する事象を場合分けする
3. 各事象の発生頻度を割合として表す

【考察】
1. ～3. に沿って…

1年目	2年目	3年目
発生する	発生する	…
	発生しない	…
発生しない	発生する	…
	発生しない	発生する
		発生しない

1年以内の発生割合を P とする
発生しない割合は 1-P となる

1年目	2年目	3年目	…	30年目
P	P			
	1-P			
1-P	P			
	1-P	P		
		1-P	…	P
				1-P

30年以内に地震が
発生する確率
Q =0.87

30年以内に一度も
発生しない確率
1 - 0.87

方程式

30年間、一度も
発生しない確率は、
(1 - P) を 30回 掛ける

30年間、一度も
発生しない場合

今年中に地震が来る確率

30年以内に地震が
発生する確率
Q =0.87

30年以内に一度も
発生しない確率
1 - 0.87

30年間、一度も
発生しない確率は、
(1 - P) を 30回 掛ける

$$1 - 0.87 = (1 - P)^{30}$$

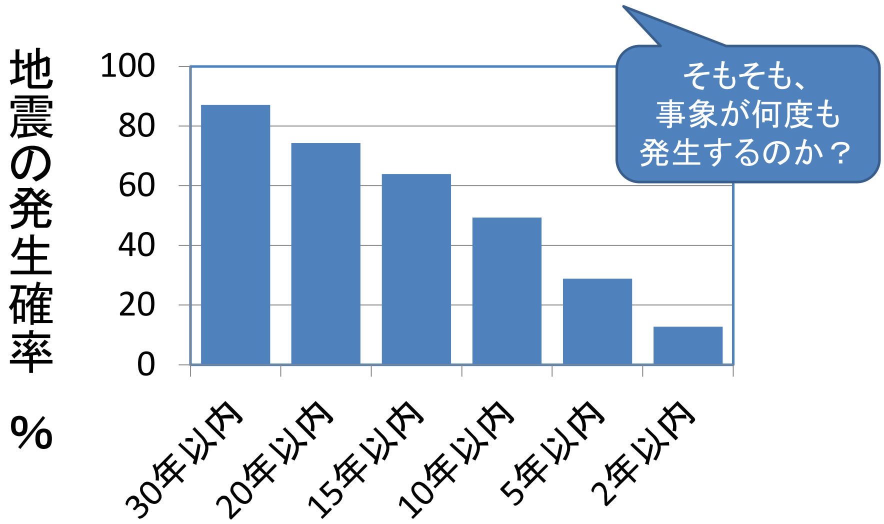
方程式が得られる

1年以内に発生する確率は

$$P = 1 - (1 - 0.87)^{1/30}$$

$$= 0.066 \ (6.6\%)$$

同じように計算すると…



地震が来る「確率」とは？

1. 今年中に地震が来る確率
2. 予測の根拠となるデータ
3. 確率的な予測の考え方
4. 確率的地震予測の数理

「地震調査委員会」が2011年5月に発表

地震確率 87% の根拠は？

1854年　安政東海地震
1707年　宝永地震
1605年　慶長地震
1498年　明応東海地震

使ったデータは
この4つだけ！

これらのデータを
どのように
活用したのか？

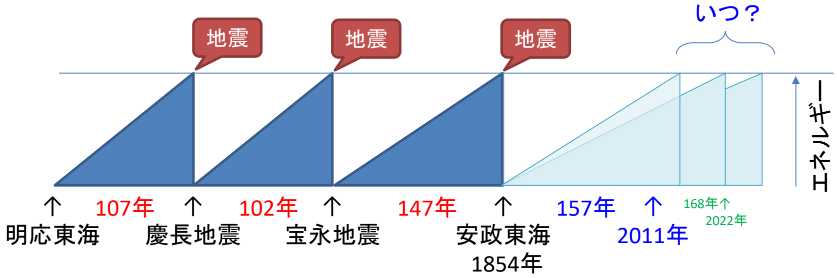
1854年　安政東海地震 「安政見聞録　巻の中」より

1854年　安政東海地震

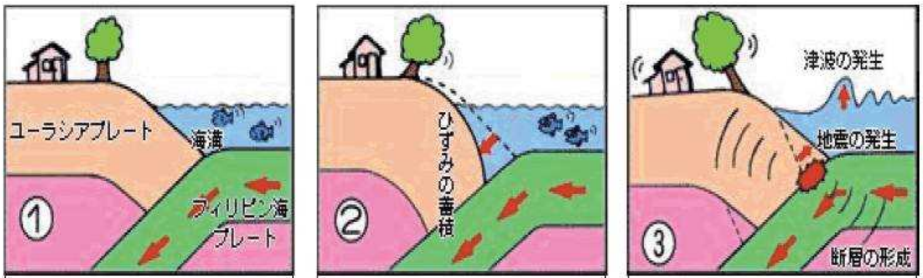
エネルギーが 溜まるのは いつ？

1854年　安政東海地震
1707年　宝永地震
1605年　慶長地震
1498年　明応東海地震

次は何年後？
147　年後
102　年後
107　年後



地震発生のメカニズム

