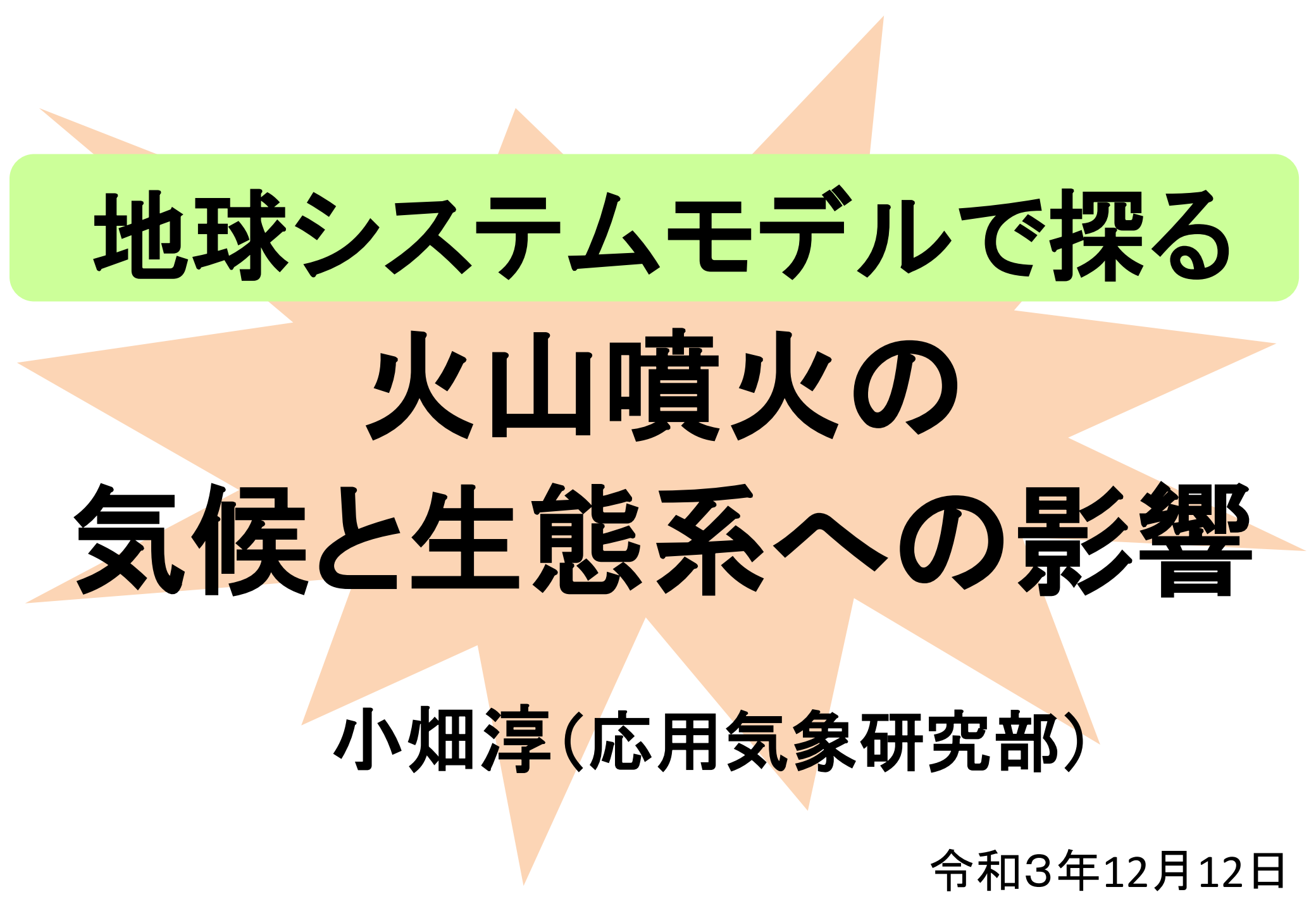




地球システムモデルで探る 火山噴火の 気候と生態系への影響

小畑 淳 (応用気象研究部)

