

日本の降雨極値データに見る 長期変化傾向

唐沢 好男

本発表の詳細は下記技術レポート YK-086 にまとめています

http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/YK-086_Rainfall_Statistics_5.pdf

発表の内容

1. 目的
2. 地球温暖化問題
3. 降水量データ
4. 降雨量(日・時間・10分間)年間最大値データの
長期的傾向
 - ・多地点データを回帰直線で見ると
(95%信頼区間評価で増加傾向の有意性を見る)
 - ・多地点データを多項式近似曲線で見ると
 - ・次数選択の判断手法:AIC(赤池情報量規準)
5. 解析結果と $R_{0.01}$ の未来予測

目的： 将来における降雨減衰推定法の見直しの是非

降雨減衰推定の基本式（衛星回線： ITU-R P. 618、 地上回線： ITU-R P. 530）

$$A_{0.01} = kR_{0.01}^{\alpha} L_e$$

年間時間率0.01%の
降雨減衰量 (dB)

降雨伝搬路の等価通路長 (km)

降雨強度 (mm/h) の年間時間率0.01%値
(1分間降雨強度測定値を使用)

$R_{0.01}$ のデータベース

世界全体： ITU-R P. 837

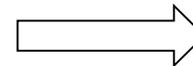
日本： 総務省電波法関係審査基準
(出典は小野等(2008))

地球温暖化問題
(気温の長期的上昇)



降雨統計への
影響は？

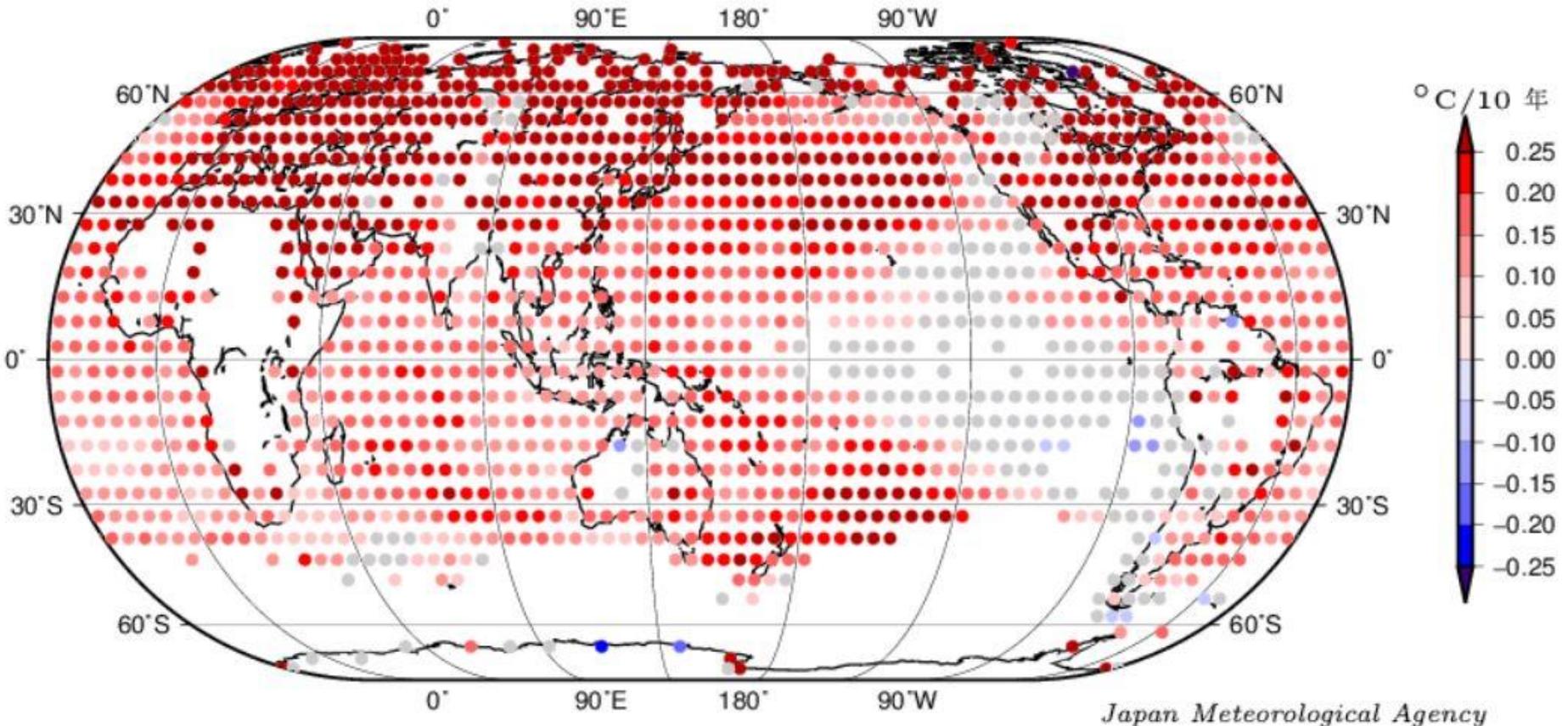
if 影響あり



将来における
 $R_{0.01}$ データベース
の見直し

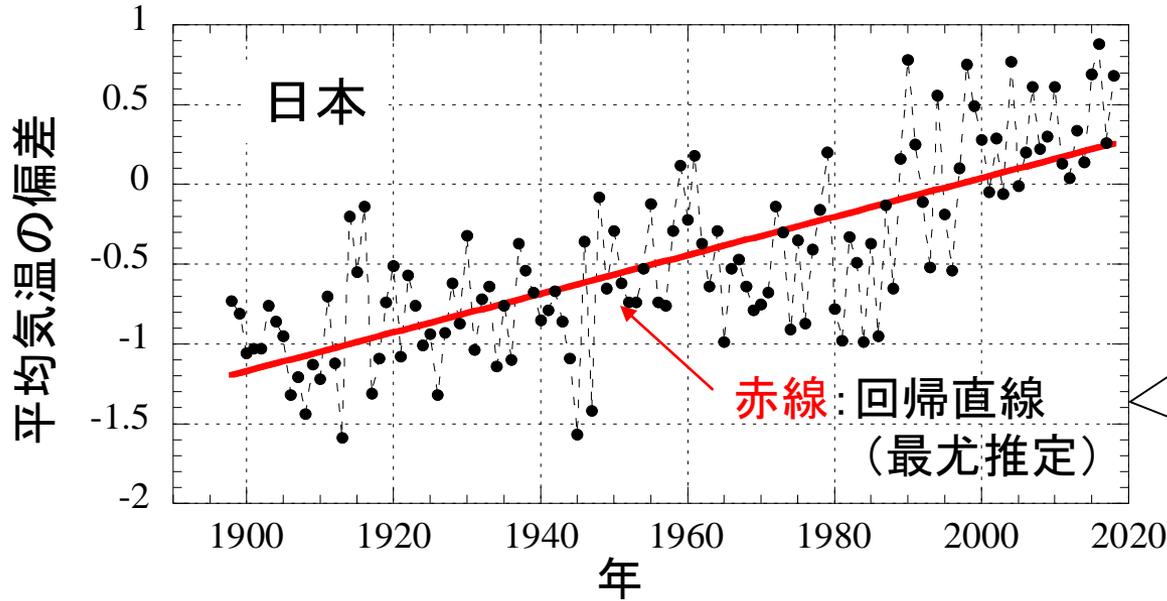
地球温暖化問題：それは確実にある

年平均気温長期変化傾向 1979-2023



世界(地上+海上) : $0.73^{\circ}\text{C}/100\text{年}$

地球温暖化問題：それは確実にある

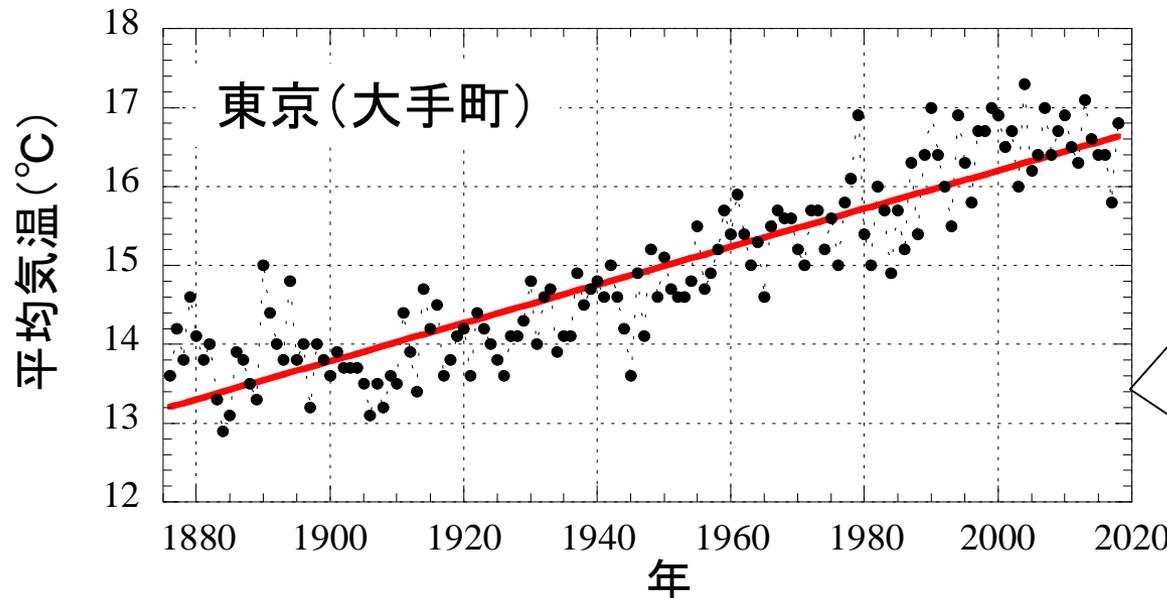


世界(地上+海上)

0.73°C/100年

日本：都市化による影響が比較的小さい15地点の平均

1.21°C/100年



東京(大手町にある東京管区気象台エリア)は都市化率(92.9%)、気温の上昇率ともに、日本の都市の中で最大であり、ヒートアイランド現象が最も強く現れているエリア

約 3°C/100年

気温は、確実に年々上昇しつつある(地球温暖化)

では、雨の降り方も変わってきているのだろうか?

気温が上がると大気中に含まれる水蒸気量の最大値(飽和水蒸気量)も増えるので、潜在的な意味で、大雨になる可能性は高まる(気温 1°C 上昇で飽和水蒸気量は約7%増加)

でも、結論を出すには微妙かつ難しい問題

これを統計によって調べてみたい

日本各地での強い雨の降り方の長期的な変化を調べる

日降水量の年間最大値

→ 大きくなると、豪雨災害をもたらす

1時間降水量の年間最大値

→ 大きくなると、電波の減衰(強度低下)をもたらす

10分間降水量の年間最大値

→ 大きくなると、電波の減衰(強度低下)をもたらす

利用する統計的手法

- ① 回帰直線と区間推定: 間違った結論を出さないために
- ② 赤池情報量基準(AIC): より良いモデルを見出すために

この解析に用いた降水量データ(気象庁のHPより)

日本各地の降水量年間最大値

日降水量	45地点	100年間	(1924 - 2023)	(1-day_1)
	45地点	130年間	(1894 - 2023)	(1-day_2)
時間降水量	45地点	80年間	(1944 - 2023)	
	47地点	70年間	(1954 - 2023)	

降水量の年間最大値は全て降雨によるものなので
降雨量と読み替えられる

年ごとの値

一覧表

グラフ

主要要素

詳細(気圧・降水量)

詳細(気温・蒸気圧・湿度)

詳細(風)

詳細(日照・雪・その他)

地点

降水量(最大)

東京 年ごとの値 主要要素

年	気圧(hPa)		合計	降水量(mm)			気温(°C)					湿度(%)		平均 風速	最 風速
	現地 平均	海面 平均		最大			平均			最高	最低	平均	最小		
				日	1時間	10分間	日平均	日最高	日最低						
1875			1219.2]	94.0]			17.0]	21.9]	12.2]	35.1]	-3.6]				
1876		1014.7	1755.5	76.2			13.6	18.7	8.3	35.6	-9.2	78			
1877		1015.2	1317.3	79.9			14.2	19.1	8.9	34.9	-4.8	77			
1878		1015.2	1764.2	150.9			13.8	18.3	9.6	35.1	-7.6	79			
1879		1014.5	1492.7	99.8			14.6	19.4	10.0	33.9	-5.5	77			
1880		1015.0	1685.7	116.7			14.1	19.2	9.1	33.2	-6.8	76			
1881		1015.1	1444.4	86.4			13.8	18.8	8.5	34.2	-8.4	78			
1882		1015.2	1478.3	109.7			14.0	18.6	9.0	34.2	-6.3	77			
1883		1015.0	1552.6	125.6			13.3	17.8	9.1	32.8	-7.8	76			
1884		1014.9	1314.8	72.2			12.9	17.7	8.6	33.3	-7.7	76			
1885			1531.7	149.5			13.1	17.5	9.1	31.8	-9.1	77			
1886							13.9	18.7	9.9	36.6	-7.7	75			
1887							13.8	18.6	9.7	32.6	-7.9	76			
1888							13.5	18.5	9.3	32.8	-7.5	75			
1889							13.3	18.0	9.3	33.3	-8.1	74			
1890							15.0	19.4	11.0	33.9	-5.8	77			
1891							14.4	19.3	10.0	34.4	-6.7	72			
1892							14.0	18.6	10.0	34.4	-6.8	73			
1893		1014.0	1161.3	56.3	28.1]		13.8	18.8	9.4	34.4	-7.2	71			
1894		1014.4	1320.8	132.8	52.9]		14.8	19.6	10.6	35.1	-5.3	73			
1895		1013.8	1397.8	133.0	22.6]		13.8	18.7	9.8	33.0	-5.7	74			
1896		1014.4	1373.9	74.0	22.2]		14.0	18.7	10.1	34.3	-5.6	74			
1897		1014.6	1497.2	73.2	34.1]		13.2	17.7	9.2	34.0	-7.0	75			