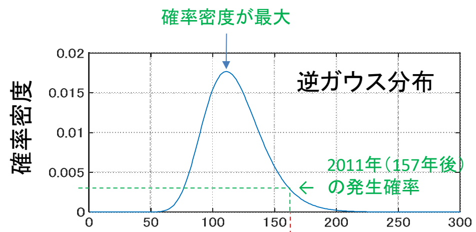


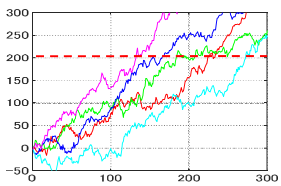
海側のプレートが年数cmの割合で陸側のプレートの方へ移動し，その下へ潜り込む。	陸側のプレートの先端部が引きずり込まれ，ひずみが蓄積する。	ひずみがその限界に達した時，陸側のプレートが跳ね上がり，地震が発生する。その際，津波が発生する場合がある。

内閣府　防災情報のページ
http://www.bousai.go.jp/hakusho/h22/bousai2010/html/zu/index.htm

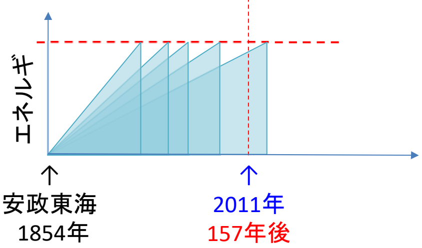
確率的な予測の手順

確率密度関数
を推定





ブラウン運動で
モデル化

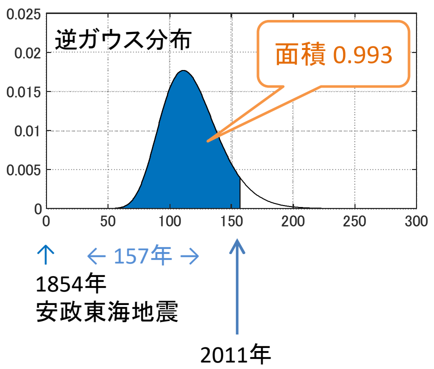


地震が来る「確率」とは？

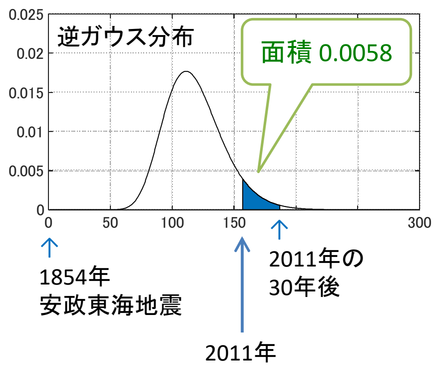
1. 今年中に地震が来る確率
2. 予測の根拠となるデータ
3. 確率的な予測の考え方
4. 確率的地震予測の数理

具体的な確率の計算

1854年から2011年までに
地震が来る確率　99.3 %



2011年から30年後までに
地震が来る確率　0.58 %



条件付確率で計算 → 87%

2011年から30年後までに来る
（事象Aの）確率

0.0058　　$P(A)$

2011年までに発生しない
（事象Bの）確率

1ー0.9933　　$P(B)$

条件付
確率

事象Bが生じる条件下で、
事象Aが発生する確率

0.0058÷（1ー0.9933）＝ 0.87　　$P(A|B) = \dfrac{P(A \cap B)}{P(B)}$

地震確率は 87%

「87%」を　どう解釈するか？

- 僅か3つのデータしか使っていない
- 何度も試行しないと、確率は無意味

されど、

- 前回の地震から既に168年 ※ 2022年の場合
- いつ起こっても、おかしくはない

引用：小林「デタラメにひそむ確率法則」岩波科学ライブラリー

詳細

条件付き確率とは？

事象の発生回数（データ）

	事象Aが生じる	事象Aが生じない
事象Bが生じる	$N(A \cap B)$	$N(A^c \cap B)$
事象Bが生じない	$N(A \cap B^c)$	$N(A^c \cap B^c)$