令和3年12月12日

はじめに

大規模な火山噴火

大気中へ大量の火山灰や硫酸エアロゾル粒子が拡散

一時的であるが、気候と生態系へ大きな影響

例えば、1991年のピナツボ火山噴火

世界的な寒冷化（ 0.4°C ）、大きな社会問題
（噴火の影響を把握→災害危機管理）

地球システムモデルによる実験

10世紀

白頭山（中朝国境）とエルトギャウ（アイスランド）の大噴火
（ピナツボ噴火の数倍の規模）

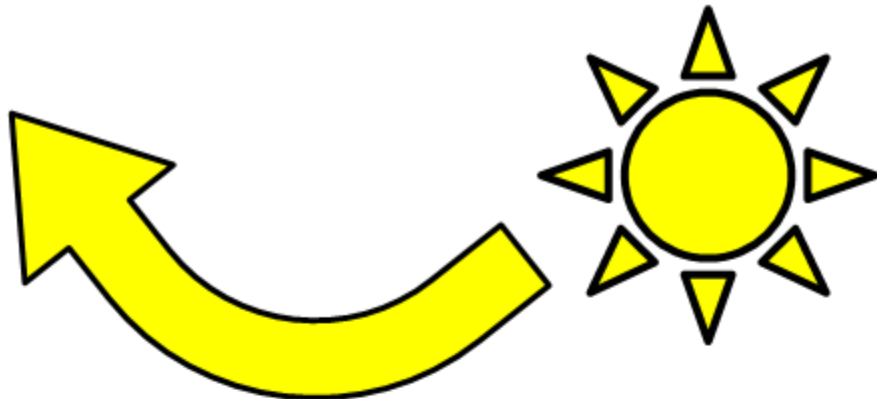
噴火による気候変化と生態系への影響を見積もる

日射や気温はどう変化したのか、

植物の生産量はどの程度影響を受けたのか

当時の日本での騒乱など平安時代の歴史的事実も交え、考察

散乱 反射



硫酸エアロゾル粒子

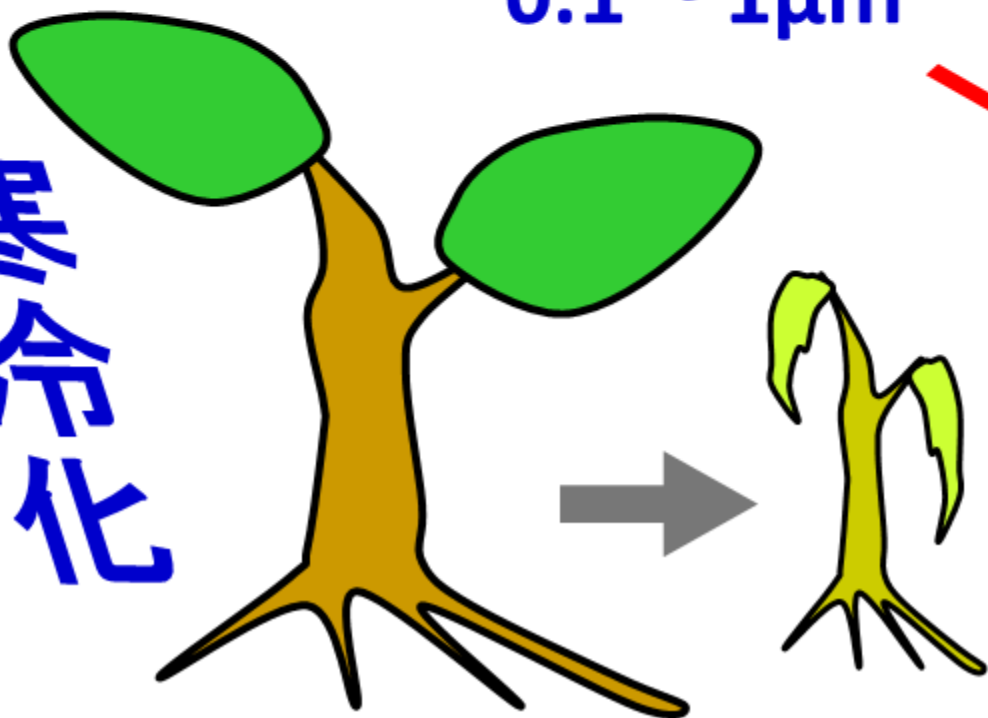
0.1~1 μ m

水蒸気
酸化

二酸化硫黄

火山

寒冷化

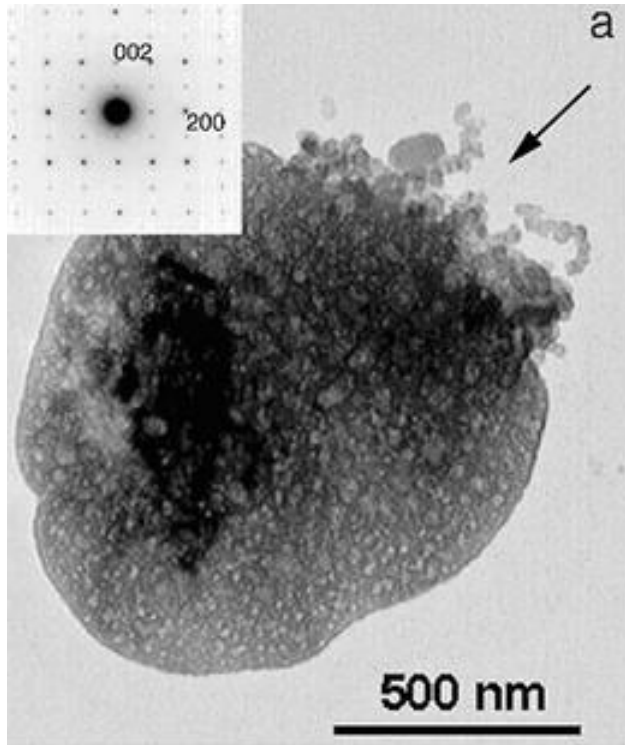


エアロゾル 気相中に 固体や液体の粒子が 分散した状態で 安定な状態にある系 (岩坂 2012 天気) 「状態」であって「もの」ではない

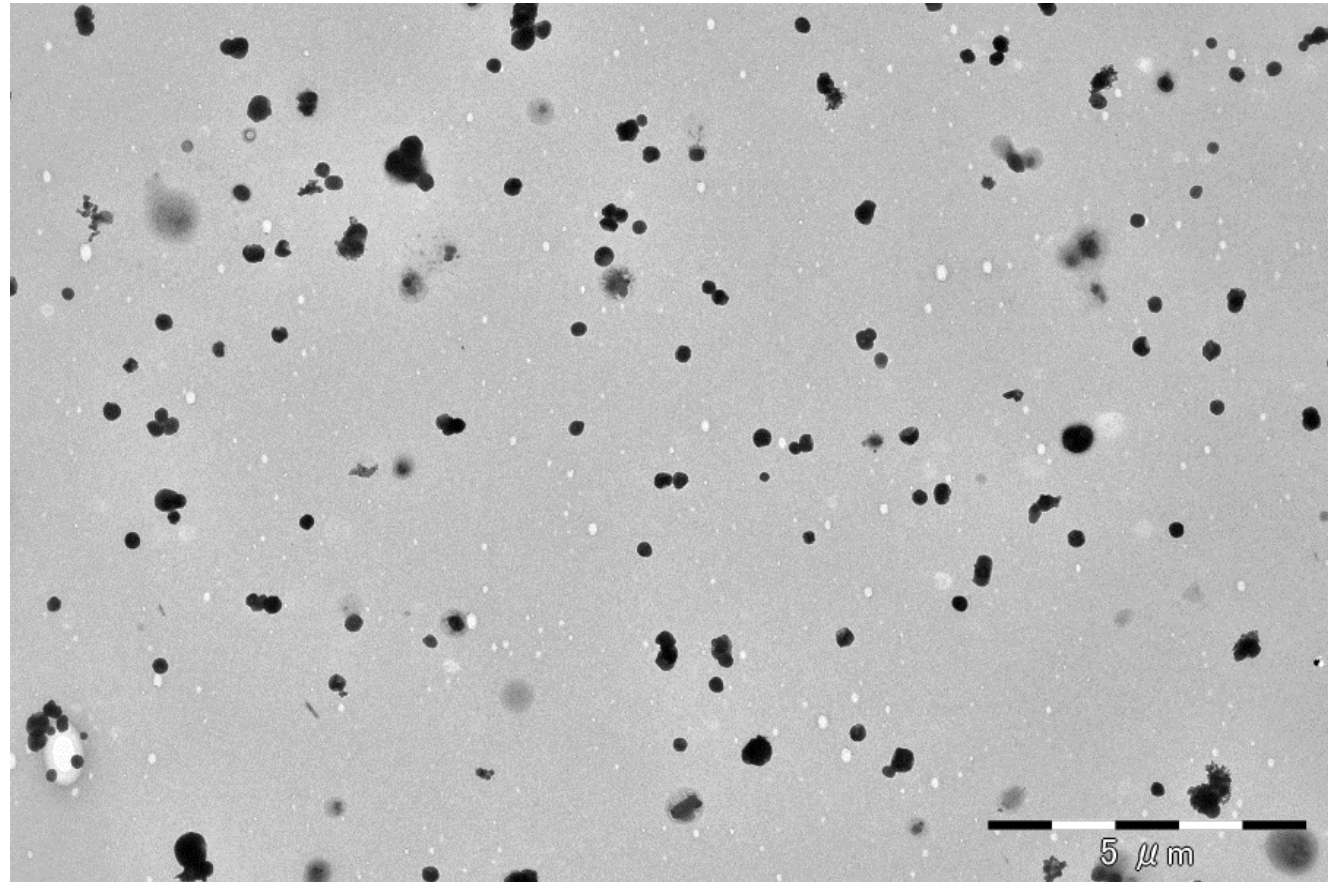
気相中に固体や液体の粒子が分散した状態で安定な状態にある系（システム）をエアロゾルと呼んでいる。

さて、エアロゾルは状態や系（システム）を表す言葉である。しかし、この点においてもまことに混乱は大きい。本来状態や系（システム）を表す用語として使われてきたのだが、最近ではものもあらず用語として使われる傾向が出てきているのである。例えば、「エアロゾルを採集して化学分析する」と言うような

硫酸エアロゾル粒子



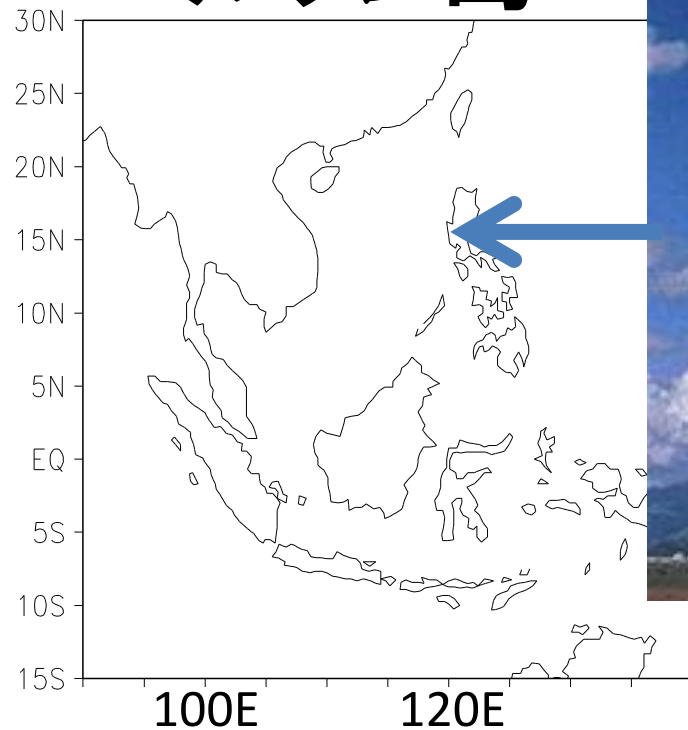
Buseck and Posfai (1999 PNAS)



気象研究所 財前博士・五十嵐博士 提供

ピナツボ火山噴火(1991年)

フィリピン
ルソン島



<http://ja.wikipedia.org>

火山灰
火砕流
300人余
死亡
数万人避難

気温
0.4°C低下

ピナツボ噴火後の 世界平均 気温変化

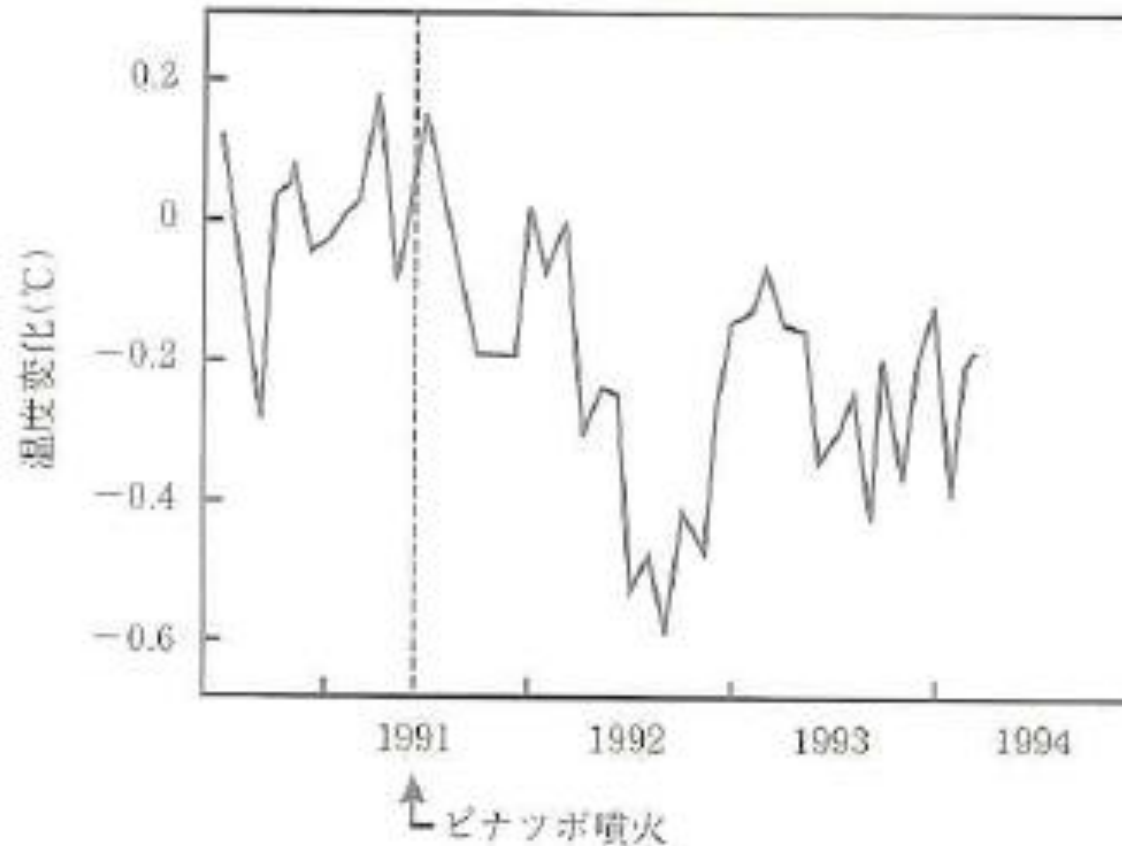


図 8-6 ピナツボ噴火 (1991 年 6 月) 後のグローバルな平均地表面温度の変化

Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 1994. New York: Cambridge University Press, 1995. をもとに作成。

大気化学入門
(D.J.ジェイコブ 著、近藤豊 訳)より

論文は

<https://doi.org/10.1029/2018JG004696>

中高緯度の大規模火山噴火に対する 地球システムモデルの応答

小畑 淳・足立 恭将 (2019 JGR)

AGU100 ADVANCING
EARTH AND
SPACE SCIENCE

「地球物理学研究」米地球物理学連合

JGR Biogeosciences

RESEARCH ARTICLE

10.1029/2018JG004696

Earth System Model Response to Large Midlatitude and High-latitude Volcanic Eruptions