「年」をクリックすると「月」が出る
 「月」をクリックすると「日」が出る
 「日」をクリックすると「時間」が出る
 (ビッグデータ、日本の宝)

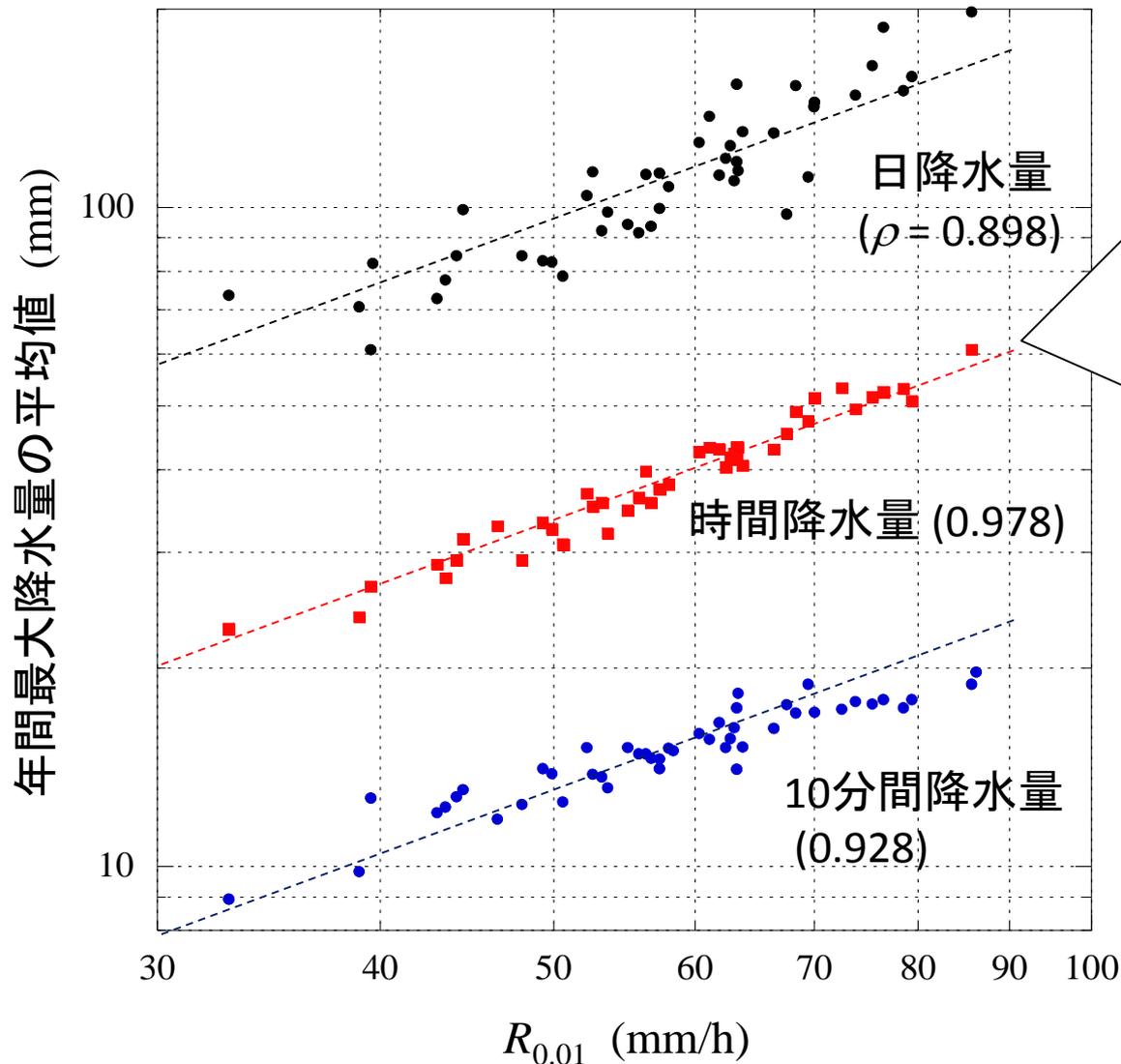
解析に用いた雨量データ(地点と年間最大値の平均(mm))

No.	Site	Region	1-day_1	1-day_2	1-hour	10-min	$R_{0.01}$
1	Sapporo	A	73.65	72.55	23.01	8.93	32.9
2	Aomori	A	70.81	70.12	23.93	9.84	38.9
3-1	Morioka	A	77.79	-	27.40	12.33	43.5
3-2	Miyako	A	-	124.29	-	-	46.3
4	Akita	A	83.13	85.12	33.31	14.10	49.3
5-1	Ishinomaki	A	82.39	83.80	-	-	36.9
5-2	Sendai	A	-	-	32.89	11.80	46.5
6	Yamagata	A	72.80	74.37	28.77	12.08	43.0
7	Fukushima	A	84.61	84.38	29.22	12.76	44.1
8	Mito	B	107.68	105.87	38.06	15.15	58.0
9	Utsunomiya	B	111.36	108.91	47.39	18.93	69.4
10	Maebashi	B	97.75	96.87	45.41	17.63	67.5
11	Kumagaya	B	113.89	113.43	43.33	18.32	63.4
12-1	Katsuura	B	144.50	-	51.43	17.15	70.0
12-2	Choshi	B	-	118.34	-	-	61.0
13	Tokyo	B	125.66	122.89	42.61	15.95	60.3
14	Yokohama	B	130.57	129.26	40.60	15.20	63.8
15	Niigata	B	78.80	77.85	30.88	12.56	50.6
16	Fushiki	B	91.65	91.39	36.39	14.83	55.8
17	Kanazawa	B	99.88	99.35	37.40	14.09	57.3
18	Fukui	B	92.37	93.94	35.67	13.67	53.2

総務省 電波関係
 審査基準
 (2011)より
 単位: mm/h
 AMeDASデータ
 (1976~2002)
 ・1-h rainfall
 1976~
 ・10-m rainfall
 1995~
 ・1-m rainfall
 1996~
 変換手法を用いて
 1分間降雨強度
 CDFに換算
 (小野等, 2008)