⇩

事象 B が生じる条件の下で
事象 A が生じる
条件付き確率

$$P(A|B) = \frac{\boxed{N(A \cap B)}}{\boxed{N(A \cap B) + N(A^c \cap B)}}$$

詳細

条件なし確率との違いは？

事象の発生回数（データ）

	事象Aが生じる	事象Aが生じない
事象Bが生じる	$N(A \cap B)$	$N(A^c \cap B)$
事象Bが生じない	$N(A \cap B^c)$	$N(A^c \cap B^c)$

事象 A が生じる回数

$$\boxed{N(A) = N(A \cap B) + N(A \cap B^c)}$$

事象 A が生じない（A^cが生じる）回数

$$N(A^c) = N(A^c \cap B) + N(A^c \cap B^c)$$

⇩

事象 B が生じる条件の下で
事象 A が生じる
条件付き確率

$$P(A|B) = \frac{\boxed{N(A \cap B)}}{\boxed{N(A \cap B) + N(A^c \cap B)}}$$

⇔

事象 B がどうあっても
事象 A が生じる
条件無し確率

$$P(A) = \frac{\boxed{N(A)}}{\boxed{N(A) + N(A^c)}}$$

分母の違いに注意

詳細

確率 の 数理

事象の表現

	事象Aが生じる A	事象Aが生じない A^c
事象Bが生じる B	$A \cap B$	$A^c \cap B$
事象Bが生じない B^c	$A \cap B^c$	$A^c \cap B^c$

独立（AとBが）

$P(A|B) = P(A)$
$P(B|A) = P(B)$

$\therefore \ P(B)P(A) = P(A \cap B)$

余事象の確率

$P(A^c) = 1 - P(A)$
$P(B^c) = 1 - P(B)$

$P(A) = P(A \cap B) + P(A \cap B^c)$
$P(A^c) = P(A^c \cap B) + P(A^c \cap B^c)$

条件付確率 $P(A \mid B)$, $P(B \mid A)$
結合確率 $P(A \cap B) = P(B \cap A)$

$$P(A \cap B) = P(A|B)P(B) = P(B|A)P(A)$$

ベイズの定理

$$\therefore \ P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

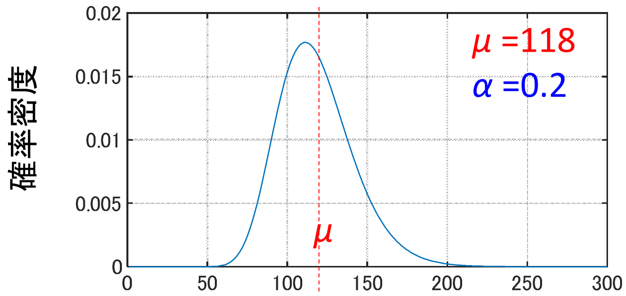
地震が来る「確率」とは？

1. 今年中に地震が来る確率
2. 予測の根拠となるデータ
3. 確率的な予測の考え方
4. 確率的地震予測の数理

この関数、どう導く？

$$f(x) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 x^3}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\mu\alpha^2 x}\right\}$$

逆ガウス分布（BPT分布、ワルド分布）



引用："繰り返し地震活動に基づくプレート境界における準静的滑りの逆推定",
野村 俊一（統計数理研究所） 理論応用力学講演会、2017.8.