Atsushi Obata¹  and Yukimasa Adachi²

¹Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan, ²Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan

Key Points:

- Earth system model shows that large northern midlatitude and high-latitude volcanic eruptions have roughly similar global mean impacts
- Both eruptions strongly impact the northern extratropics, but midlatitude eruption impacts the tropics twice as much
- Volcanic cooling increases tropical land net primary production with maximum photosynthesis at moderated temperatures

Abstract We used the Meteorological Research Institute Earth System Model to simulate the climate response to massive sulfur dioxide (SO₂) emission from the volcanic eruptions of Paektusan (China/North Korea) and Eldgjá (Iceland) into the stratosphere in the tenth century Common Era (CE). Assuming 3 times the SO₂ emission of the 1883 Krakatau eruption, as recorded by Greenland ice core sulfate concentrations, simulations of Paektusan and Eldgjá had roughly similar global mean impacts within 2 years of erupting: decreases in surface insolation (-10 W/m^2 , -5%), surface air temperature (-1°C), land net primary production (NPP; -3 GtC/year , -5%), and soil respiration (-5 GtC/year , -10%). While both

(Adachi et al. 2013 Pap Meteor Geophys)

気象研 地球システムモデル

分解能

大気: TL159(~120km)、48層

海洋: 東西 1度、南北 0.5度、50層

大気海洋結合大循環モデル

(Yukimoto et al. 2012 JMSJ)

エアロゾルモデル

(Tanaka and Chiba 2005 JMSJ)

大気化学オゾンモデル

(Deushi and Shibata 2011 JGR)

陸域生態系炭素循環モデル

(Obata and Shibata 2012 J.Climate)

海洋生態系炭素循環モデル

(Nakano et al. 2011 J.Oceanogr)

等の統合

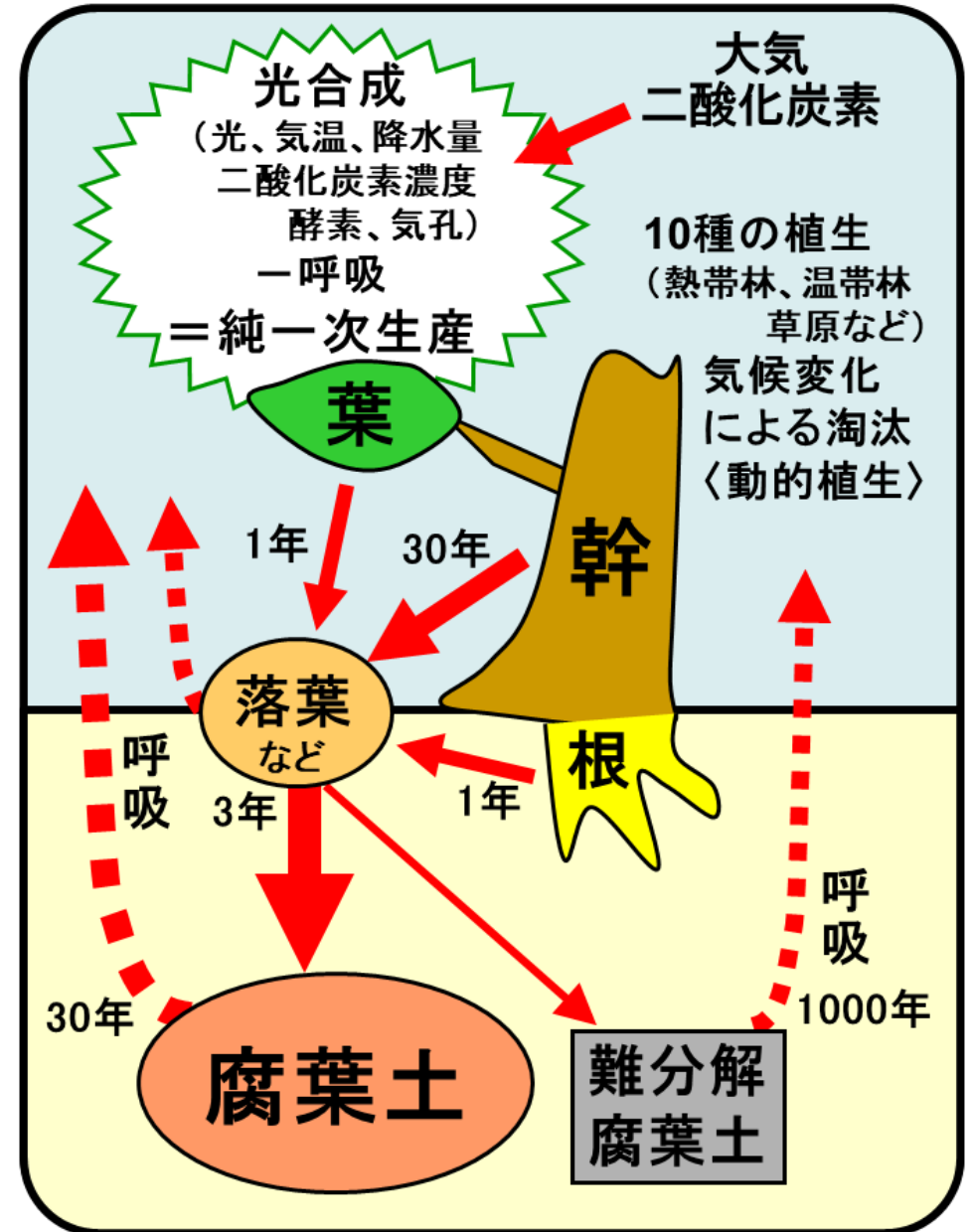
純一次生産

(net primary production, NPP) とは
植物の
光合成から維持呼吸を引いた
大気からの
正味の二酸化炭素吸収

(大まかな近似として)

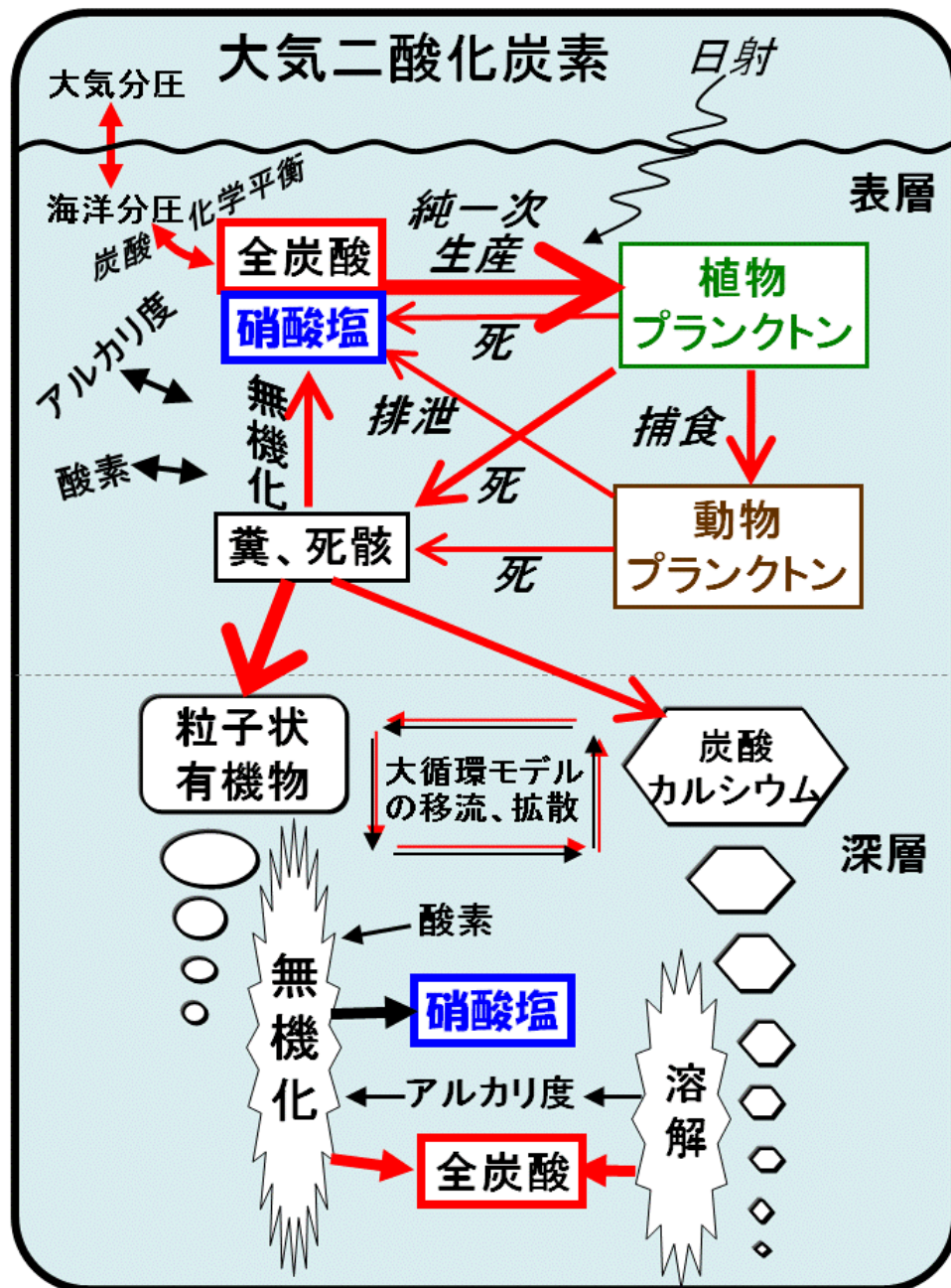
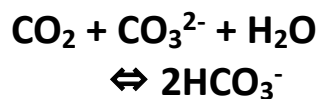
農作物 と見做せる であろう

炭素の流れ ↓ ↑



海洋生態系 炭素循環モデル

Nakano et al. (2011 JO)



火山噴火(二酸化硫黄放出)

成層圏 硫酸エアロゾル粒子増加

表面 日射減少、寒冷化

土壌呼吸減少、大気二酸化炭素減少(～1ppm)

1991 ピナツボ 噴火

植物の純一次生産 (光合成－維持呼吸)