以下、47 Naha
 まで

日本全国45 or 47箇所における
 $R_{0.01}$ と各種降雨量年間最大値の平均値との相関



時間降水量
 日本全国45箇所

相関係数; 0.978

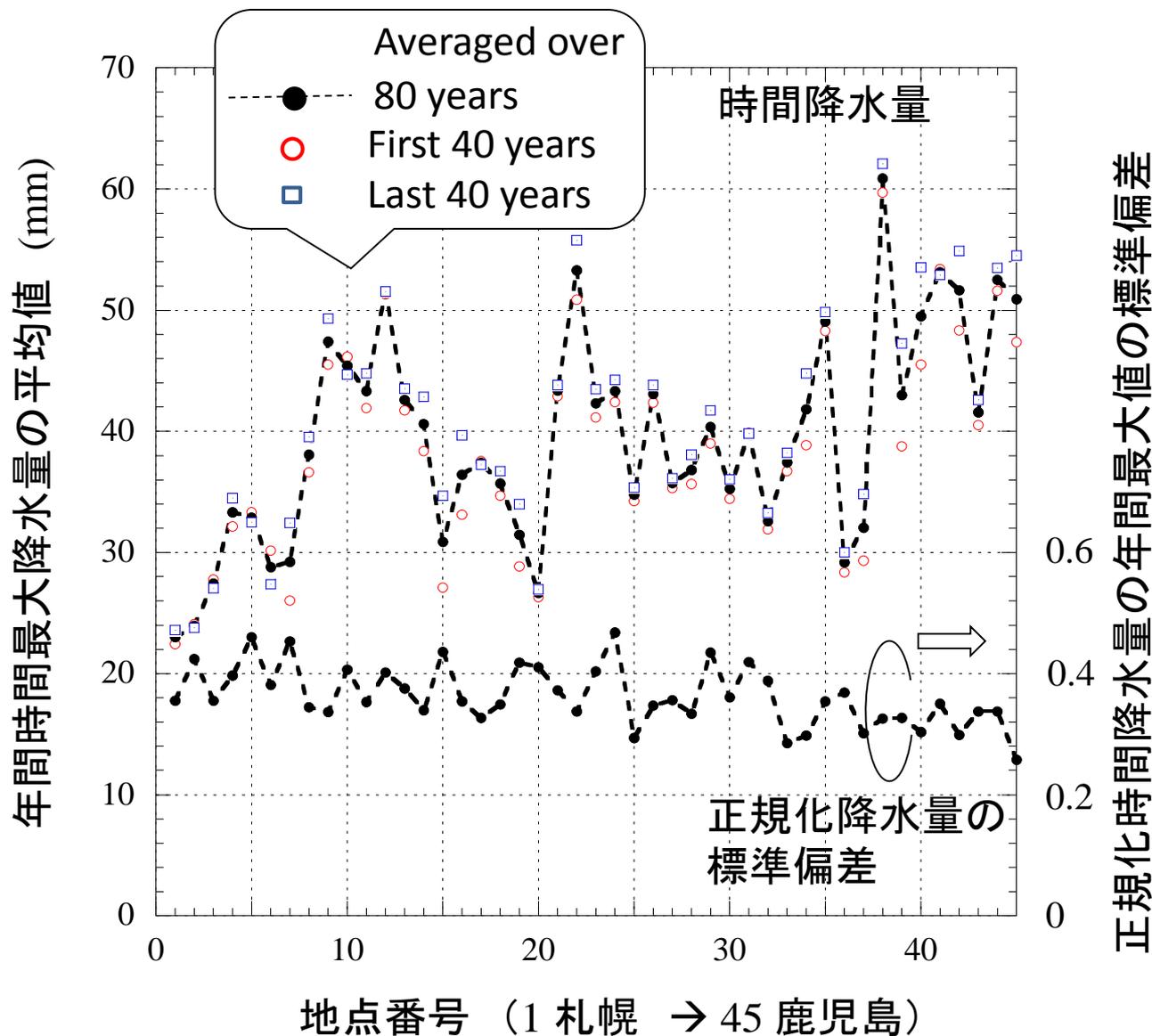
近似式

$$R_{0.01} = 1.5 \langle R_{1h, \max} \rangle$$

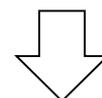


時間降雨量年間最大
 値の長期的変化傾向
 を調べれば、 $R_{0.01}$ の
 変化傾向も予想できる

各地点における時間降水量年間最大値の全期間平均値、および、正規化降水量の対象期間でのばらつきの標準偏差

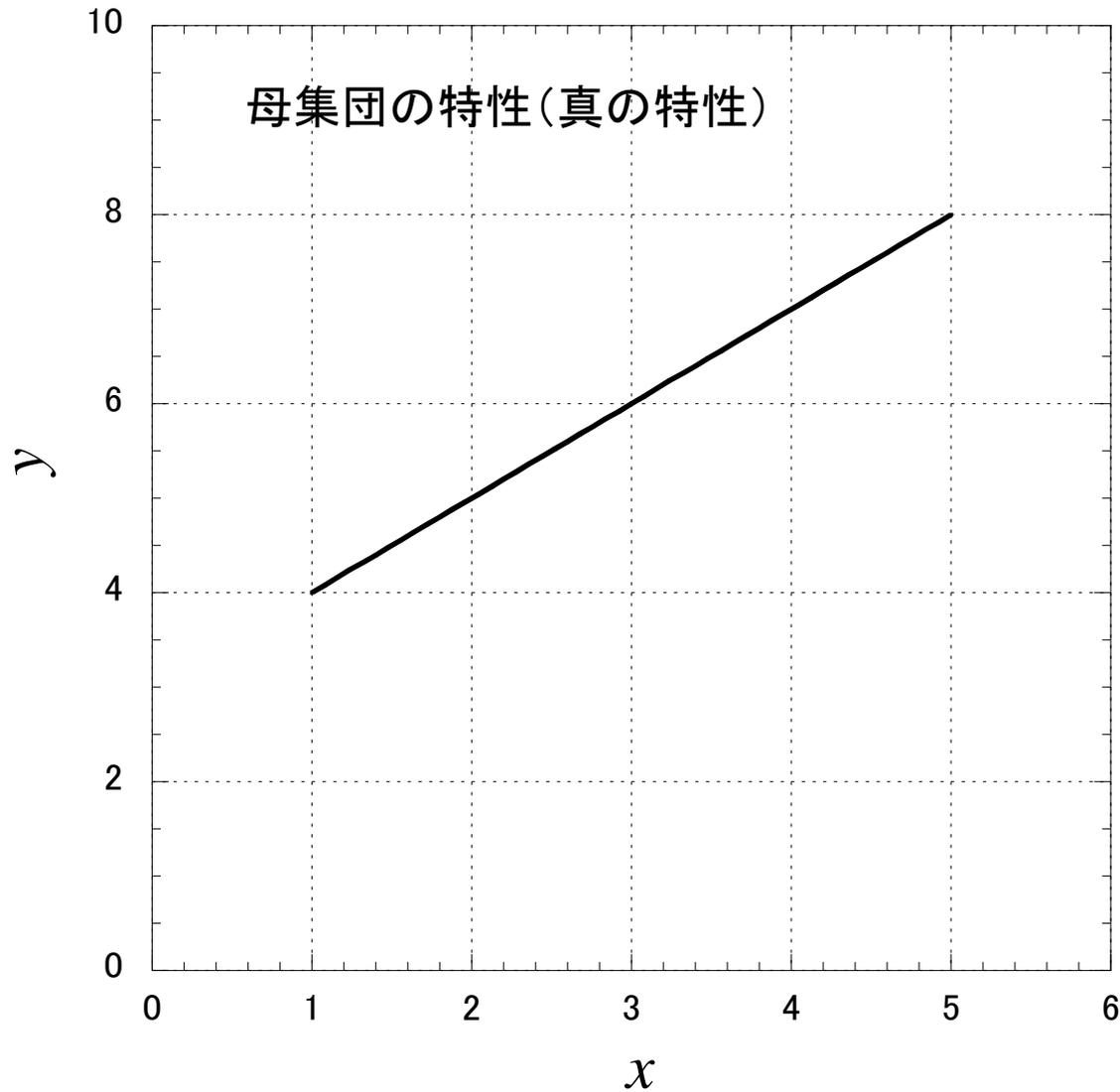


降水量そのものの地域依存性は大きい
が、正規化降水量の標準偏差の大きさの地域依存性は小さい



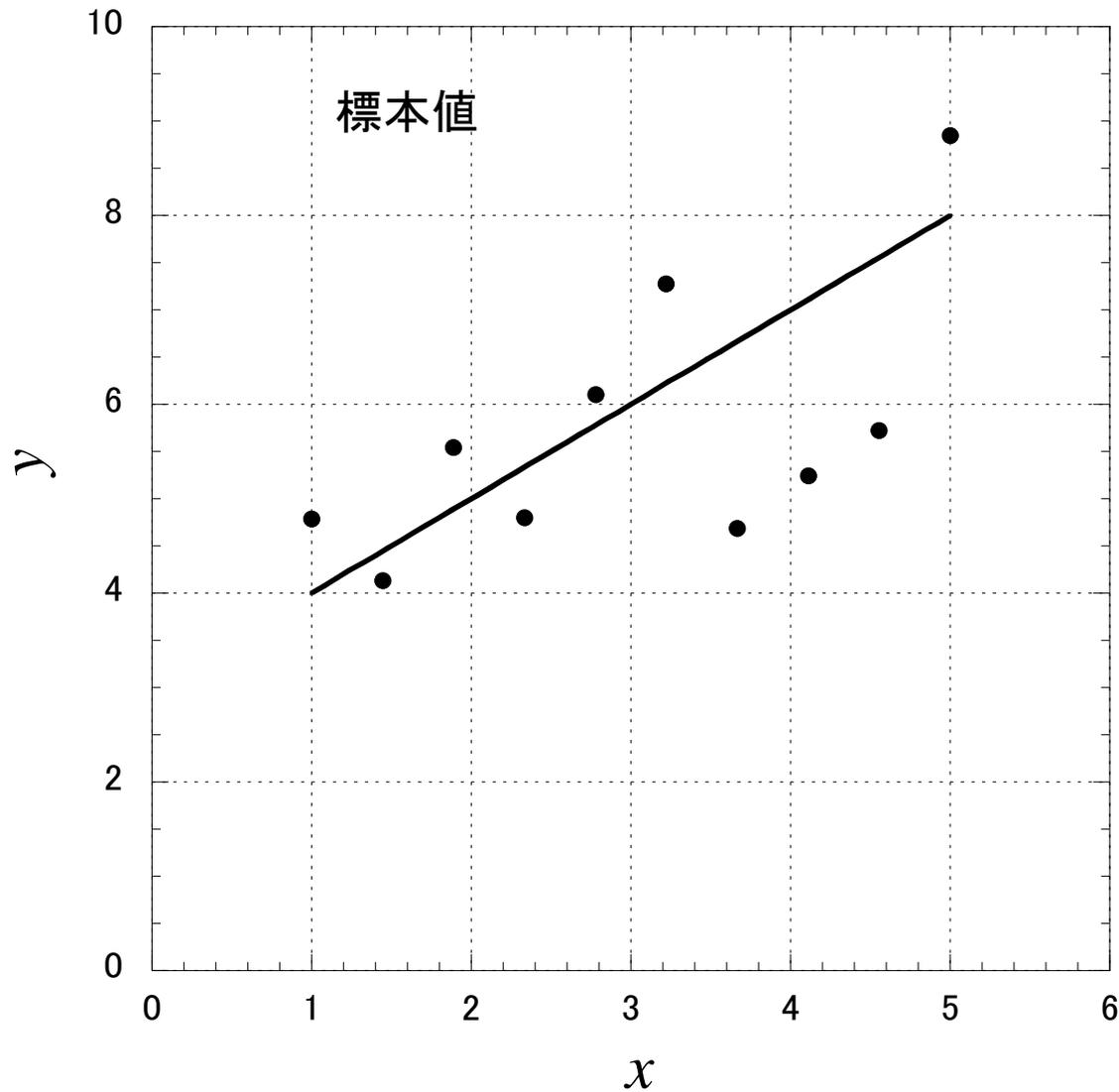
日本全国の雨量をそれぞれの地の平均値で正規化した降雨量で、日本全体の特性を調べる