MATLAB

```
close all; clear all;
figure('Position',[10 10 300 150]);

a=0.2;
m=118;

x=1:300;
y1=(x-m).^2; y1=exp(-y1./x/2/m/a/a);
y2=x.^(-3); y2=sqrt(y2*m/a/a/2/pi);
y=y1.*y2;
plot(x,y); grid on;

axis([0,300,0,0.02]);
sum(y)
```

野村2015

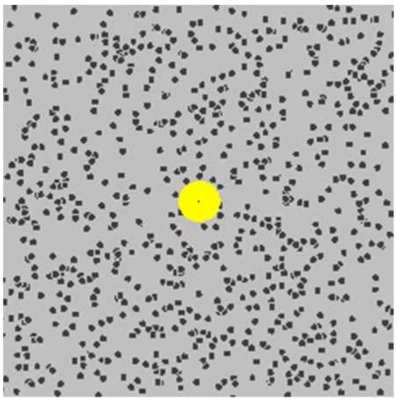
$$f(x|\mu,\alpha) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 x^3}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\mu\alpha^2 x}\right\}$$

MATLAB

$$f(x) = \left(\frac{\lambda}{2\pi x^3}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{\lambda(x-\mu)^2}{2\mu^2 x}\right)$$

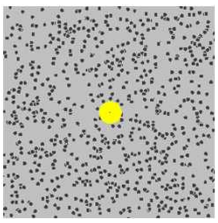
$$\boldsymbol{\lambda = \mu/\alpha^2}$$

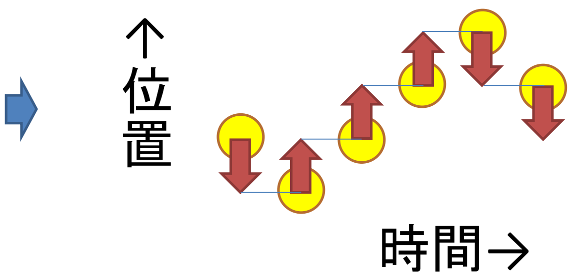
「ブラウン運動」で計算した



ロバート・ブラウンが、水の浸透圧で破裂した**花粉**から水中に流出し浮遊した微粒子を、顕微鏡下で観察中に発見した。 http://ja.wikipedia.org/wiki/ブラウン運動