日射減少や寒冷化で減るのか

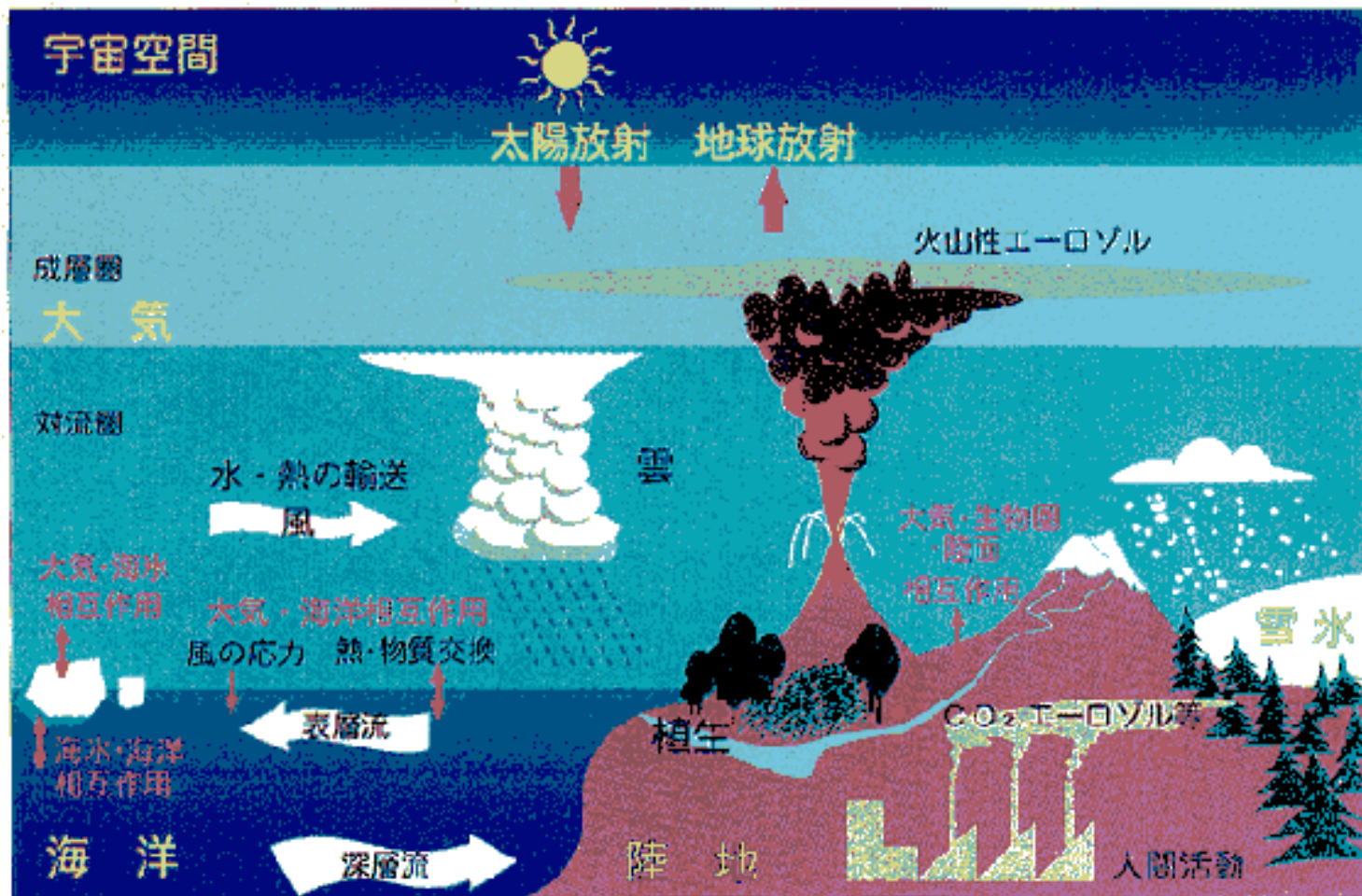
地域によりどうなのか

地球システムモデル**巨大噴火実験**

例：**白頭山、エルトギャウ(アイスランド)**

(10世紀中頃、過去二千年最大級) **考察**

地球システム



成層圏へ
二酸化硫黄を与えて

人間活動

含硫黄燃料(石炭、石油)燃焼
含硫黄鉱石精錬

およそ一年分を一回で放出 SO₂

数十メガトン

気象庁、電子掲示板より

<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/3-1.html>

日本海をはさんで 10世紀に相次いで 起こった二つの 大噴火の年月日 十和田湖と**白頭山**

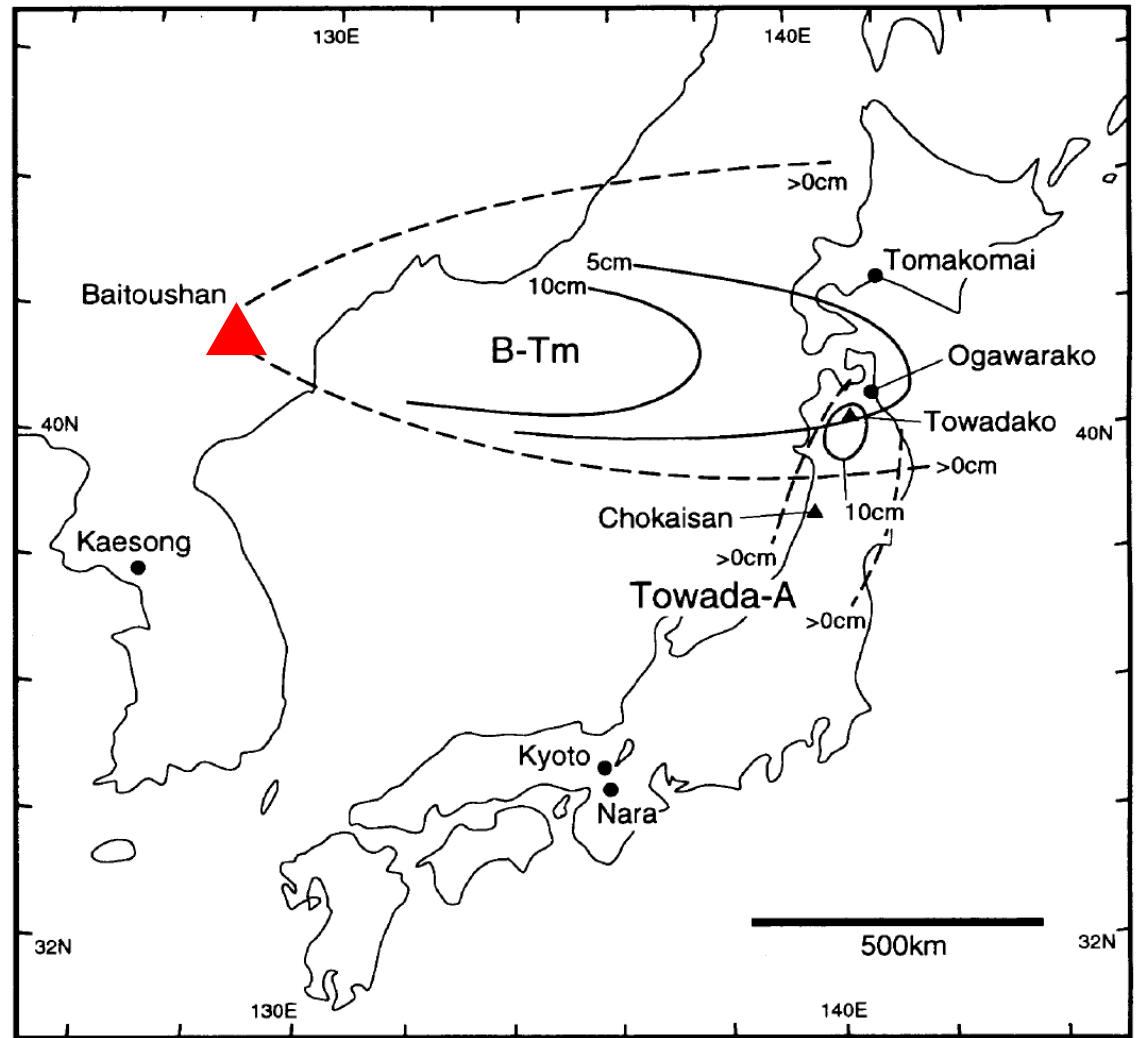
早川由紀夫・小山真人
(1998 火山)

高麗 定宗元年 946
是歳 天鼓鳴 赦
「高麗史」

1. はじめに

東アジアで10世紀に相次いで起こった二つの大噴火の年月日を以下で論じる。それらは十和田湖と白頭山で起きた噴火である。その後、前者を上回る規模の噴火は日本では起こっていない。後者を上回る規模の噴火も世界で起こっていない。それぞれが、日本と世界の過去2000年間で起きた最大級の噴火である。