解析の道具： 直線回帰と信頼区間



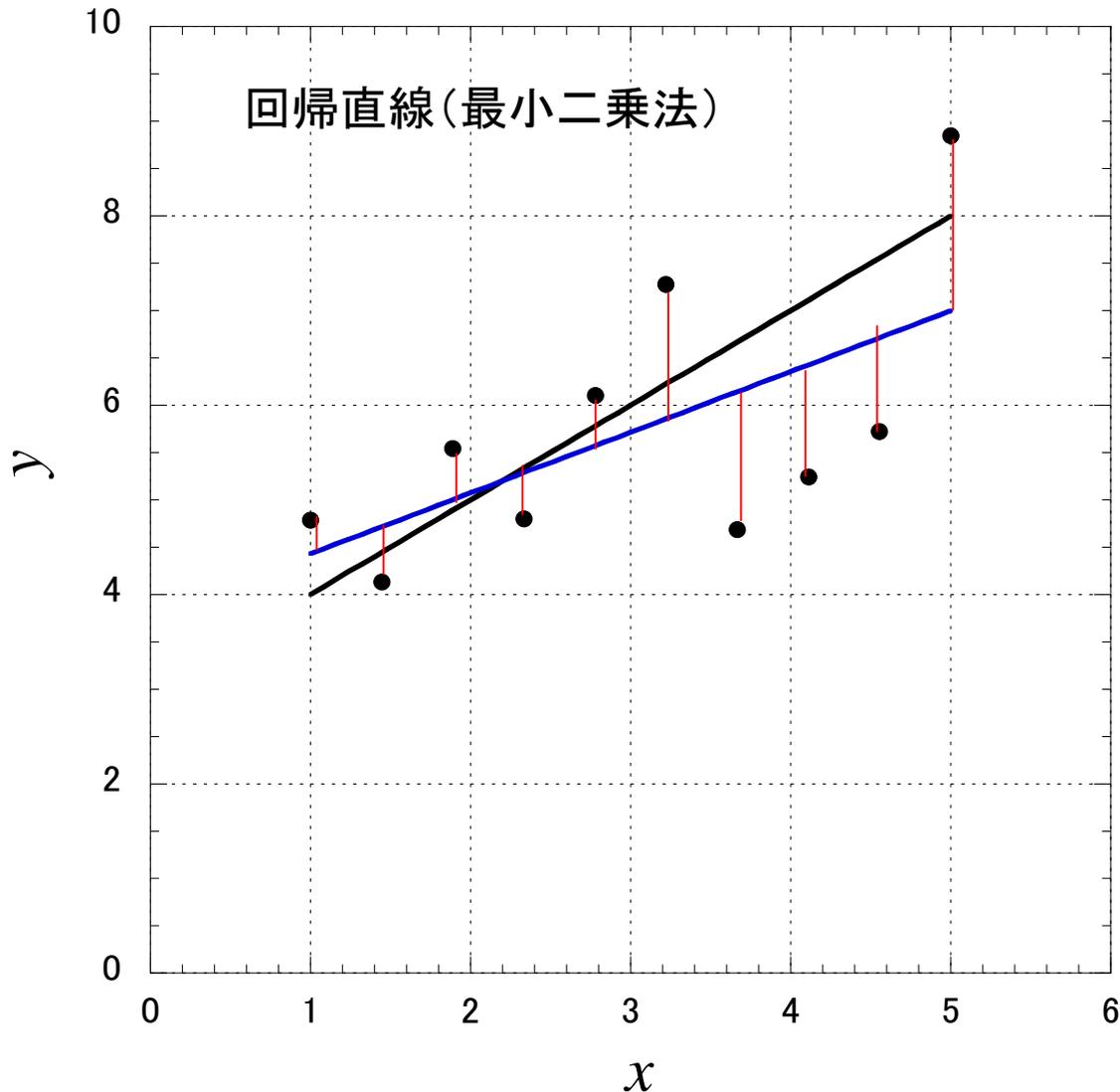
真の特性を
我々は知らない

解析の道具： 直線回帰と信頼区間



知りえるのは
標本値のみ

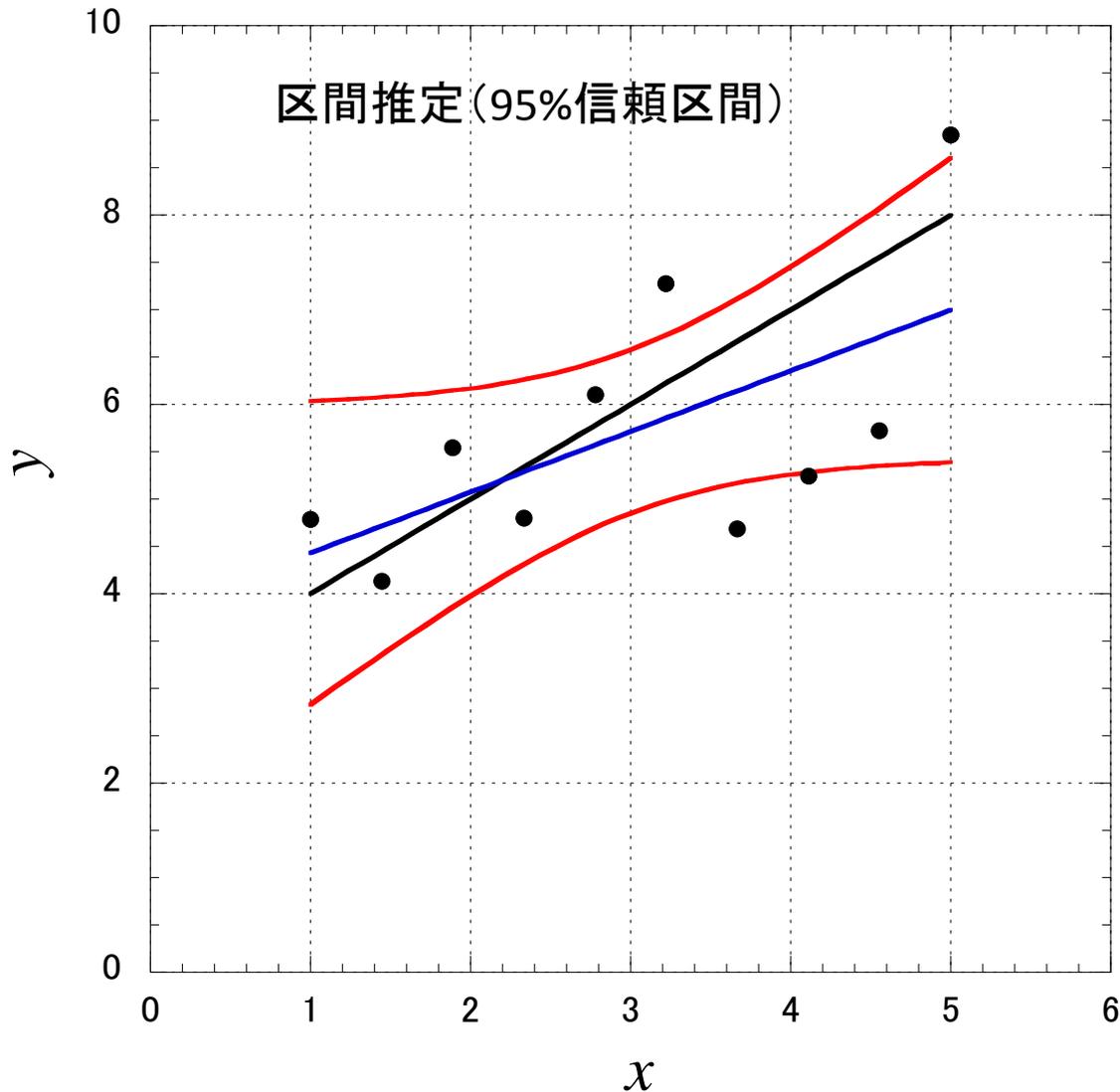
解析の道具： 直線回帰と信頼区間



標本値から
真の特性を推定する

最小二乗法は最尤
推定である。ただし、
それがどの程度正
しいかは分からない

解析の道具： 直線回帰と信頼区間



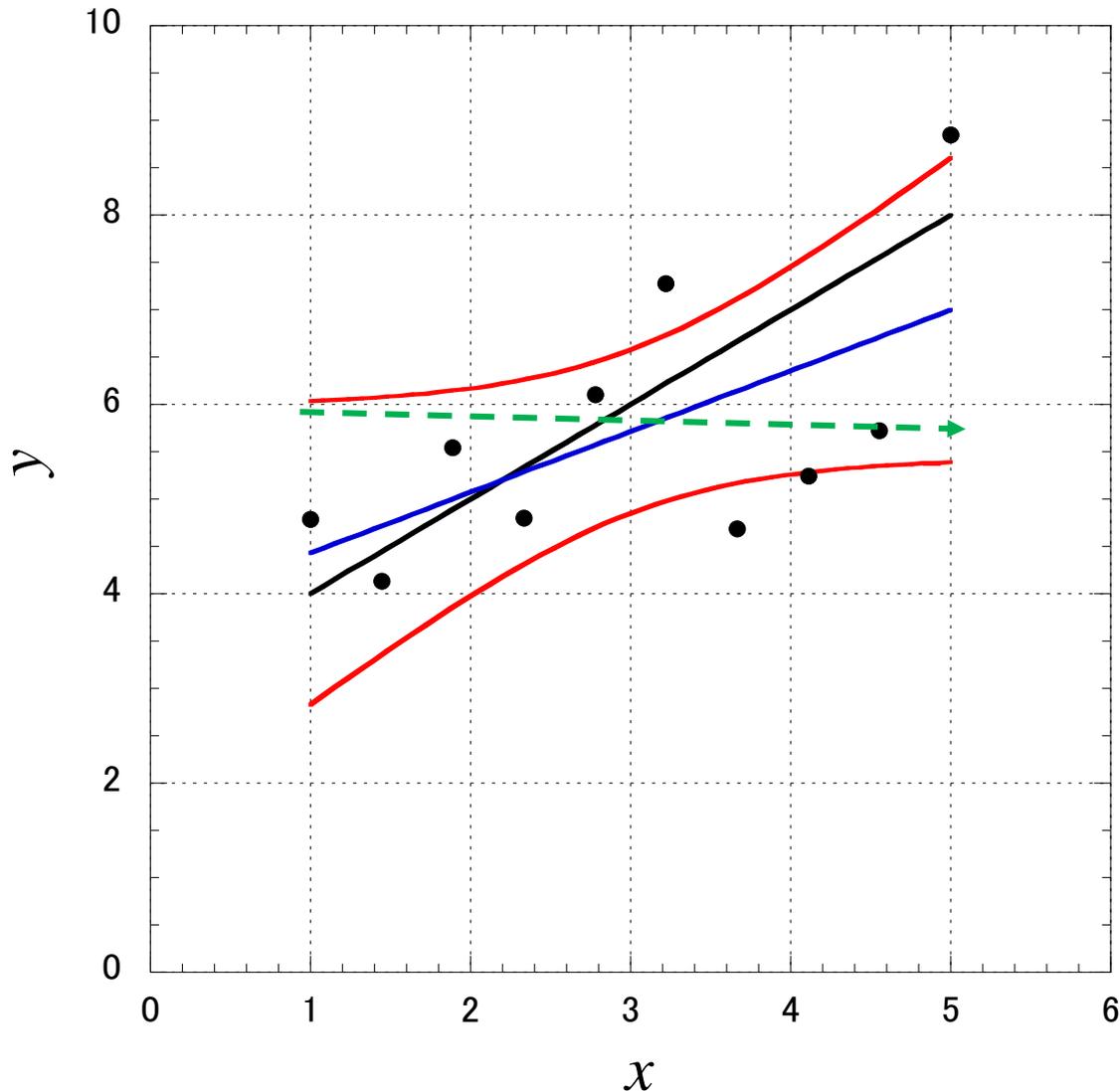
区間推定：
真の特性が存在
するであろう確
率を定めて、区
間で表す

確率値は
90%, 95%, 99%
等

以下では95%基
準を採用

信頼区間の計算
法は教科書で学
んでほしい

解析の道具： 直線回帰と信頼区間



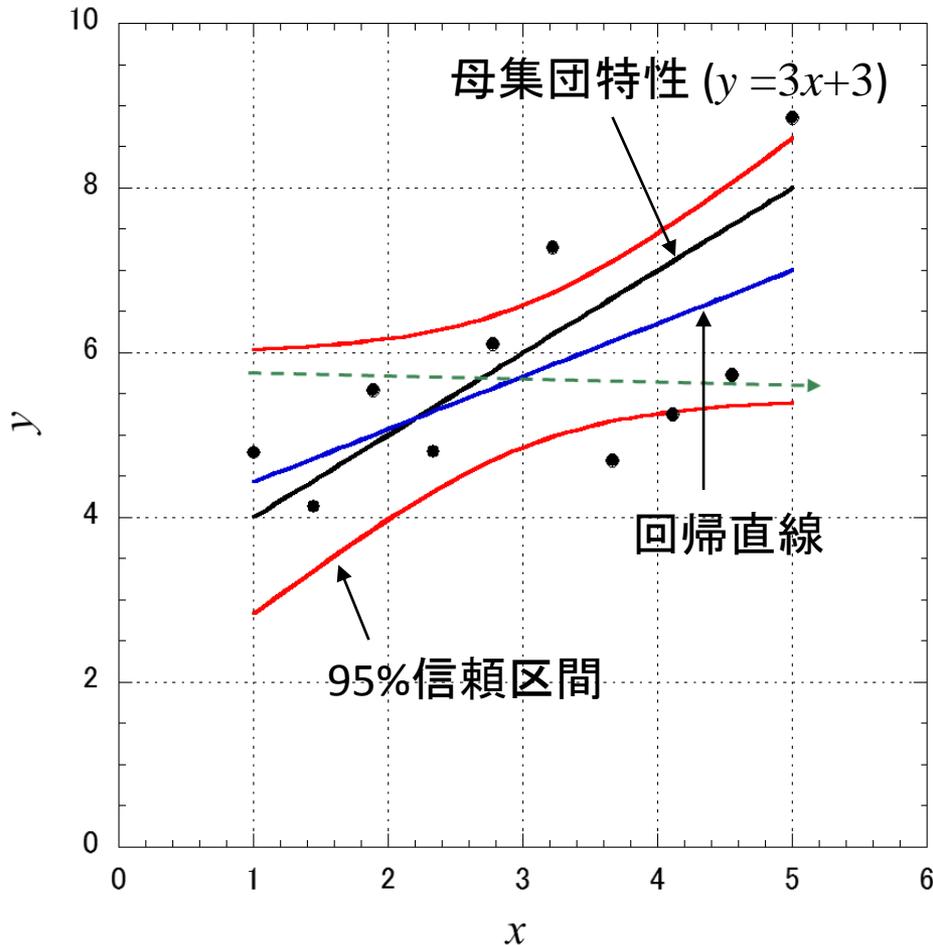
95%信頼区間の
中にある直線(緑
色の線)は、5%以
上の確率があり、
棄却できない

この標本値だけ
では、 x に対して、
「増加傾向が有意
である」とは言え
ない

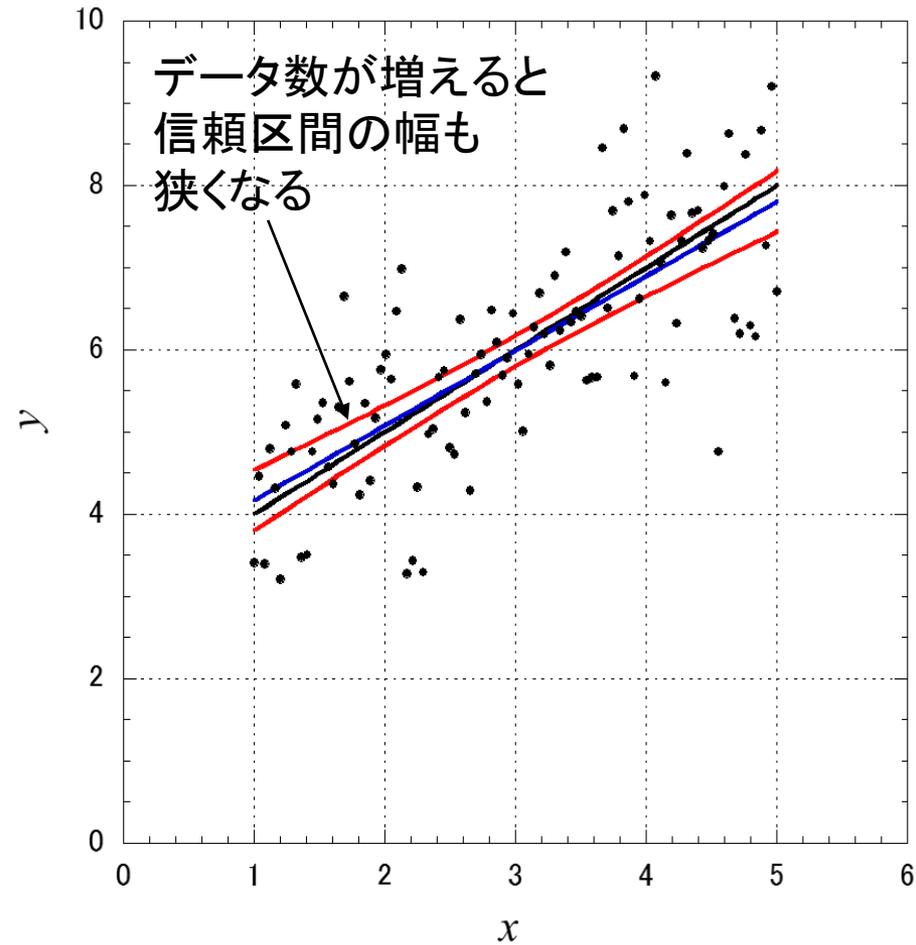
間違った判断をし
ないための慎重さ
重視の推定

解析の道具： 直線回帰と信頼区間

データ数 10



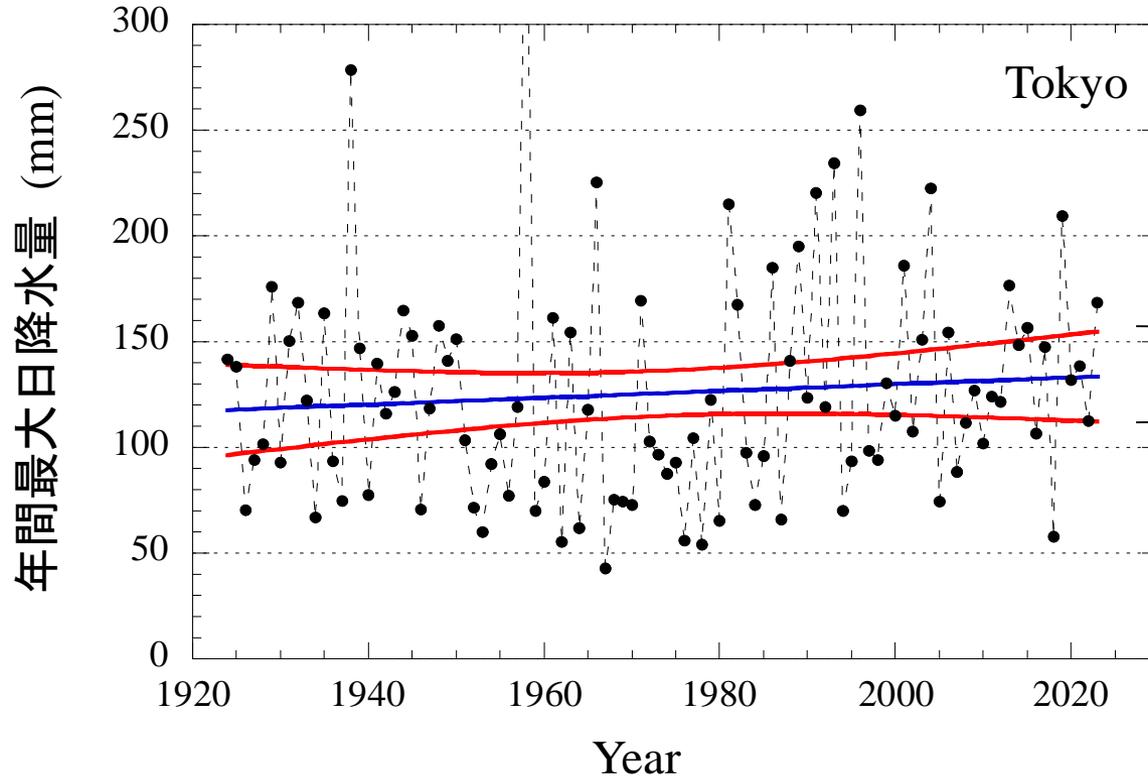
データ数 100



【信頼区間はデータのばらつき幅とはまったく違う!!】

地点別年間最大日降水量の100年間の推移

東京(千代田区)



回帰直線(青線)はやや増加の傾向を示しているが、このデータからは、「増加している」という結論は出せない

他の例(地点や降水量タイプ)を含めて、地点毎の100年間データからは、有意な長期変化傾向があるとは言えない

- 地点毎に見るのでは、100年間のデータと言えども変化傾向は分からない
- 正規化降水量を使って地点数を増やし、日本全体で見ればどうか?