「ブラウン運動」とは？

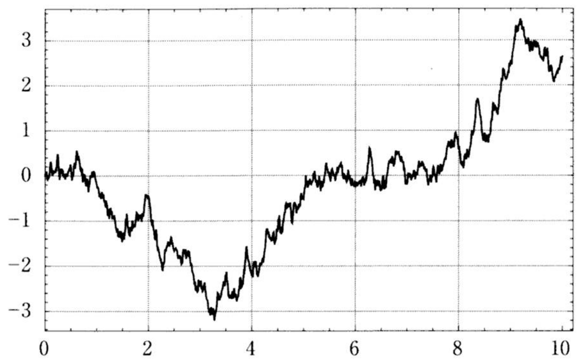




↑か↓かは、全くの出鱈目

「ブラウン運動」の例

↑位置



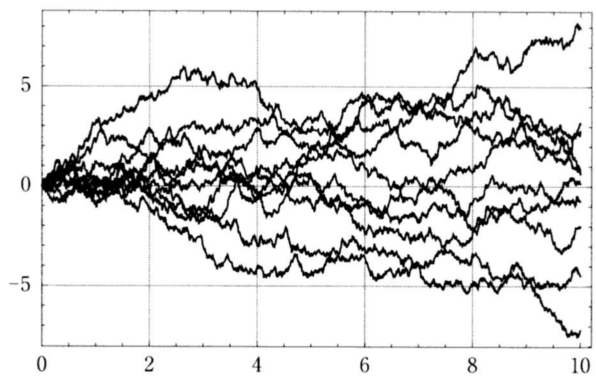
時間→

次の位置 ＝ 今の位置 ＋ 乱数

引用：小林「デタラメにひそむ確率法則」岩波科学ライブラリー

「ブラウン運動」の例

↑位置

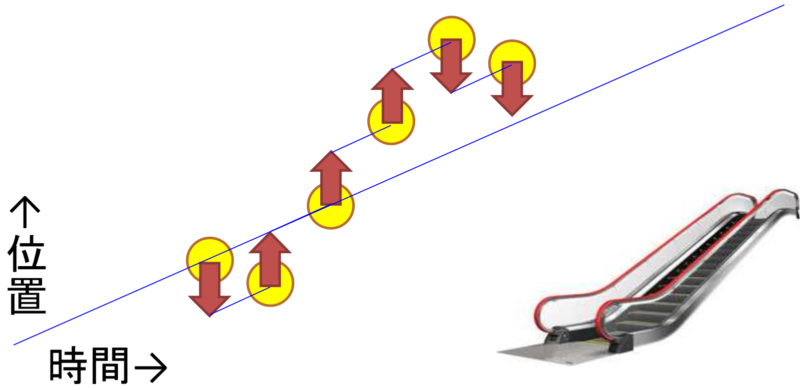


時間→

毎回、違った道を通る

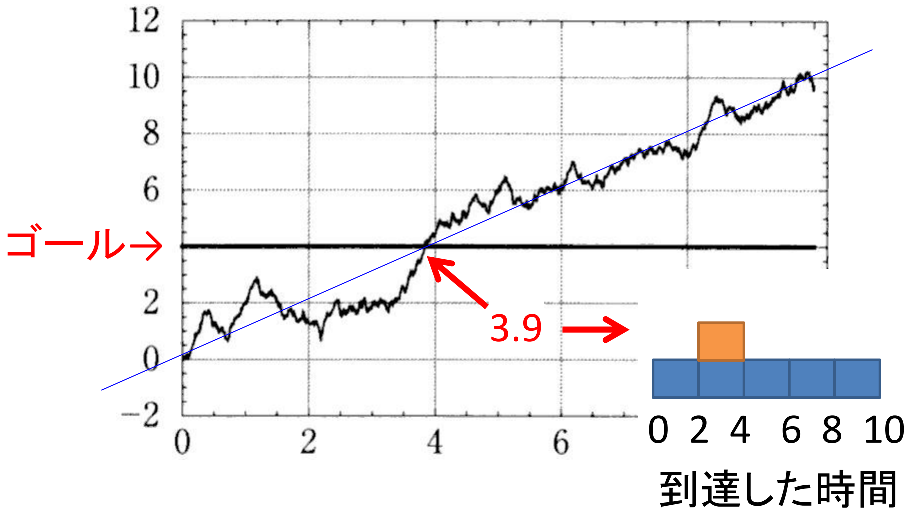
引用：小林「デタラメにひそむ確率法則」岩波科学ライブラリー

エスカレータでブラウン運動



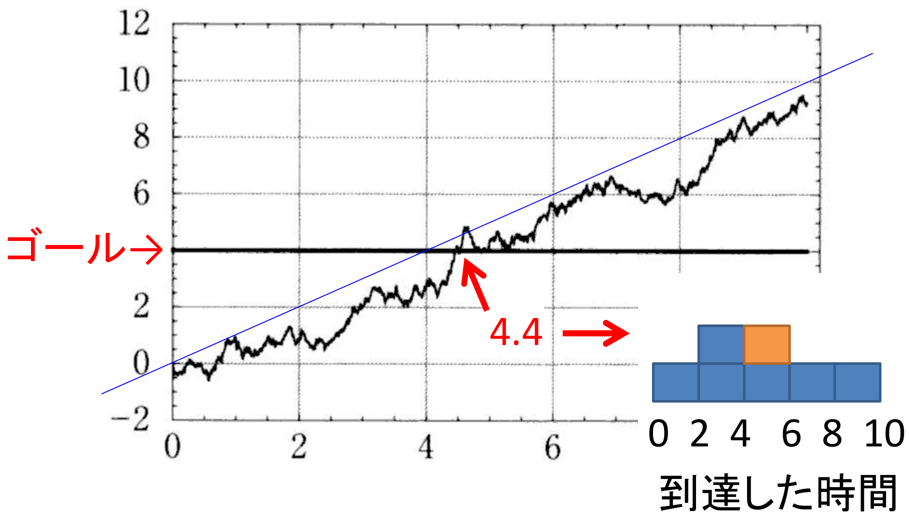