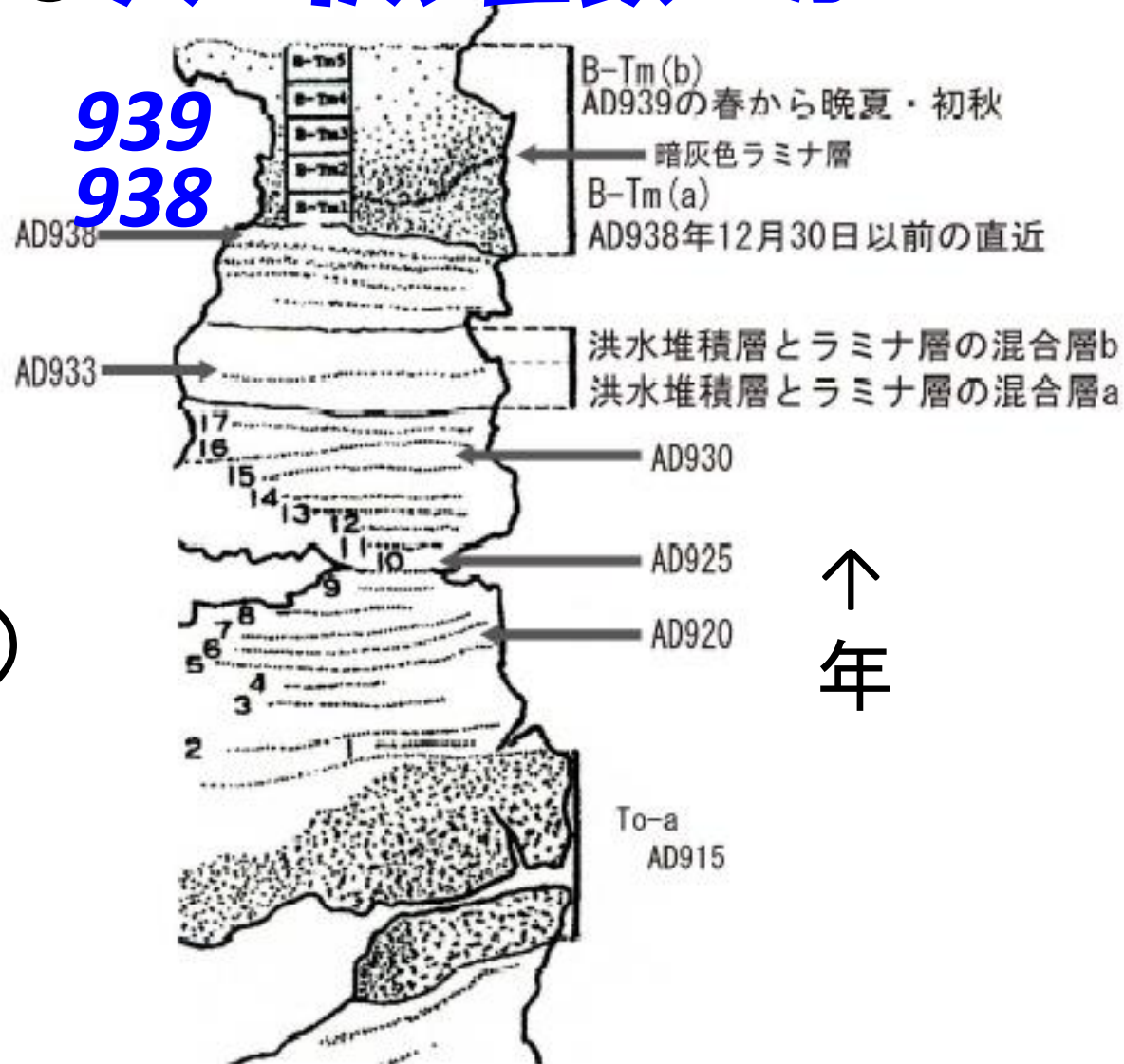
町田 洋・新井房夫 (1992) 火山灰アトラス。東京大学出版会, 276 p.



1. Index map. Distributions of the Baitoushan-Tomakomai (B-Tm) ash and the Towada-A ash are after Machida and Arai (1992).

青森県小川原湖の湖底堆積物の年縞 に見られる **火山灰、白頭山か**

福澤ほか
(1998
汽水域研究)



白頭山(長白山)

天池



谷口宏充 東北大名誉教授(東北アジア研究センター)より

西暦年		白頭山噴火 活動	近い大地震 からの年	巨大地震(逆断層) 三陸(> M8) 南海(> M8) 相模(> M7.9)			富士山噴火
500	500						
	600					684白鳳	
	700						781
	800						800-802延暦
		9世紀噴火?		869貞観	887仁和		864-866貞観
	900	940頃 噴火	+53				937, 999
1000	1000					1099康和	1033, 1083
	1100						
	1200						
	1300	1373玄武岩噴火	+12			1361正平	
	1400					1498明応	1435
1500	1500	1597爆発	-8				1511
	1600			1611慶長	1605慶長		
	1700	1702噴火、火災	-1		1707宝永	1703元禄	1707宝永
	1800	1898小規模噴火	+2	1896明治	1854安政		
	1900	1903小規模爆発	+7	1933昭和	1946昭和	1923大正	
2000	2000	(2002-5マグマ上昇)		2011平成			

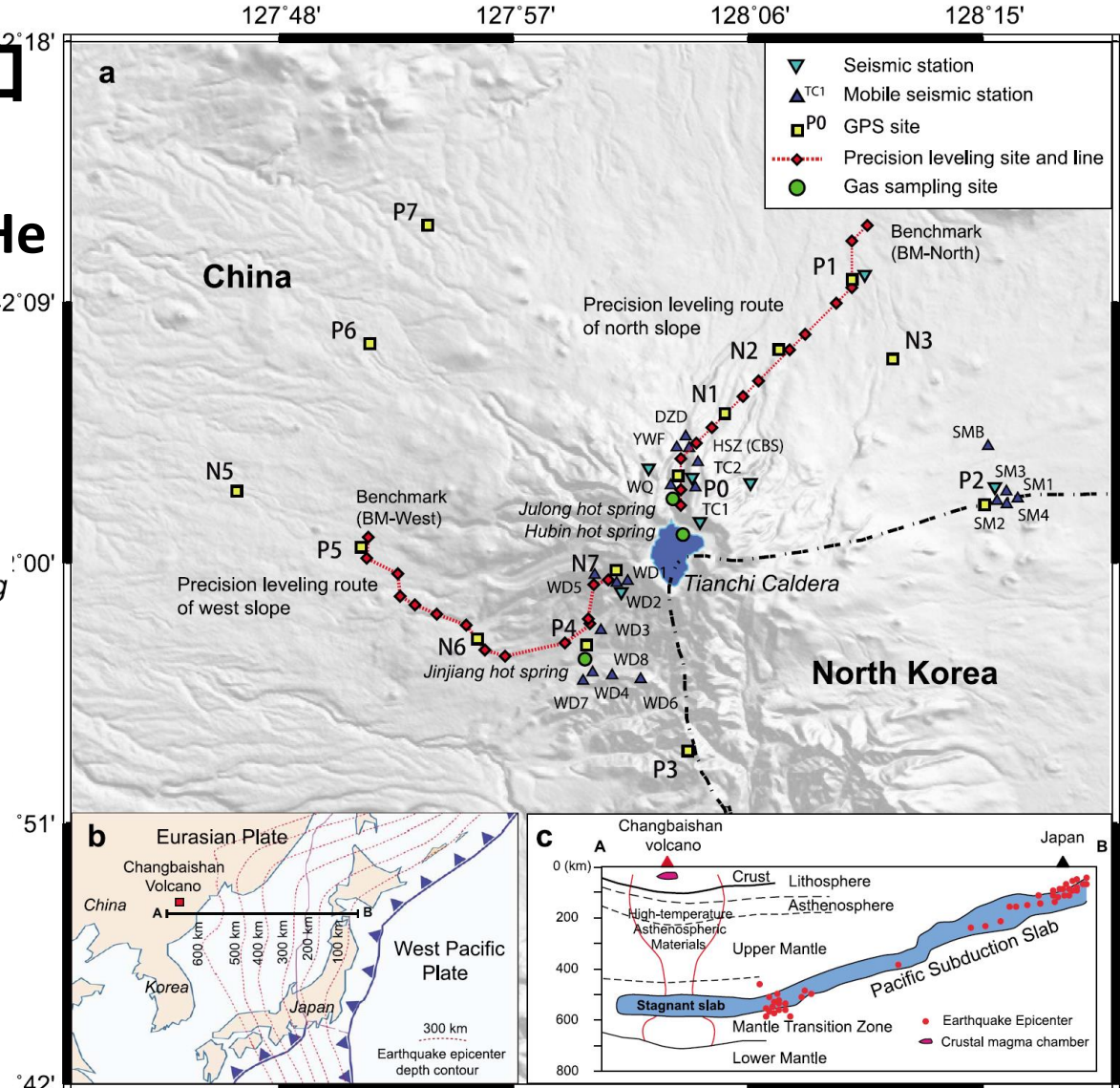
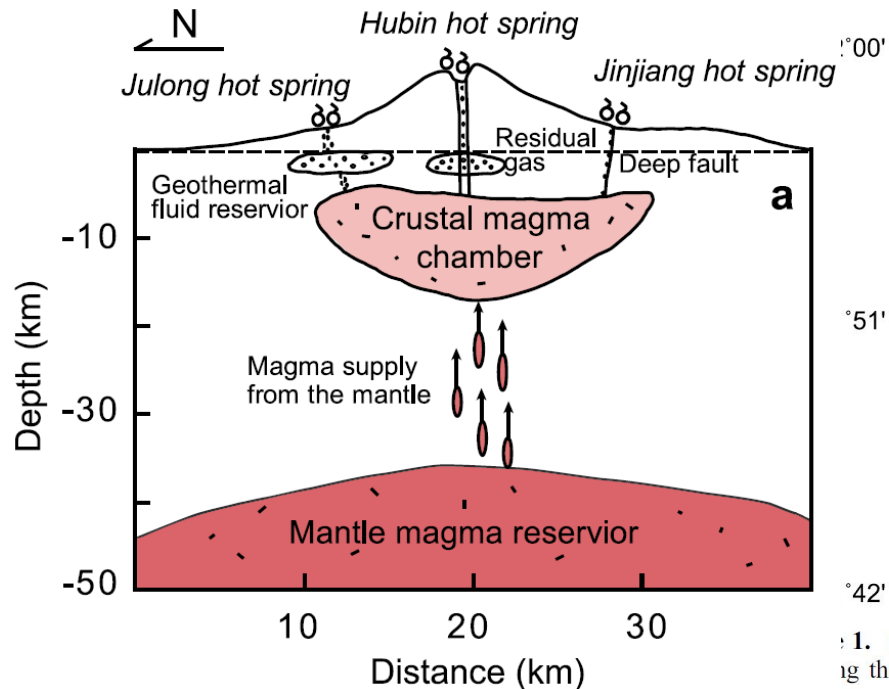
谷口宏充 東北大名誉教授(東北アジア研究センター)(2013)の表から抜粋、和訳

Recent unrest of Changbaishan volcano, northeast China:

A precursor of a future eruption?