日本全体のデータで傾向を俯瞰的に見る

長期変化傾向を見るのに地点毎のデータではデータ数が足りない



それぞれの地点のデータをその地点の平均値で割って正規化する
(平均値を1とする年間最大正規化降水量を用いる)

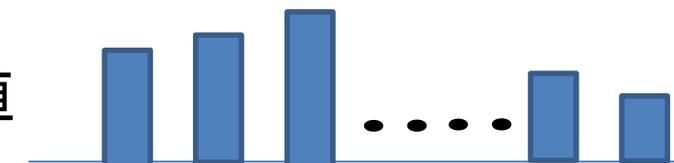
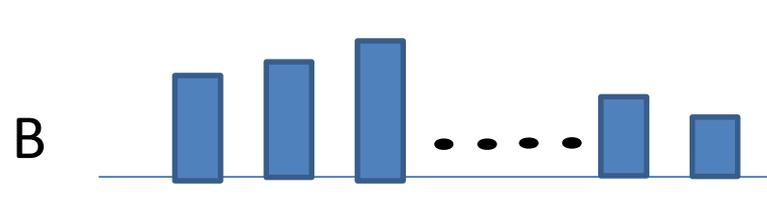
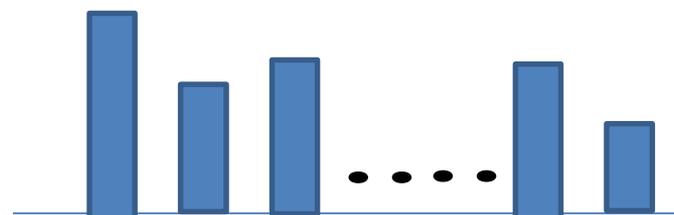
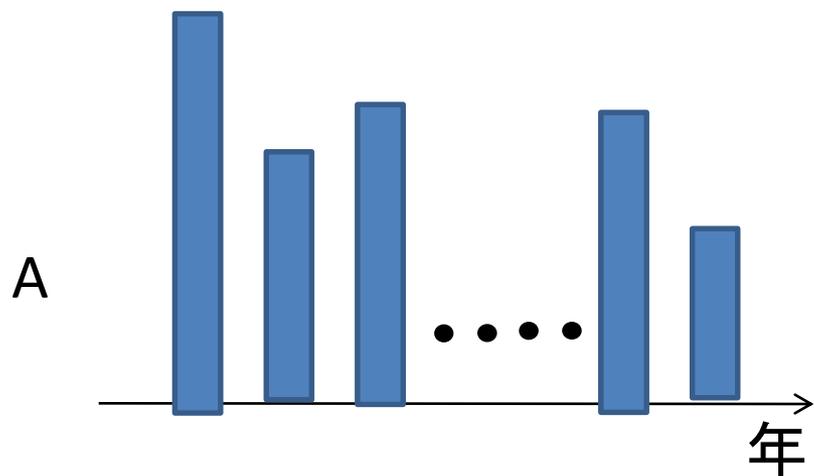
$$R_{\max, i} \rightarrow = R_{\max, i} / \langle R_{\max} \rangle$$



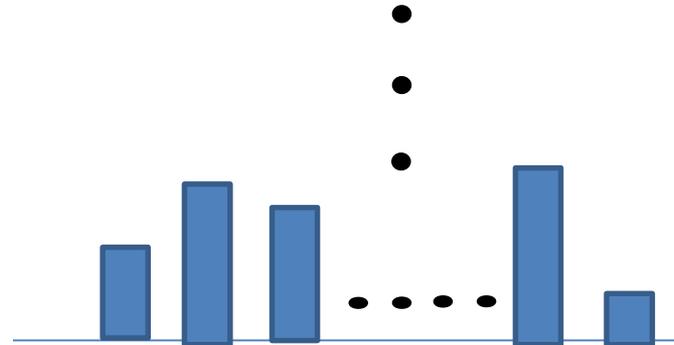
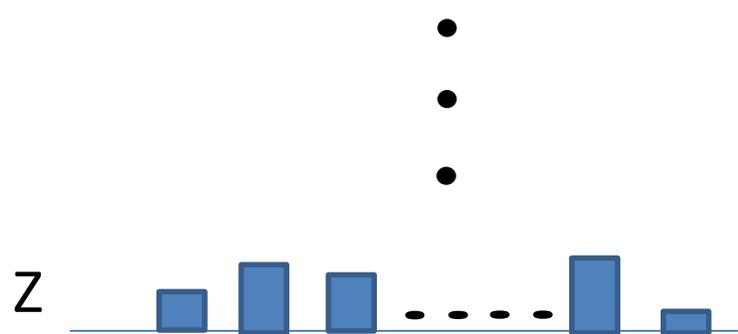
それらの全体のデータで、回帰直線と信頼区間を求める

地点毎に最大降水量の大きさの
平均値が異なる

大きさの平均値を同じにする
(長期変化を共通のデータとして扱える)

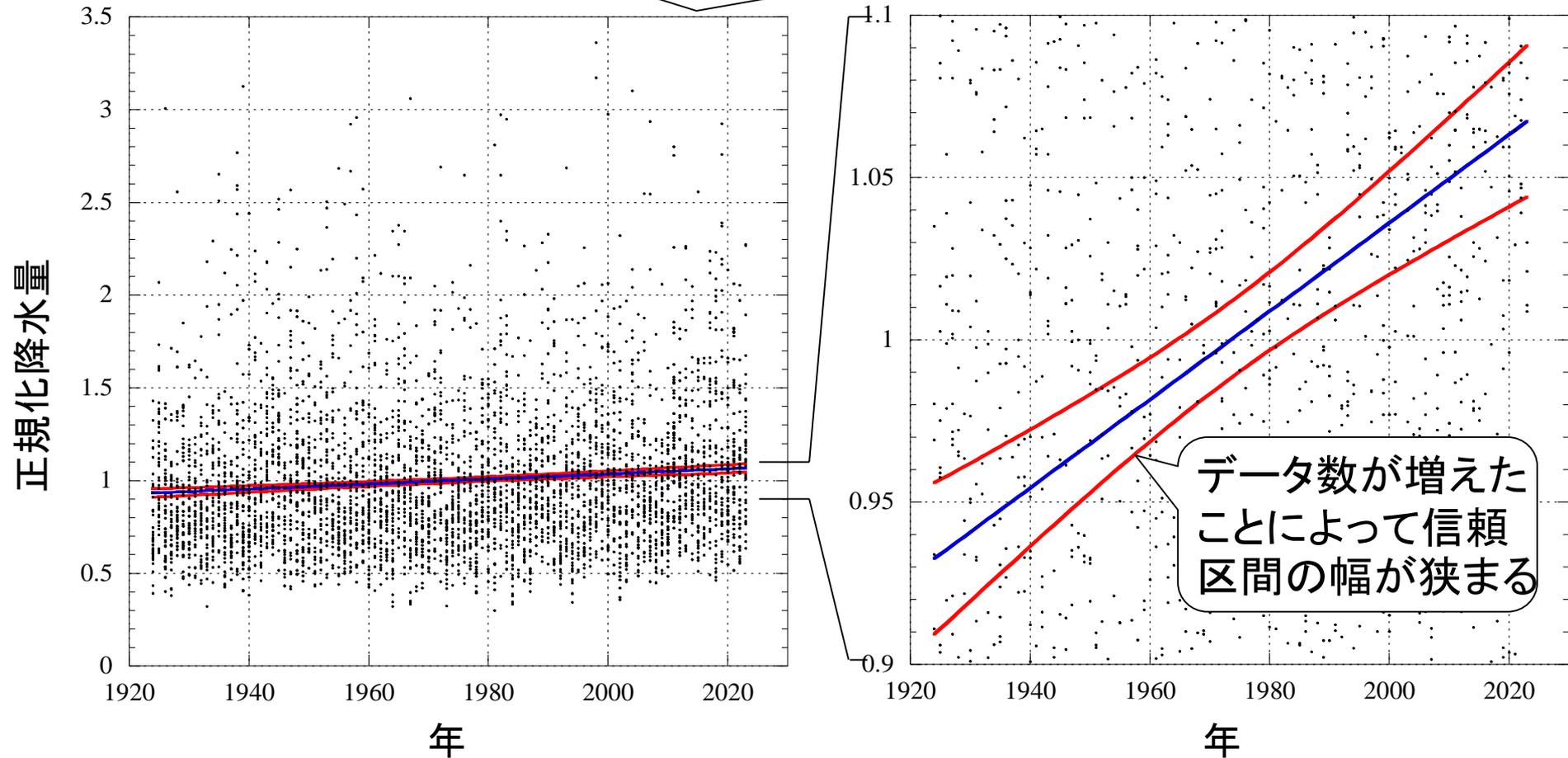


規格化
(平均値
で割る)



日降水量

日本全国45地点の100年間分のデータ(データ点数:4500)

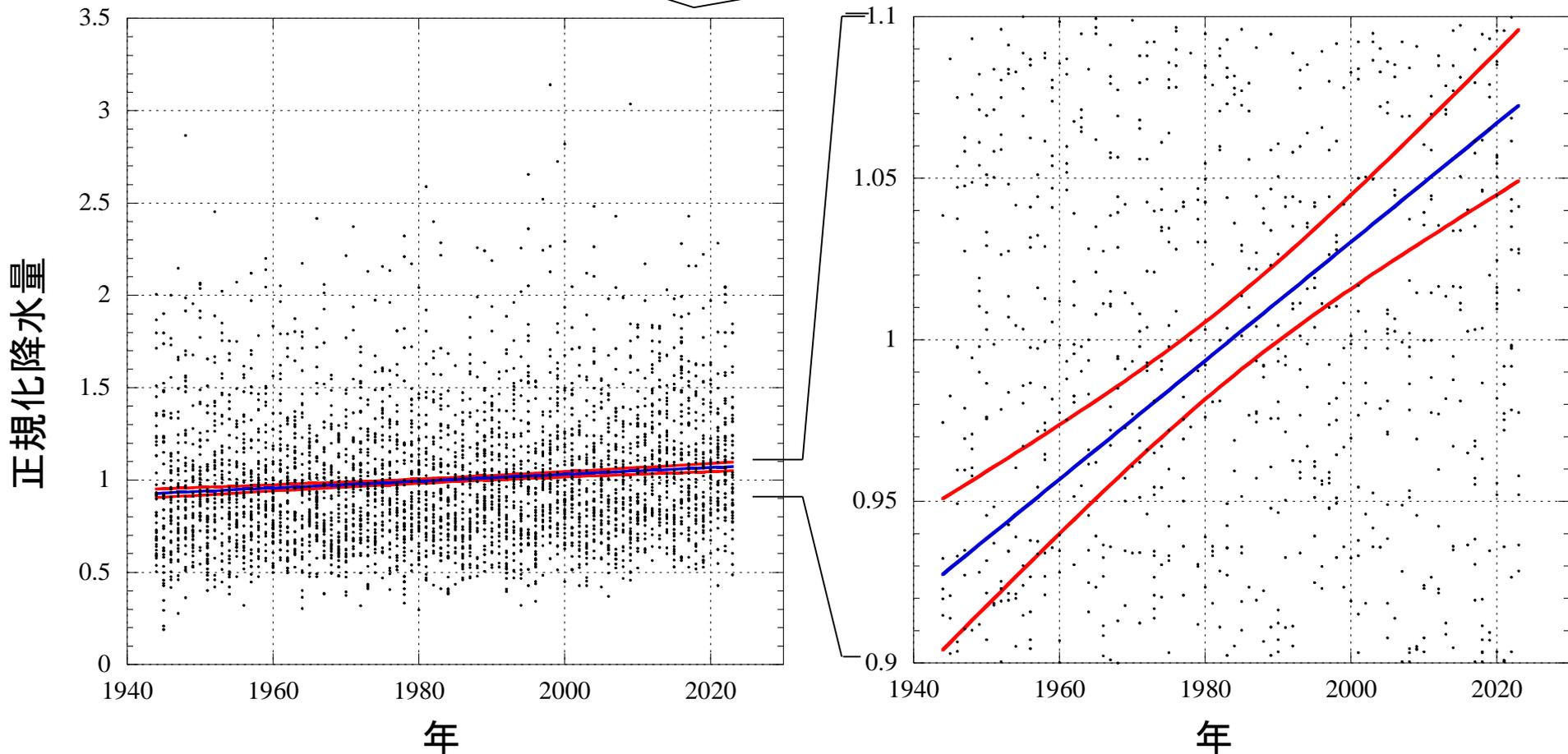


回帰直線(最尤推定): 100年間で14%の増加

区間推定(95%信頼区間): 9%~20%の増加の範囲 → 増加傾向が有意

1時間降水量

日本全国45地点の80年間分のデータ(データ点数:3600)

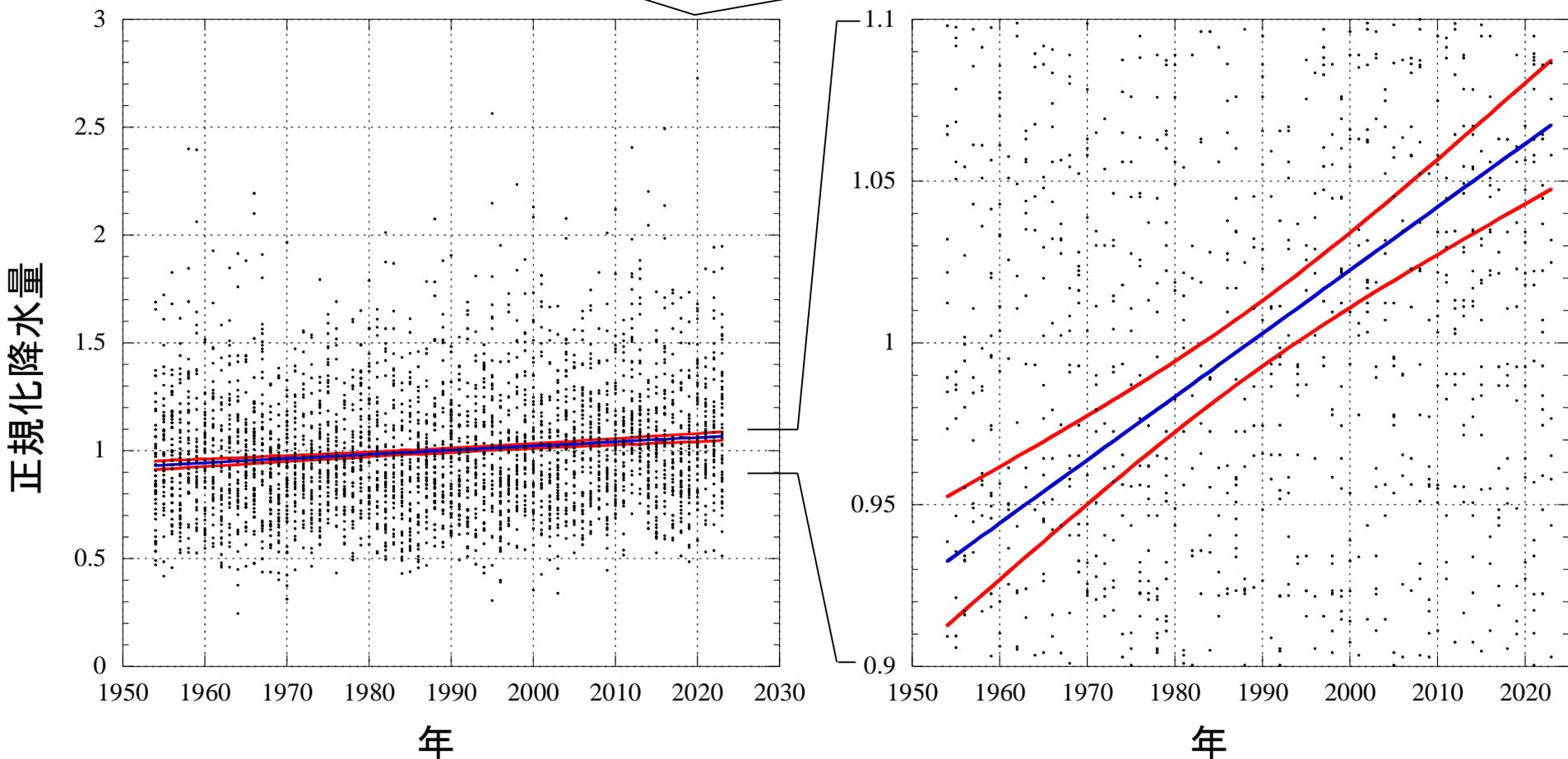


回帰直線(最尤推定): 80年間で16%の増加

区間推定(95%信頼区間): 10%~21%の増加の範囲 → 増加傾向が有意

10分間降水量

日本全国47地点の70年間分のデータ(データ点数:3290)