かかは、全くの出鱈目

エスカレータでブラウン運動



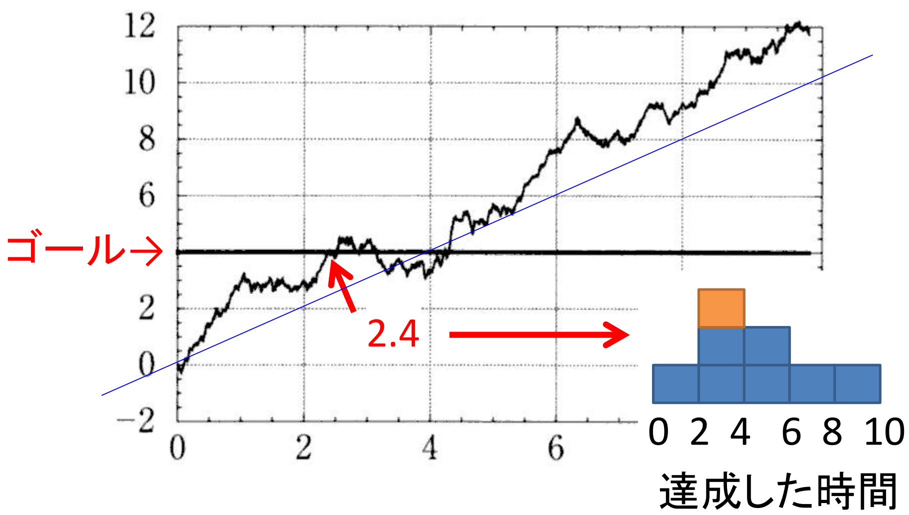
引用：小林「デタラメにひそむ確率法則」岩波科学ライブラリー

エスカレータでブラウン運動

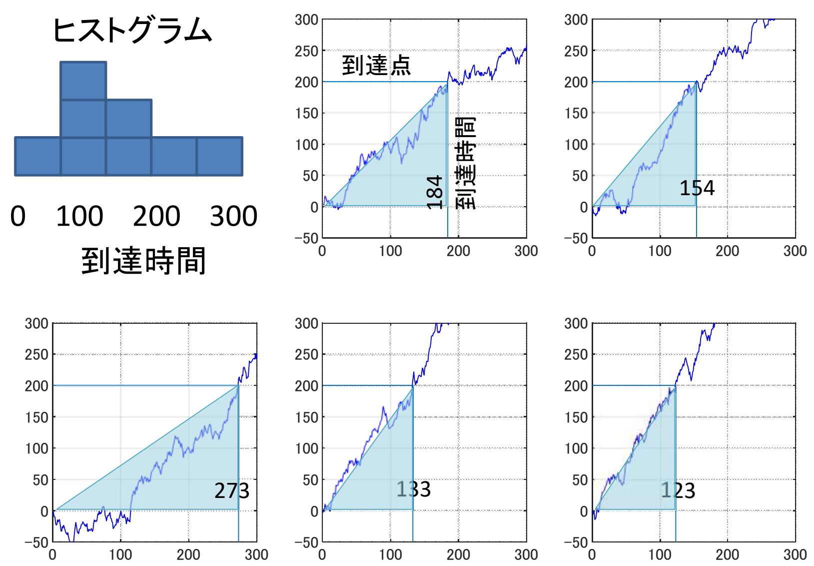


引用：小林「デタラメにひそむ確率法則」岩波科学ライブラリー

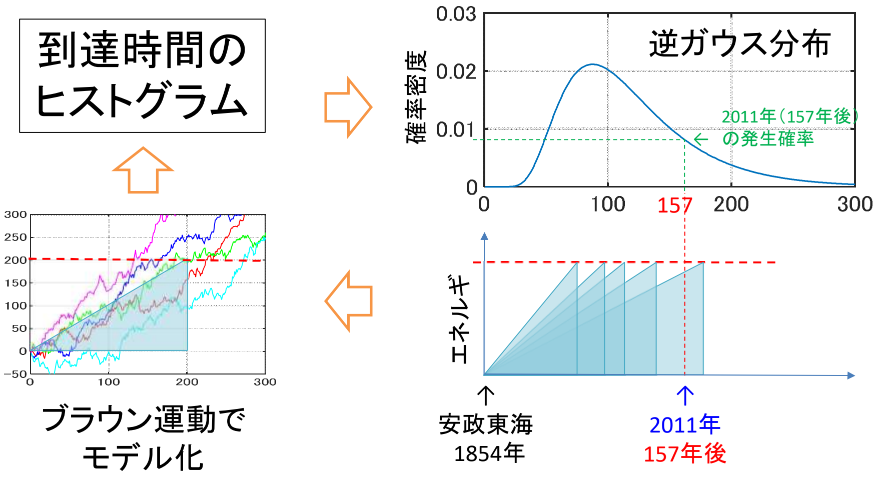
エスカレータでブラウン運動



引用：小林「デタラメにひそむ確率法則」岩波科学ライブラリー

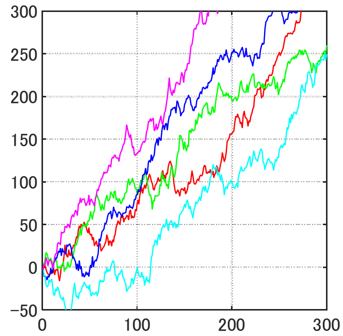


確率密度関数の導出手順



MATLABプログラム

```
close all; clear all;
figure('Position',[10 10 600 400]);

rng(1); sgm=5;

for c=1:6
    y0=0; yy=[];
    for i=1:300
        y=y0+1+randn(1)*sgm;
        yy(i)=y; y0=y;
    end
    i=1:300; subplot(2,3,c);
    plot(i,yy,'b'); hold on;

    mx=min(find(yy>200));
    line([0 mx],[200 200]);
    line([mx mx],[-50 200]);

    axis([0,300,-50,300]); grid on;
    fprintf('%d ¥n',mx);

end
```