Xu et al. (GRL 2012)

火山性地震二桁増加
山体膨張
火山性気体増加 CO_2 He
地下マグマ増加
噴火の前兆か



1. (a) Monitoring network of CHVO. (b) Tectonic location of Changbaishan volcano. (c) A-B profile in Figure 1b showing the west Pacific plate subduction, the Wadati-Benioff seismic zone, and the magmatic system of Changbaishan volcano.

Table 1. Volcanic eruptions thought to be most responsible for high SO_4^{2-} residuals ($\geq 1\sigma$ above mean positive residual value) recorded in the

GISP2 ice core over the last 2000 years. The uncertainty in the age of the eruption is also shown where applicable.

年 硫酸

Volcanic eruption with year

VEI‡

年 硫酸

Volcanic eruption with year

VEI‡

1979	25	Westdhal, Alaska, USA, 1978	3?	1285	44	Unknown; Asama, Japan, 1281	4
1971	83	Hekla, Iceland, 1970	3	1259	349	Unknown (possibly El Chichón, Mexico)	?
1969	92	Fernandina, Galápagos, 1968	4	1229	78	Unknown	?
1965	29	Sheveluch, Kamchatka, Russia, 1964	4+	1227	34	Unknown	?
		Surtsey, Iceland, 1963	3	1205	32	Oshima, Japan, 1200 ± 50	4
1956§	18	Bezmianny, Kamchatka, Russia, 1956	5	1194	61	Oshima, Japan, 1200 ± 50	4
1924	32	Raikoike, Ryukyu Islands, Japan, 1924	4	1175	148	Krafla, Iceland, 1179 ± 2	4?
		Iriomote-Jima, Japan, 1924	4?	1103	100	Hekla, Iceland, 1104	4
1917	32	Katla, Iceland, 1918	4	1026	43	Baitoushan, China, 1010 ± 50	7
1912	67	Katmai, Alaska, USA, 1912	6			Billy Mitchell, Solomon Islands, 1030 ± 25	5+
1902	41	Santa Maria, Guatemala, 1902	6	939	33	Eldgjá, Iceland, 934 ± 2	4
		Soufriere, St. Vincent, 1902; Pelee, Martinique, 1902	4	938	98	Eldgjá, Iceland, 934 ± 2	4
1883	46	Krakatau, Indonesia, 1883	6	936	65	Eldgjá, Iceland, 934 ± 2	4
1854]	27	Sheveluch, Kamchatka, Russia, 1854	5	915]	26	Towoda, Japan, 915	5
		Chikurachki-Tatarinov, Kurile Islands, 1853	5?	902	40	Bardarbunga, Iceland, 900?; Tolboke, Kamchatka, Russia, 900?	-
1831	68	Babuyan, Philippines, 1831	4			Ksudach, Kamchatka, Russia, 900	
1830	52	Kliuchevskoi, Kamchatka, Russia, 1829	4?	900	39	Same as in 902	
1815	94	Tambora, Indonesia, 1815	7	875	33	Kaimon, Japan, 874	
1809	67	Unknown	?	853]	29	Furnas, Azores, 840 ± 100	
1781	134	Laki, Iceland, 1783; Asama, Japan, 1783	4	823	42	Unknown	
1765	35	Hekla, Iceland, 1766	4	822	41	Unknown	
1737	32	Tarumai, Japan, 1739	5	767	28	Cerro Bravo, Columbia, 750 ± 150	
						Oshima, Japan, 750 ± 50	
1727	25	Oræfajokull, Iceland, 1727	4	757]	27	Oshima, Japan, 750 ± 50	
1695	39	Komaga-Take, Japan, 1694	4	702]	26	Bezmianny, Kamchatka, Russia,	
1693	29	Hekla, Iceland, 1693	4			Bona-Churchill, Alaska, USA, 700	
1667	32	Tarumai, Japan, 1667	5	696]	31	Same as in 702; unknown	
1645§	20	Long Island, New Guinea, 1660 ± 20	6	695	34	Same as in 702; unknown	
1641	81	Awu, Indonesia, 1641; Komaga-Take, Japan, 1640	5?	691	87	Unknown	
1604	61	Momotombo, Nicaragua, 1605	4	639	149	Unknown	
		Huaynaputina, Peru, 1600	5?	508]	27	Oshima, Japan, 500 ± 200	
1588	34	Kelut, Java, 1586	5?			Sheveluch, Kamchatka, Russia, 500 ± 50	5
1587	72	Colima, Mexico, 1585	4	472	29	Vesuvius-Pollena, Italy, 472	4
1570	28	Billy Mitchell, Solomon Islands, 1580 ± 30	6	436]	27	Opala, Kamchatka, Russia, 430?	5+
1483	34	Mount St. Helens, Washington, USA, 1482	4?	267	49	Unknown; Ilopango, El Salvador, 260 ± 100	6
		Kelut, Java, 1481	4	264	48	Ilopango, El Salvador, 260 ± 100	6
1478	63	Mount St. Helens, Washington, USA, 1479	5	181§	20	Taupo, New Zealand, 177 ± 10	6
1460	66	Kuwae, Vanuatu, 1450 ± ?	?	161]	32	Ksudach, Kamchatka, Russia, 155 ± 100	6
1459	56	Kuwae, Vanuatu, 1450 ± ?	?	152	45	Ibusuki, Japan, 150?	4
1344	54	Hekla, Iceland, 1341	3	77	95	Vesuvius, Italy, 79	5
1328	33	Cerro Bravo, Columbia, 1325 ± 75	4				

*Year of signal in ice core based on interpolated age of each sample from spline. The year of signal is ±2, on the basis of a biyearly sampling scheme. †Residual values are not directly related to the amount of atmospheric loading of the particular eruption or eruptions due to the effects of latitude of eruption on the amount of SO_4^{2-} deposition in Greenland. ‡VEI from (16). VEI is queried when not given in (16) or when magnitude is uncertain. §Events that did not meet the residual criteria but were identified by discriminant analysis. ||Events that met the criteria for residuals but were not identified with the discriminant analysis.

過去の火山噴火

グリーンランド 昔の氷に 含まれる 硫酸

Zielinski ほか
(1994
Science)

グリーンランド、昔の氷に含まれる

Zielinski ほか
(1994 Science)

硫酸

西暦年 SO_4^{2-} (ppb)

1883 46 Krakatau, Indonesia

939 33 Eldgjá, Iceland

938 98 Eldgjá, Iceland

エルトギャウ (アイスランド)

白頭山の可能性もあり

10世紀噴火は 1883クラカタウの3倍
(1991ピナツボの4.5倍)

エルトギャウ (Eldgjá) 火の谷

割れ目火口



<https://ja.wikipedia.org>

地球システムモデル

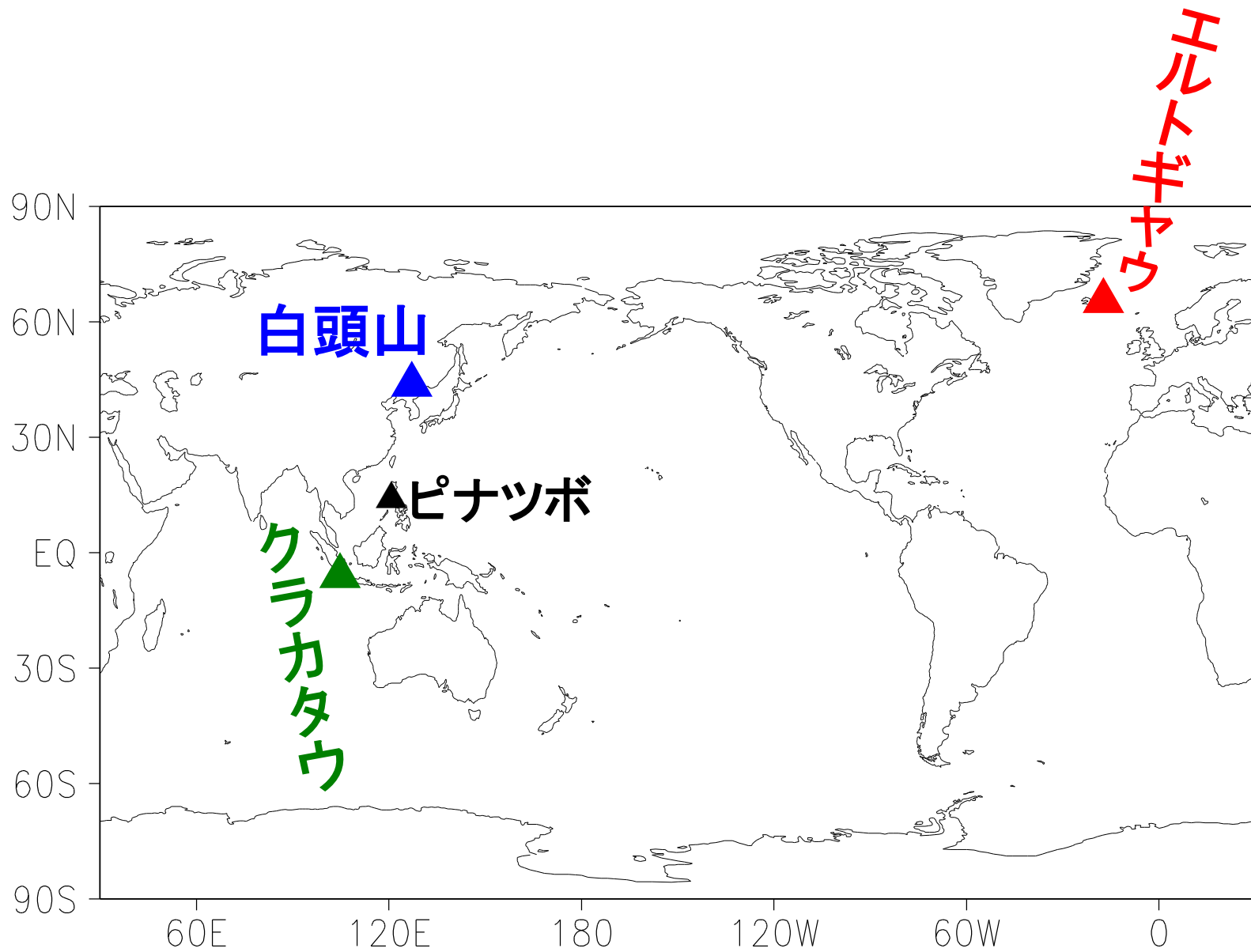
初めの状態：産業革命以前（計算済）

二酸化硫黄（1883クラカタウ噴火の3倍）を
30メガトン 90メガトン

白頭山（42N, 128E）又は

エルトギャウ（64N, 19W）

上空、高度30kmに与え、十数年計算
成層圏



参考として

クラカタウ噴火(1883年) も調べる
(スンダ海峡、インドネシア)