回帰直線(最尤推定): 70年間で14%の増加

区間推定(95%信頼区間): 10%~19%の増加の範囲 → 増加傾向が有意

日本全体のデータで傾向を俯瞰的に見る

長期変化傾向を見るのに地点毎のデータではデータ数が足りない

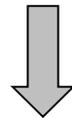


それぞれの地点のデータをその地点の平均値で割って正規化する
(平均値を1とする年間最大正規化降水量を用いる)



それらの全体の正規化データで、回帰直線と信頼区間を求める
(観測期間全体(約100年)で10%強の長期的増加傾向が有意)

(IEEE TGRS採録)



変化の傾向をより詳細に調べるために、多項式近似による回帰分析を行う
(最適次数の判定にAIC(赤池情報量規準)を用いる)

最適なモデルを選ぶ指標：赤池情報量基準 (AIC)

標本データから、母集団を推定する良いモデルを選ぶ判断基準

赤池弘次博士 ((元)統計数理研究所: 1971年考案)

良いモデルとは

- 1) モデル(推定式)と標本値の差が小さい(データによく合う)
- 2) モデルのパラメータの数が少ない

$$AIC = (-2)(\text{最大対数尤度}) + 2(\text{パラメータ数})$$

AICの値が小さいほど良いモデル

最大対数尤度とパラメータ数が同じ次元になっているのが奇跡
この基準は今でも現役で、広く使われている
理論は難しいが、確率・統計知識の宝庫

AICの真髓

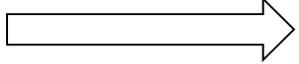
オッカムの剃刀

説明するために必要以上に多くの仮定を用いるべきではない

説明する理論・法則は比較的に単純な方がよい

この特性は誰も知らない
(モデルの判断基準にできない)

母集団
 $g(x)$



無作為標本
 x_1, x_2, \dots, x_n

AICは
ここから始まる



モデルの形を決める
 $f(x; \theta)$

いろいろのモデルを
用意する



対数尤度関数を作る
$$l(\theta) = \sum_{i=1}^n \log f(x_i | \theta)$$

最尤推定値 $\max_{\theta} l(\theta) \rightarrow \hat{\theta}$

尤度が最大になるよ
うに、モデルのパラ
メータの値を決める



$AIC = -2 \times l(\hat{\theta}) + 2 \times K$
 $l(\hat{\theta})$: 最大対数尤度
 K : パラメータ数

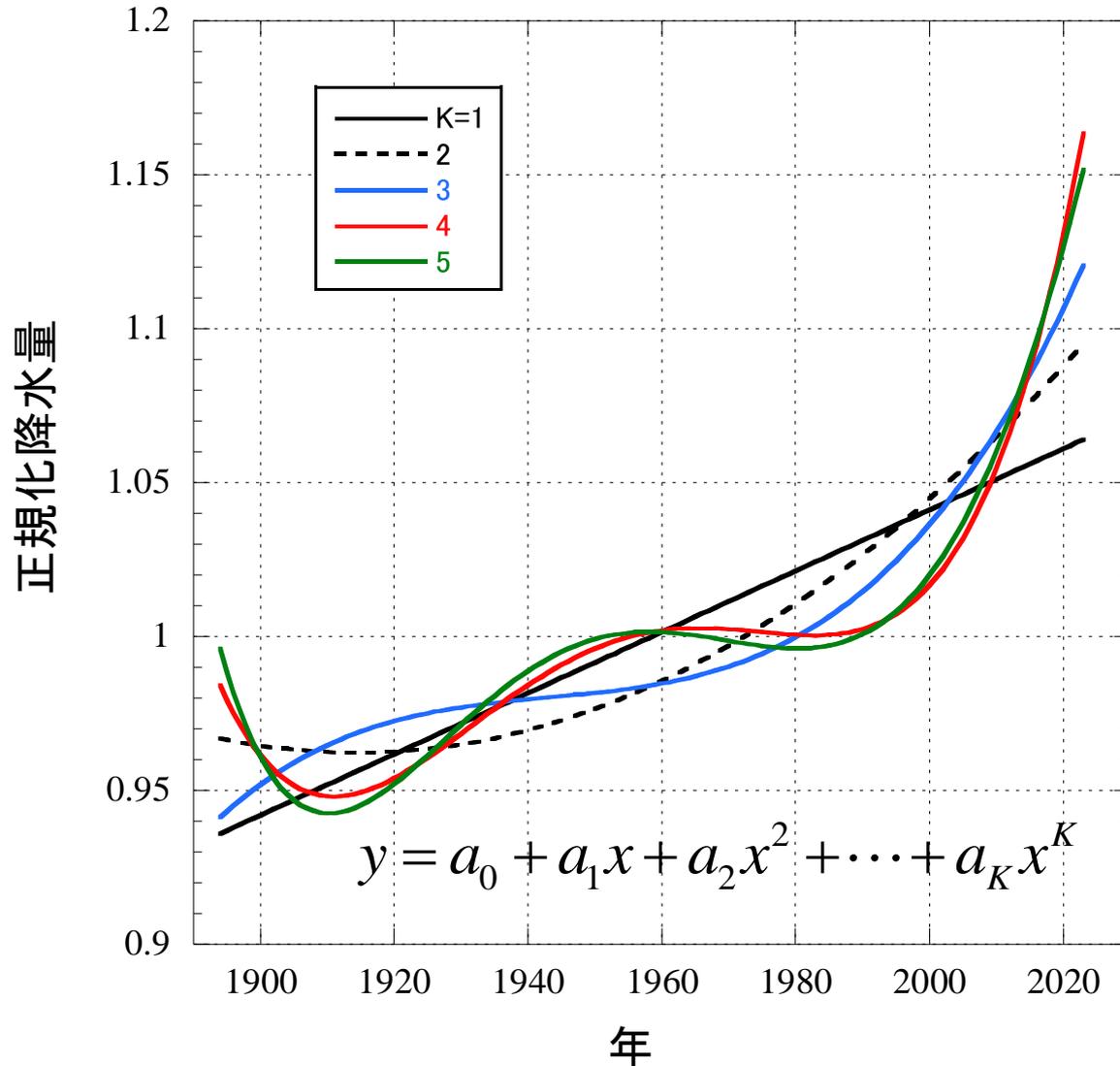
AICの値を計算する

AICの値が
小さいモデ
ルを選ぶ

AIC値による
モデルの評価
選択・改良



正規化日降水量の130年間の変化の多項式近似による最尤推定



次数を上げるほど、詳細な変化が把握できる



次数を上げすぎると、標本データの誤差要因に支配されて、他の独立なデータに合わなくなる



最適な次数をどのように定めるべきか



AIC(赤池情報量規準)で決めよう

AIC (Akaike Information Criterion: 赤池情報量規準)

AICにおけるモデルの選択基準

$$AIC = -2 \times (\text{最大対数尤度}) + 2 \times (\text{パラメータの数})$$

の式において、最も値が小さくなるモデルを選ぶ
(尤度が同程度ならパラメータ数が少ないほうが良いモデル)

K次多項式近似のモデル化 (誤差が正規分布する)

$$y_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \cdots + a_K x_i^K + b_i \quad (f_b = N(0, \sigma^2)) \quad (\text{パラメータ数: } K+2)$$

正規分布の対数尤度関数

$$l(\theta) = -\frac{n}{2} \log(2\pi\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{k=0}^K a_k x_i^k \right)^2 \quad \theta = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_K, \sigma^2)$$

係数と誤差分散の最尤推定 $\frac{\partial}{\partial a_i} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{k=0}^K a_k x_i^k \right)^2 = 0 \quad \Rightarrow \hat{a}_0 \sim \hat{a}_K$

$$\frac{\partial l(\theta(\hat{a}_0, \dots, \hat{a}_K, \sigma^2))}{\partial \sigma^2} = 0 \quad \Rightarrow \hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{k=0}^K \hat{a}_k x_i^k \right)^2$$

最大対数尤度 $l(\hat{\theta}) = -\frac{n}{2} \log(2\pi\hat{\sigma}^2) - \frac{n}{2}$

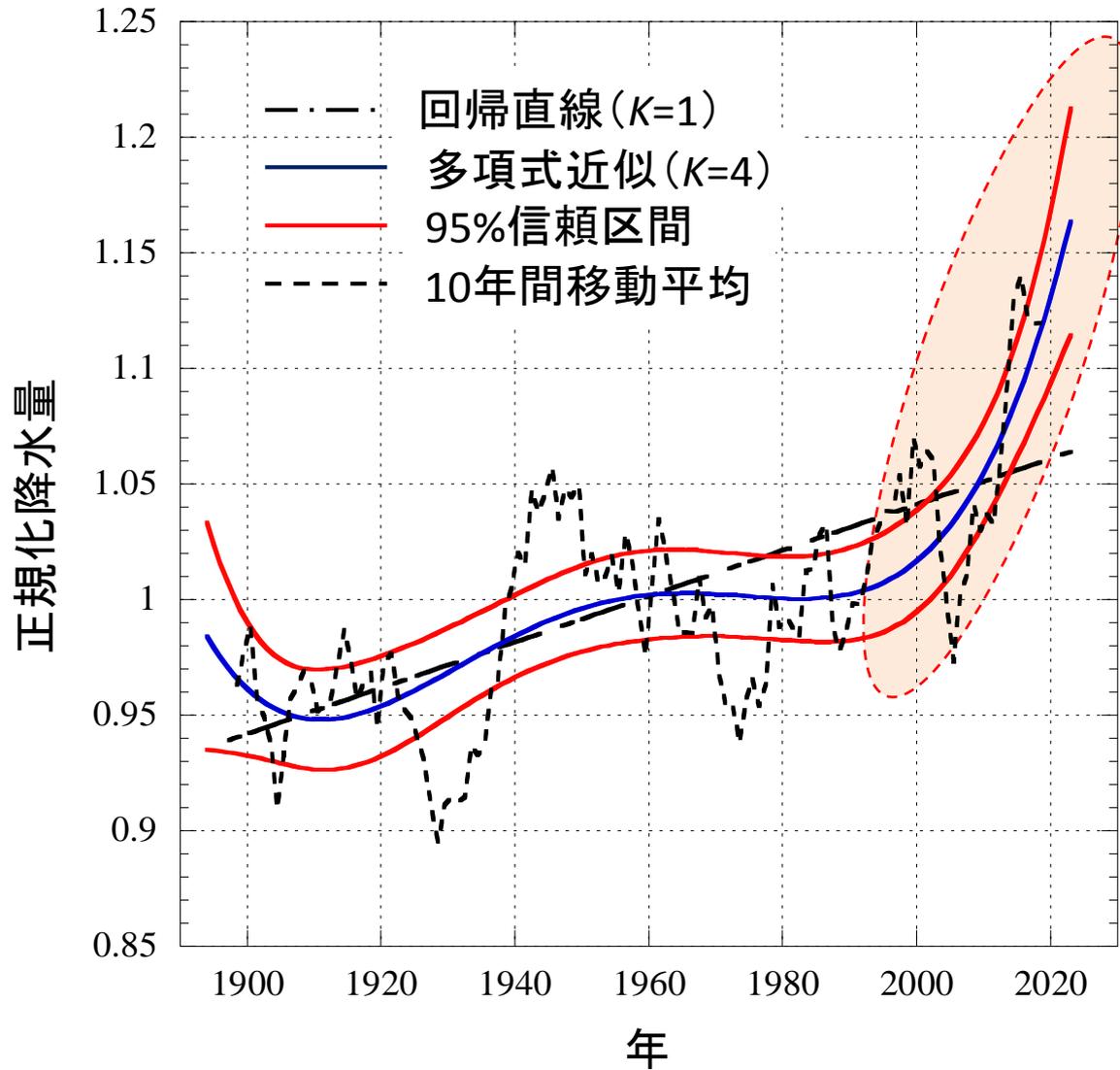
多項式近似における最大対数尤度とAIC評価値

値が最小のものを選ぶ

Rainfall	K	$\hat{\sigma}^2$	$l(\hat{\theta}^2)$	AIC	ΔAIC
1-day (130年)	1	0.16089	-2956.79	5919.57	13.79
	2	0.16069	-2953.13	5914.26	8.472
	3	0.16059	-2951.24	5912.49	6.704
	4	0.16035	-2946.89	5905.78	0
	5	0.16033	-2946.60	5907.19	1.409
1-hour (80年)	1	0.13068	-1445.22	2896.44	14.31
	2	0.13009	-1437.07	2882.13	0
	3	0.13009	-1437.02	2884.04	1.913
	4	0.13003	-1436.19	2884.37	2.241
	5	0.13002	-1436.10	2886.20	4.070
10-min (70年)	1	0.08708	-653.04	1312.07	13.57
	2	0.08667	-645.25	1298.51	0
	3	0.08662	-644.32	1298.65	0.137
	4	0.08660	-643.95	1299.90	1.392
	5	0.08657	-643.37	1300.73	2.222