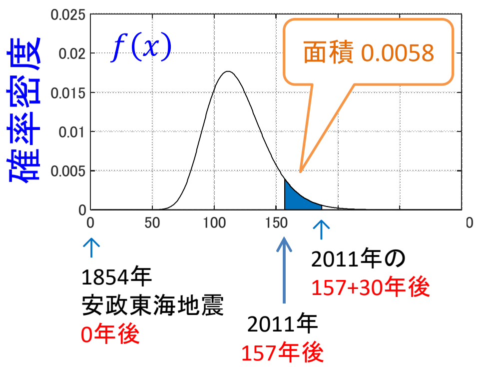


確率密度関数から確率を計算

安政東海地震の
157年後（2011年）から
その30年後までに
地震が来る確率は

0.58 %

$$\int_{157}^{157+30} f(x)dx = 0.0058$$

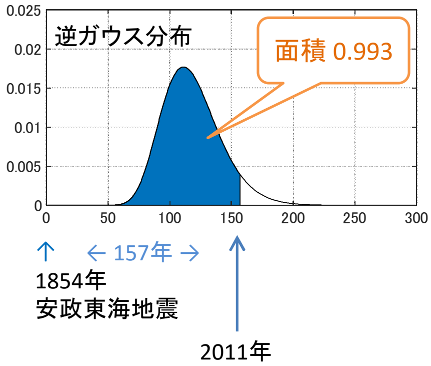


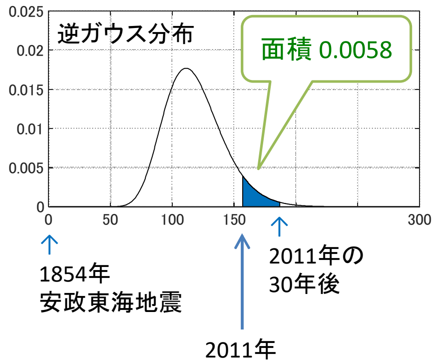
再掲

具体的な確率の計算

1854年から2011年までに
地震が来る確率　99.3 %

2011年から30年後までに
地震が来る確率　0.58 %





再掲

条件付確率で計算 → 87%

2011年から30年後までに来る
（事象Aの）確率

0.0058　$P(A)$

2011年までに発生しない
（事象Bの）確率

1−0.9933　$P(B)$

条件付
確率

事象Bが生じる条件下で、
事象Aが発生する確率

0.0058÷（1−0.9933）＝ 0.87

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

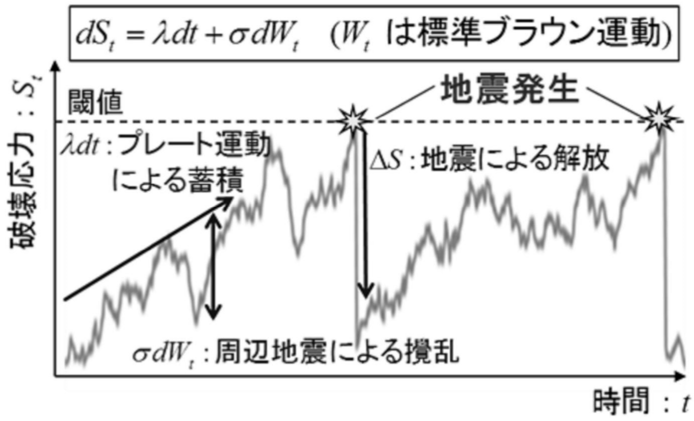
地震確率は 87%

MATLABプログラム

```
close all; clear all;
figure('Position',[10 10 300 150]);

a=0.2;
m=118;

x=157:0.5:187;
y1=(x-m).^2; y1=exp(-y1./x/2/m/a/a);
y2=x.^(-3); y2=sqrt(y2*m/a/a/2/pi);
y=y1.*y2;
area(x,y); hold on;

x=1:0.5:300;
y1=(x-m).^2; y1=exp(-y1./x/2/m/a/a);
y2=x.^(-3); y2=sqrt(y2*m/a/a/2/pi);
y=y1.*y2;
plot(x,y,'k'); hold on;

axis([0,300,0,0.025]); grid on;
```

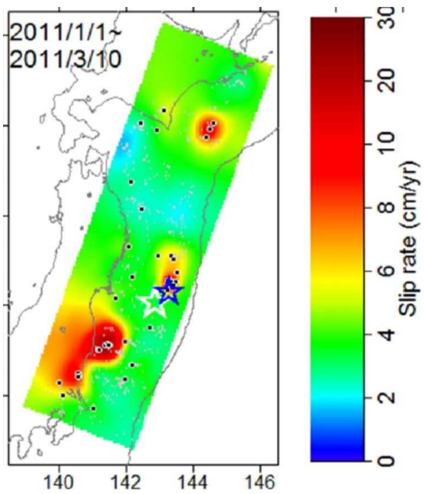
詳細

引用元の論文



引用：”繰り返し地震活動に基づくプレート境界における準静的滑りの逆推定”，
野村 俊一（統計数理研究所） 理論応用力学講演会、2017.8.

詳細



「2011 年 3 月東北太平洋沖地 震(M9.0)の震源のやや北側で数か月前から繰り返し地震が 活発化している. これらはいずれも東北地方太平洋沖地震 の震源域の周辺で発生した滑り加速であり, 東北地方太平 洋沖地震の一つの引き金あるいは前駆的現象と捉えること ができる. 」

～ 論文から引用

引用: "繰り返し地震活動に基づくプレート境界における準静的滑りの逆推定",
野村 俊一(統計数理研究所) 理論応用力学講演会、2017.8.

まとめ

- 確率的な予測の例を紹介
  - → どう解釈するかは受取側の課題
  - → 他にも色々な計算方法がある
- 確率はデータから計算される割合
  - → 多数回の試行(多くのデータ)が必要

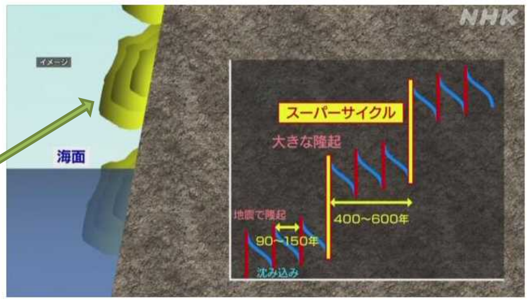
痕跡調査で浮かぶ「スーパーサイクル」“超”巨大地震の周期

2021年3月11日 20時00分 NHKニュース

- 宍倉グループ長が注目したのは、この、層状に積み重なった化石がさらに標高の高い場所から相次いで見つかったことです。
- 「スーパーサイクル」の巨大地震が起きると、“隆起”の規模も大きくなります。
- このため化石の高さの差が「スーパーサイクル」を知るいわば“物差し”にあたると考えたのです。
- さまざまな場所から集めた過去およそ5500年分の化石を分析したところ少なくとも7回、ふだんの大地震とは明らかに異なる「スーパーサイクル」の巨大地震の地盤の“隆起”を確認。
- その周期はおよそ400年から600年だったことを突き止めました。

およそ5500年分の化石の年代を調べたところ、おおむね400年から600年の周期で地盤が大きく隆起し、巨大地震が起きていた可能性が高いことを突き止めました。

離れた場所の化石・スーパーサイクルの“物差し”に



https://www3.nhk.or.jp/news/html/20210311/k10012909391000.html?utm_int=all_side_ranking-access_001