1991ピナツボも似たようなもの

産業革命以後
人為二酸化炭素排出実験

各実験

硫酸エアロゾル

光学深さ

波長550nm

日光を遮る

噴火直後

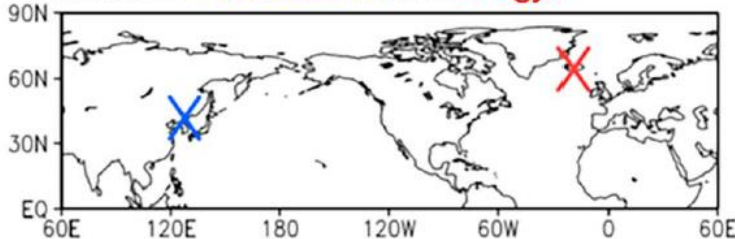


1年後



2年後

Location of Paektusan and Eldgjá



二酸化硫黄から



硫酸(の液滴)へ

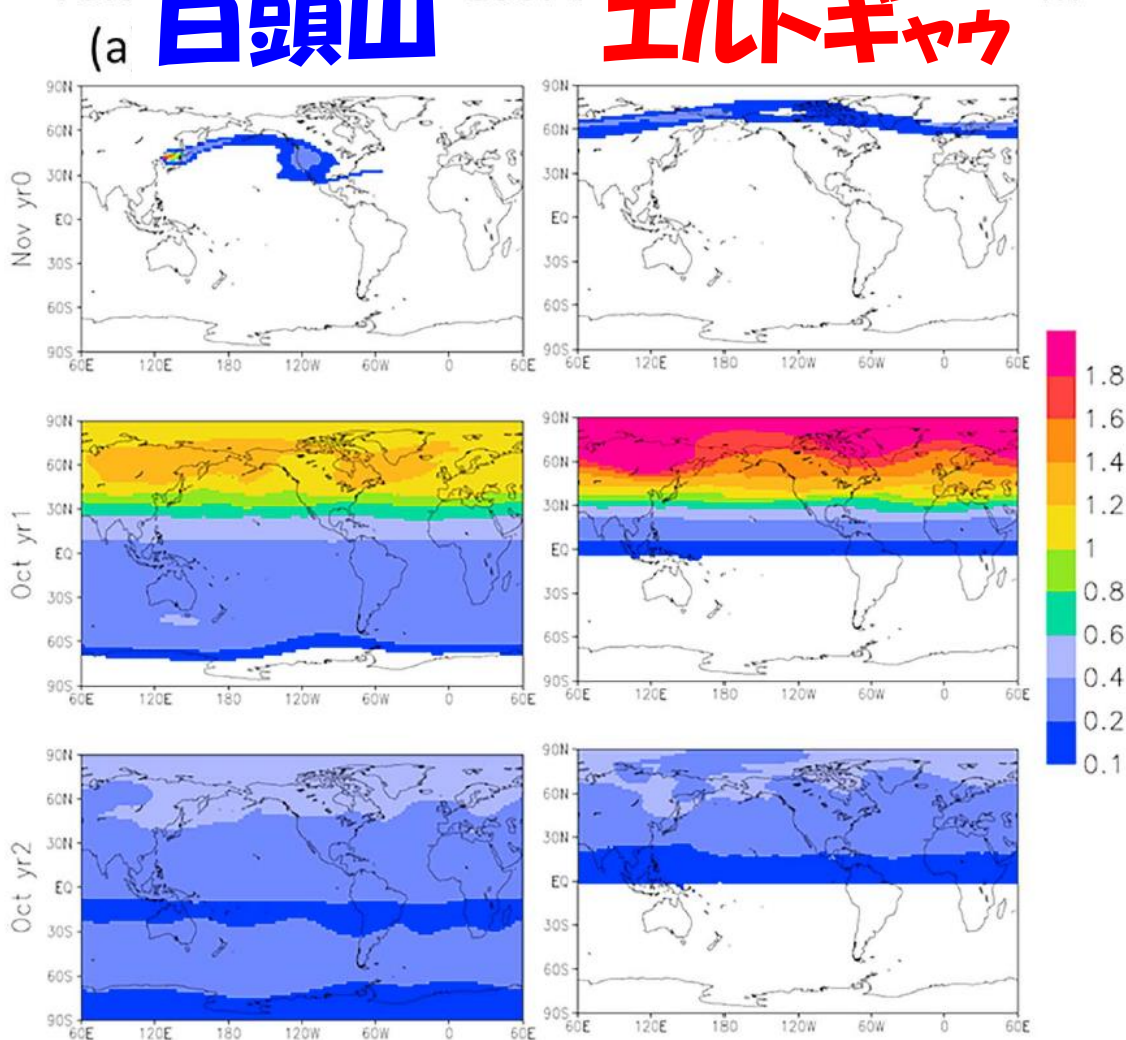
Volc

白頭山

osol C

エルトギャウ

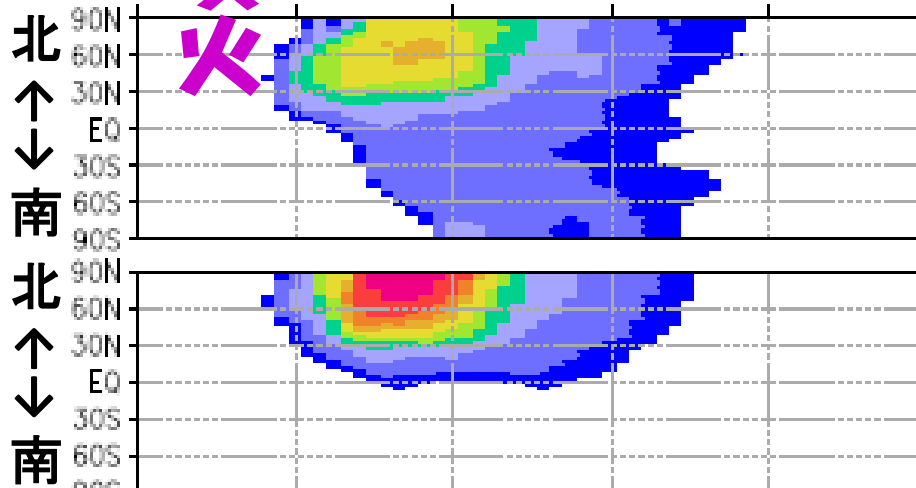
m



東西平均

硫酸
エアロゾル
光学深さ
日光を遮る

0 噴火 1 2 3 4 5 年 →

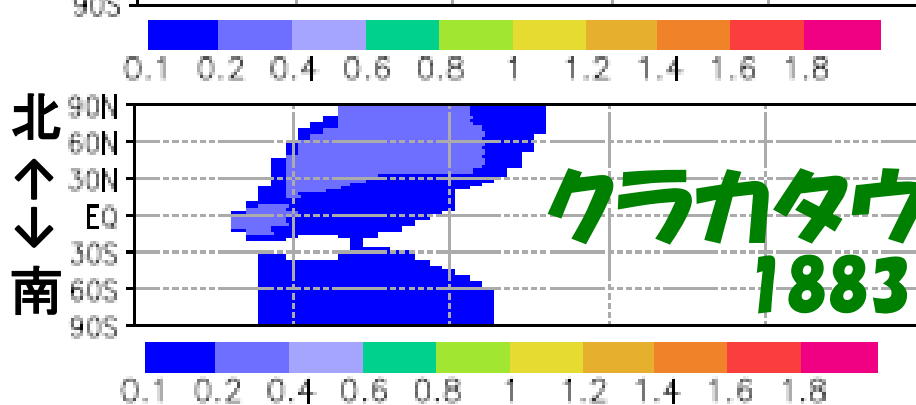


白頭山

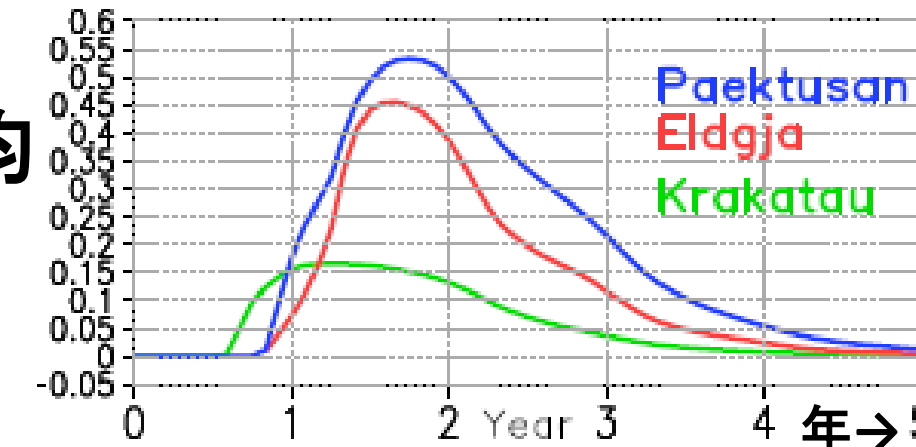
エルトギャウ

硫酸エアロゾル
全球を覆う

北半球
高緯度へ
集中

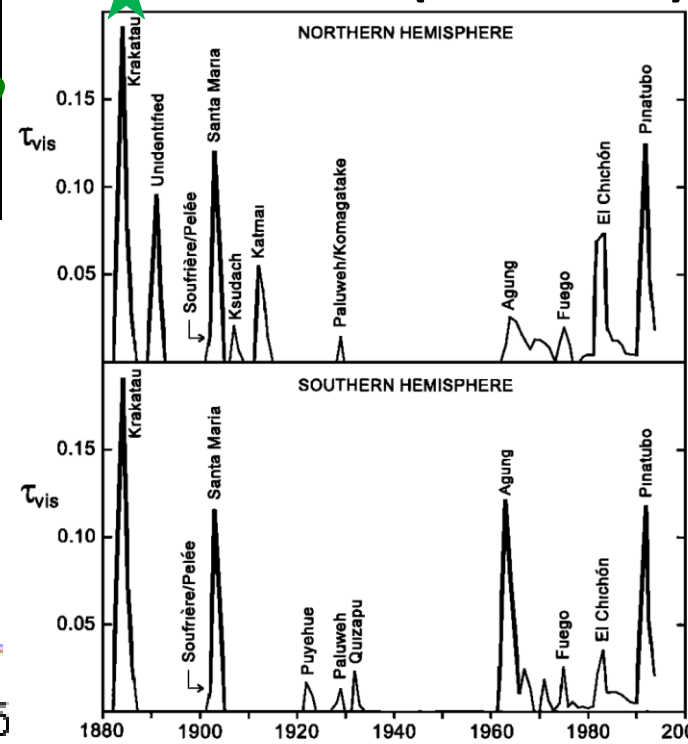


クラカタウ
1883



世界平均

★ Stothers (2001 JGR)