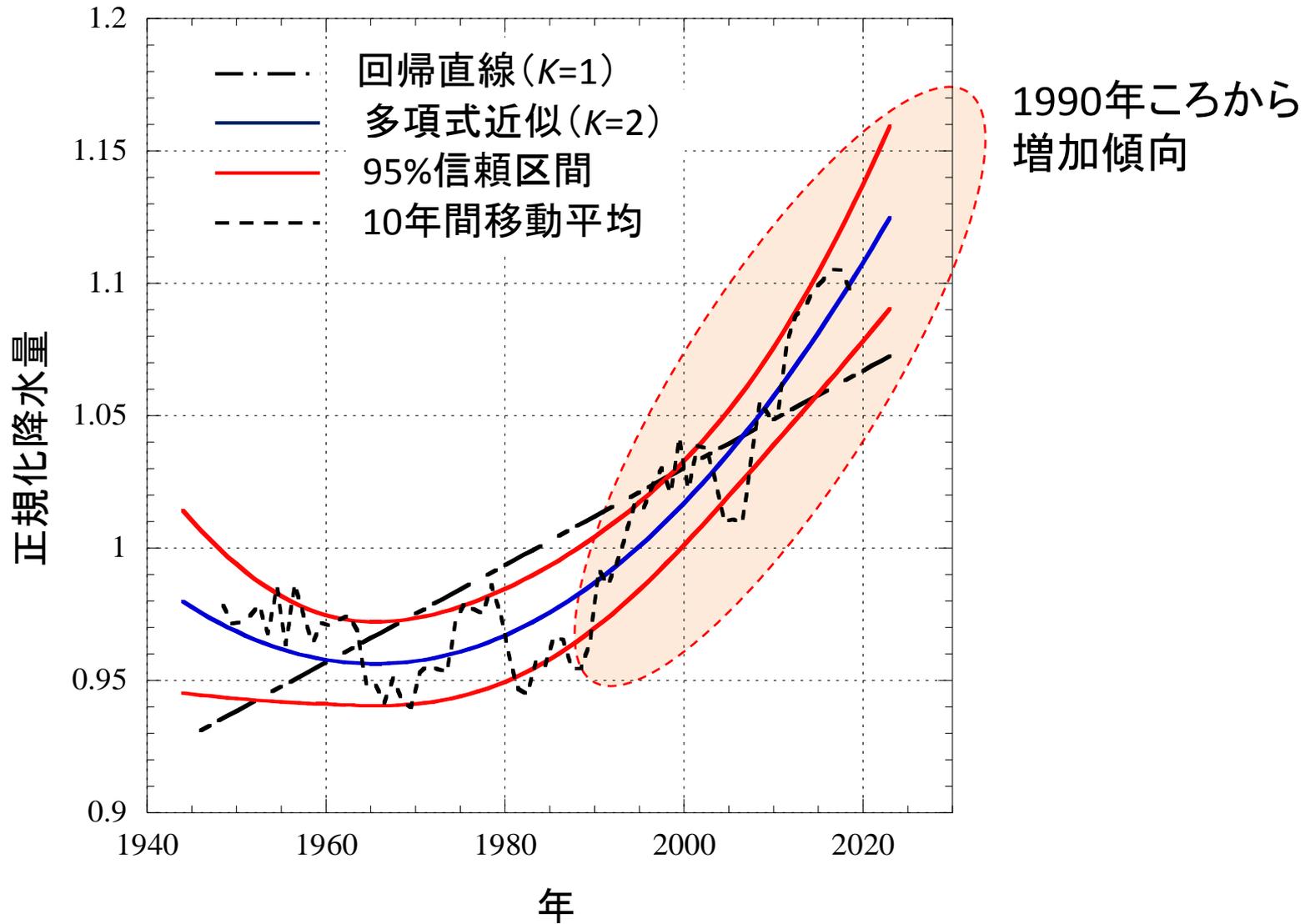
選ばれた
次数

日降水量年間最大値の長期変化傾向

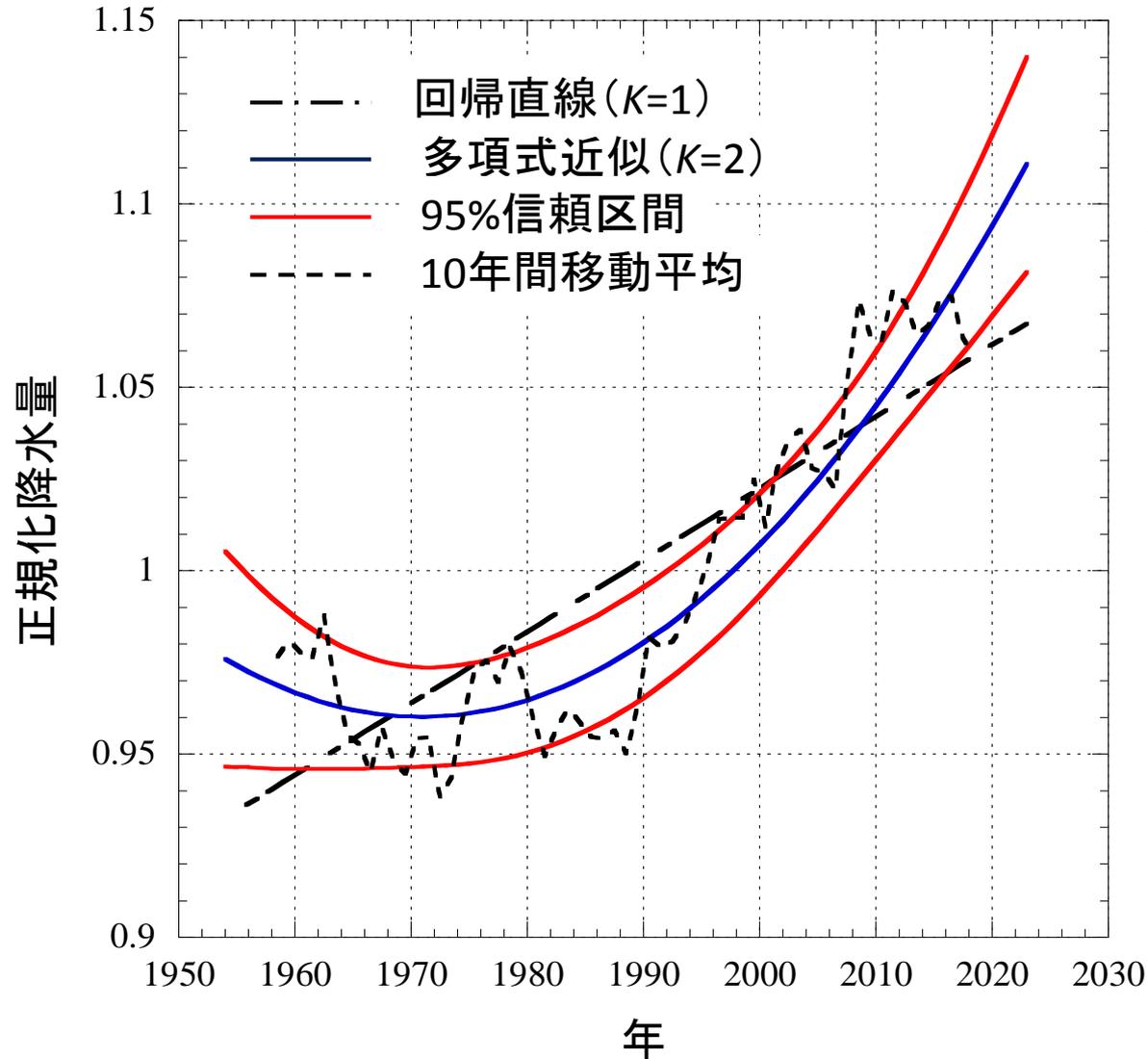


1990年ころから
増加傾向

1時間降水量年間最大値の長期変化傾向



10分間降水量年間最大値の長期変化傾向



気象庁による降雨の長期変化傾向に関する報告

① 日本国内の年降水量には、統計的に有意な長期的変化傾向は見られない

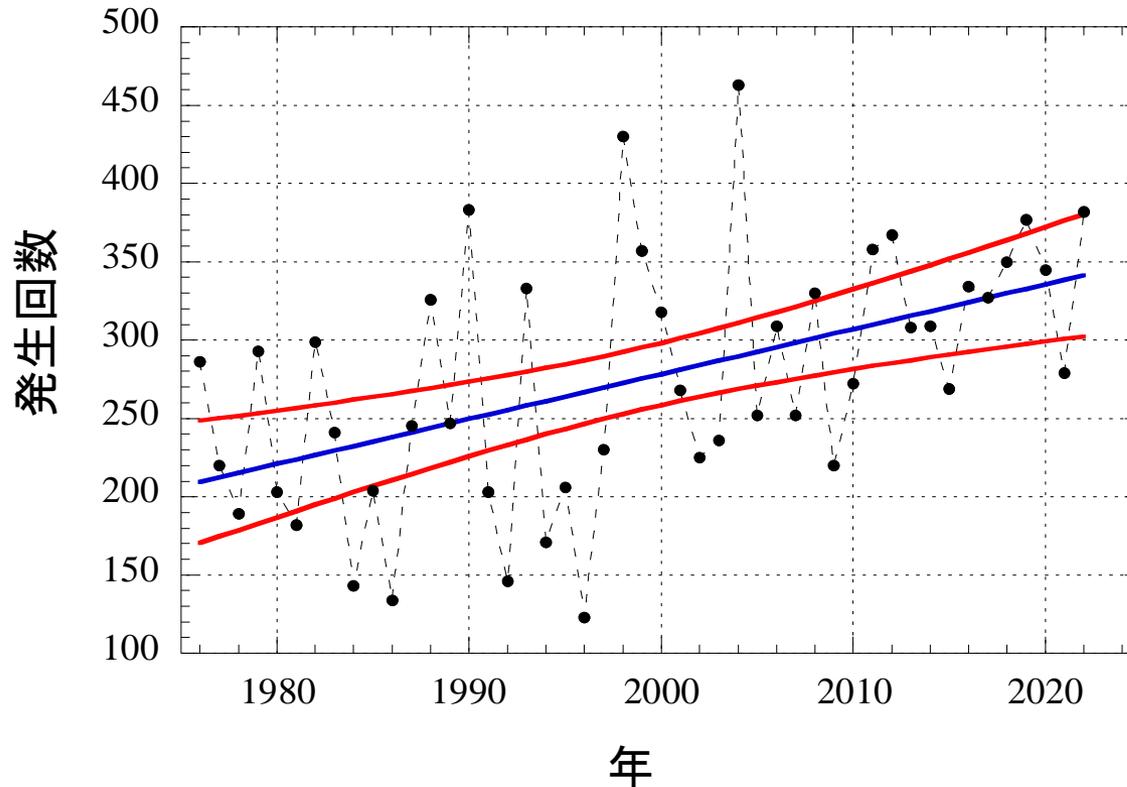
② 日本国内の大雨及び短時間強雨の発生頻度は有意に増加し、雨の降る日数は有意に減少している

①では、②の性質により、強い雨が降る傾向にはあるが、無降雨期間も増え、全体としてバランスが取れているようである。

- 1) 気象庁, “地球温暖化予測情報 第9巻,” 2017.03,
<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vol9/pdf/all.pdf>
- 2) 気象庁, 日本の気候変動2020,
<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>
- 3) 気象庁, 大雨や猛暑日(極端現象)のこれまでの変化,
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html

気象庁による降雨の長期変化傾向に関する報告 時間雨量が50mmを越える発生回数の統計

(日本全国1300箇所(AMeDAS観測データ):気象庁資料3)より)



時間降水量が設定値を超える平均年間発生回数について、最近10年間(2013~2022年)を最初の10年間(1976~1985年)と比べると、**設定値50mmで1.5倍(328回/226回)**、**80mmで1.8倍(25/14)**、**100mmで2.0倍(4.4/2.2)**の数値を示している。

降雨強度の確率分布

1分間降雨強度も1時間降雨量も「細矢のM分布」でよく近似できる

$$f(R) = \frac{\alpha}{R} \left(\frac{1}{R} + \beta \right) e^{-\beta R}$$

$$F(R) = \int_R^{\infty} f(R) dR = \frac{\alpha}{R} e^{-\beta R} \quad (Fが1を超えない範囲のRに適用)$$

平年時(増加傾向が起きる前)の累積分布

$$F_0(R; \alpha_0, \beta_0)$$

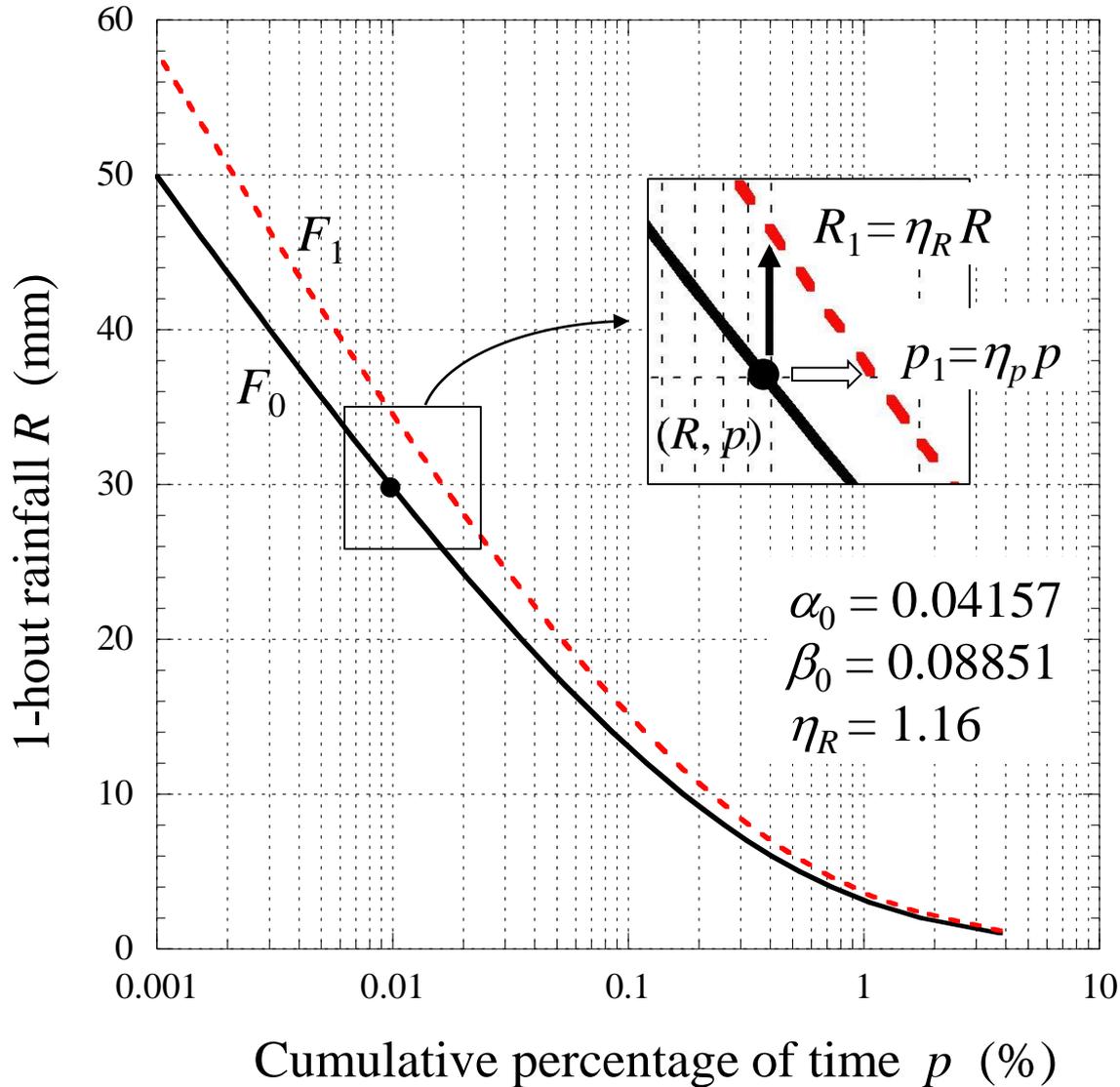
降雨強度が全時間率で均一に η_R 倍増加した場合の累積分布

$$F_1(R; \alpha_1, \beta_1), \quad \alpha_1 = \eta_R \alpha_0, \quad \beta_1 = \frac{1}{\eta_R} \beta_0$$

降雨量 R をしきい値として、 R を超える事象の発生回数の増加率: η_p

$$\eta_p \left(\equiv \frac{F_1(R)}{F_0(R)} \right) = \eta_R \exp \left\{ - \left(\frac{1}{\eta_R} - 1 \right) \beta_0 R \right\}$$

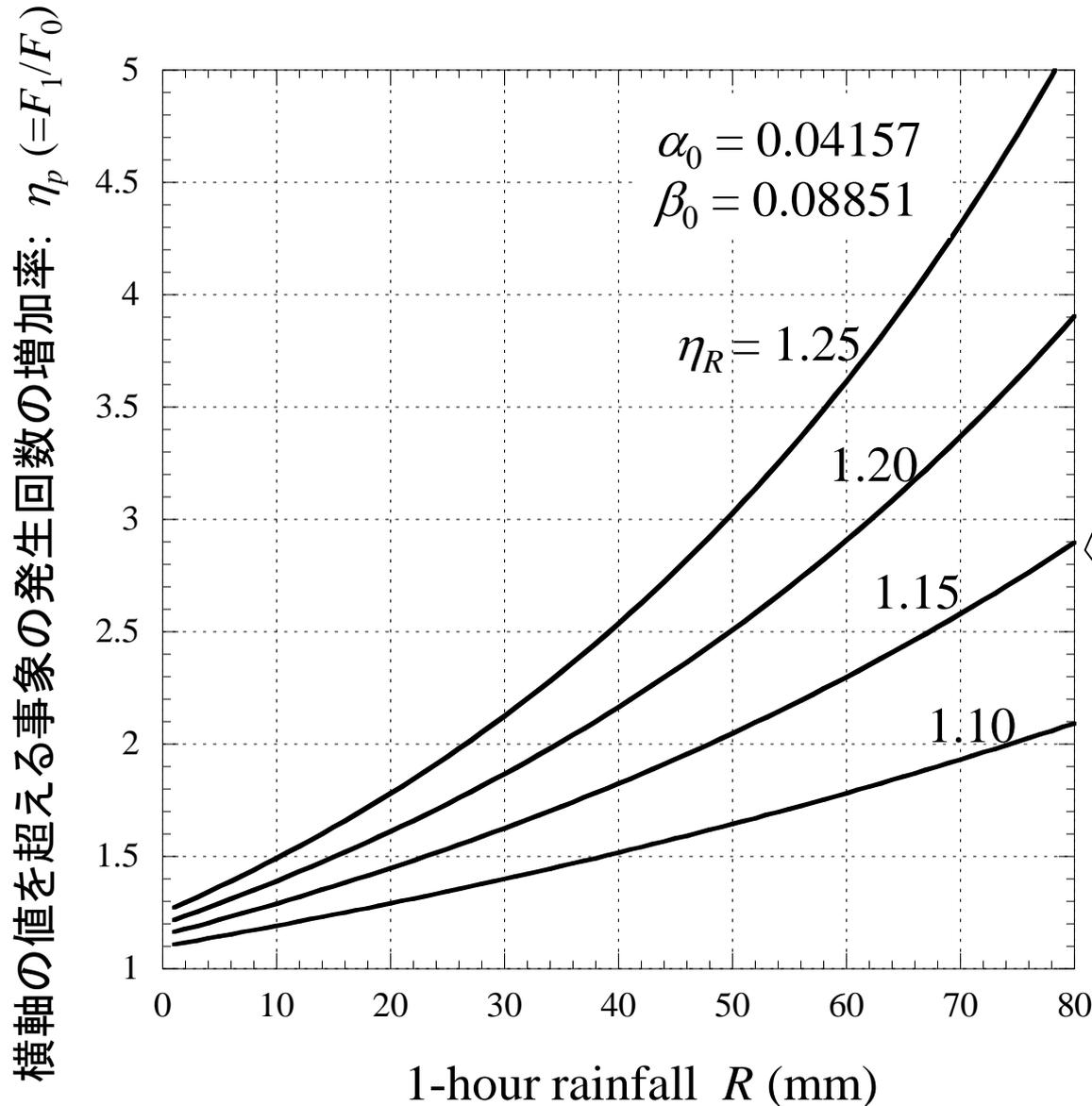
最大値統計と発生回数統計の接点を探る



図の黒線のCDFは名古屋の平年時の特性 (細矢,1988)

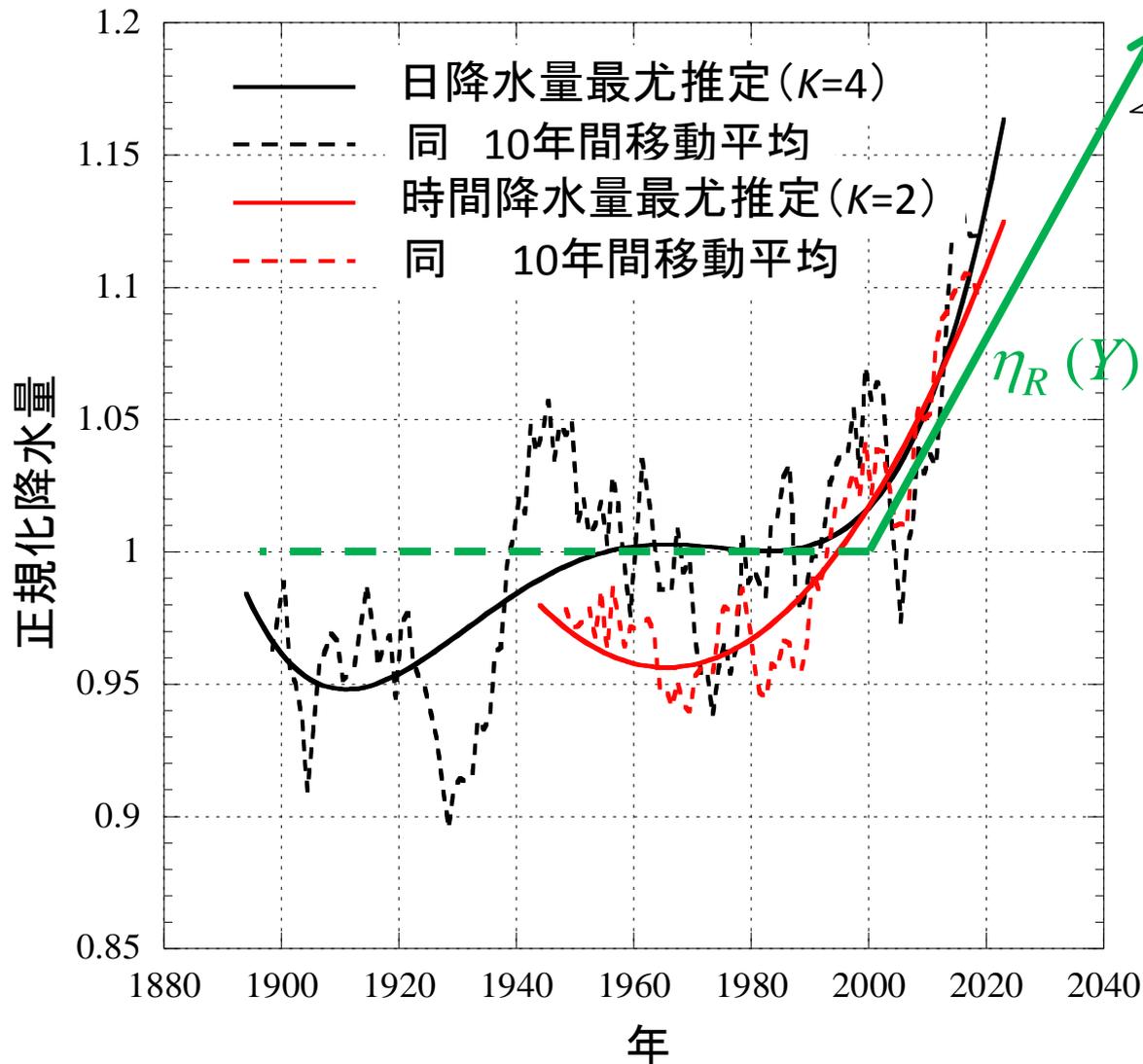
1時間降雨量の年間最大値の平均値は時間率0.011%付近の値

降雨強度増加率 η_R としきい値を超える事象の発生回数増加率 η_p の関係



気象庁資料は日本全体における強雨発生事象の回数の統計なので、1地点のデータとの比較は乱暴であるが、強雨発生回数増加率が1.5~2.0倍という値には、この図の結果と整合性がある

1時間降水量年間最大値の長期変化傾向から推定する $R_{0.01}$ の未来予測



25年に1割程度の算術的増加
(西暦2000年を基準に)

$R_{0.01}$ との近似関係
(相関係数 0.978)

$$R_{0.01} = 1.5 \langle R_{1h, \max} \rangle$$

$R_{0.01}$ の未来予測

$$R_{0.01}(Y) \approx \eta_R(Y) R_{0.01}(2000)$$

$$\eta_R(Y) = 1 + \frac{Y - 2000}{250}$$

$$(2000 \leq Y \leq 2100)$$

$R_{0.01}$ の未来予測式に対する次世代を担う皆さんへの伝言

- ① **20～30年後：2050年ころに、そのときまでの気象庁データを使って上昇傾向の確認をしてほしい**
- ② **地球規模スケールでの評価式を確立してほしい**。降雨の特性は地球の気候区分によって異なる。故に、年変化傾向も異なるものとなるだろう。同じような気候帯ごとにグループ化して統計量を増やし、すなわち、正規化降雨量としてたくさんのデータから共通の傾向を見るのが良いであろう。その際、本発表で示したように時間降雨量年間最大値の特性から変化傾向を見出すのが現実的であろう。
- ③ **降雨減衰量の推定には $R_{0.01}$ と共に、等価通路長 L_e の長期変化も重要である**。等価通路長の評価では、雨域の空間的広がりの変化傾向把握になるため、降雨の地点データのみから推定できる $R_{0.01}$ の予測よりは難しいであろうが、チャレンジしてほしい。

まとめ

気象庁が公開している日本各地の降水量の長期間データベースから、各種降水量の年間最大値データを抽出して、それぞれの量に長期間における系統的な変化があるか否かを調べた。その結果

- 1) 降雨量は年毎のばらつきが大きいため、100年規模のデータであっても、地点毎に見るのでは、有意な長期変化傾向を見出せないこと
- 2) 地点毎の着目降水量年間最大値の平均値で正規化した正規化降水量を用いて共通に扱えるデータ数を増やし、このデータで解析すると、100年規模の時間スケールにおいて、1割強の増加傾向が見られること(IEEE TGRS採録)
- 3) 同じデータから多項式近似の回帰曲線を求め、その最適次数をAICによって定めると、増加の傾向は1980年代以降に顕著になっていること(今回発表)

が、明らかになった。また、

- 4) $R_{0.01}$ と相関が強い時間降水量の解析結果を用いて、近未来にデータベースの改訂が必要になるかも知れない $R_{0.01}$ に対して、年変化の予想推定式を示した。

降雨量に対する長期変化傾向を明確にするためには多様な気候特性を持つ地球規模での同様の解析が必要である。また、降雨減衰推定式の見直しには、 $R_{0.01}$ と共に等価通路長の長期変化を調べる必要がある。