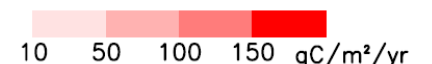
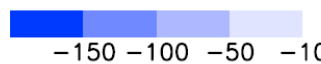
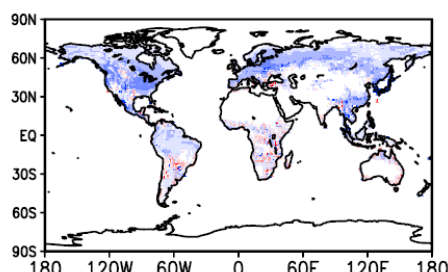
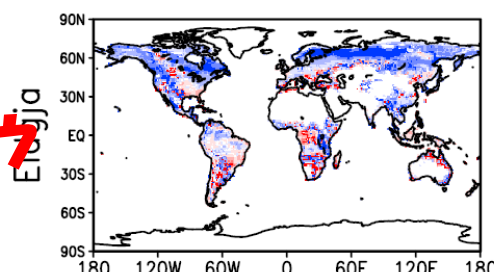
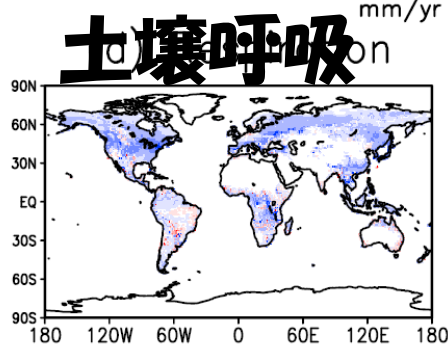
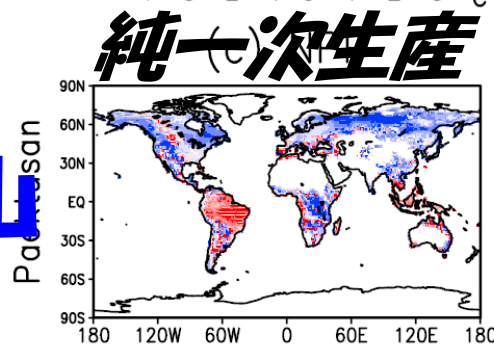
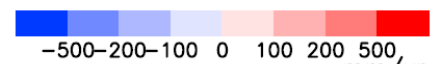
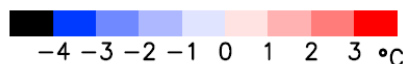
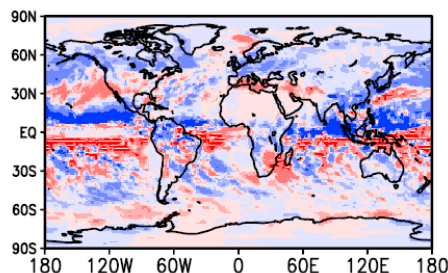
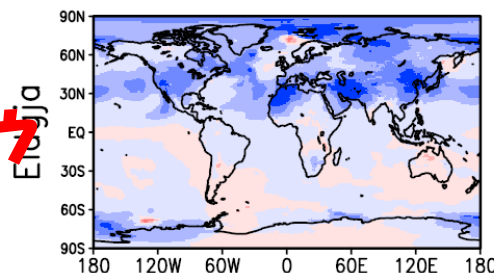
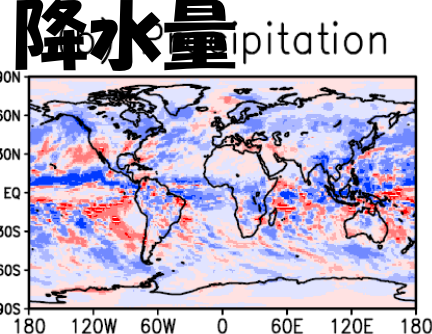
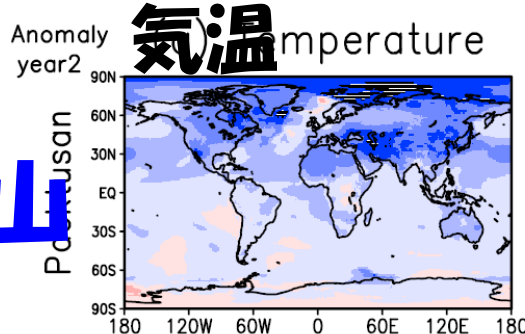
噴火後 2年

前との差 白頭山
(偏差)

エルトギャウ

白頭山

エルトギャウ



噴火後 2年 前との差(偏差)

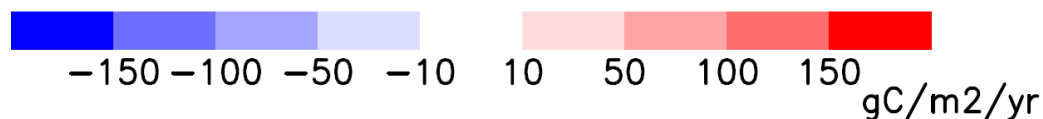
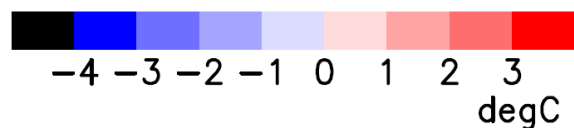
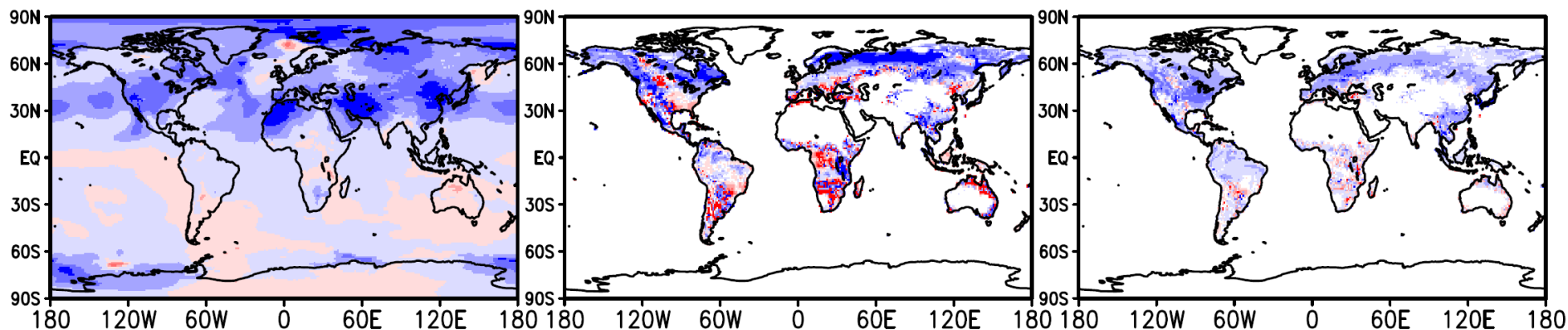
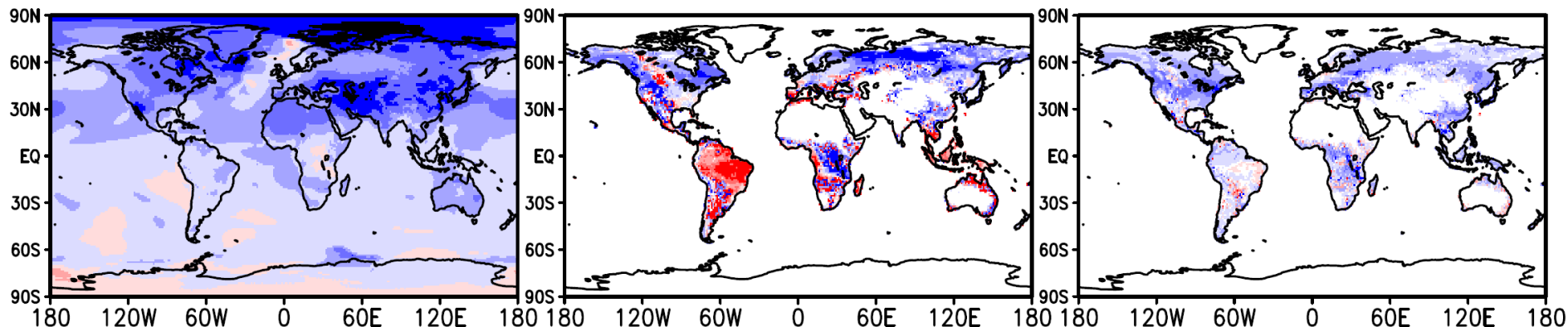
Anomaly year2 (a) 気温

白頭山

エルトギヤウ

純一次生産

土壌呼吸



年変化 世界平均

白頭山

エルトギャウ

クラカタウ

実験

白頭山、エルトギャウ

概ね

10W/m²減(-5%)

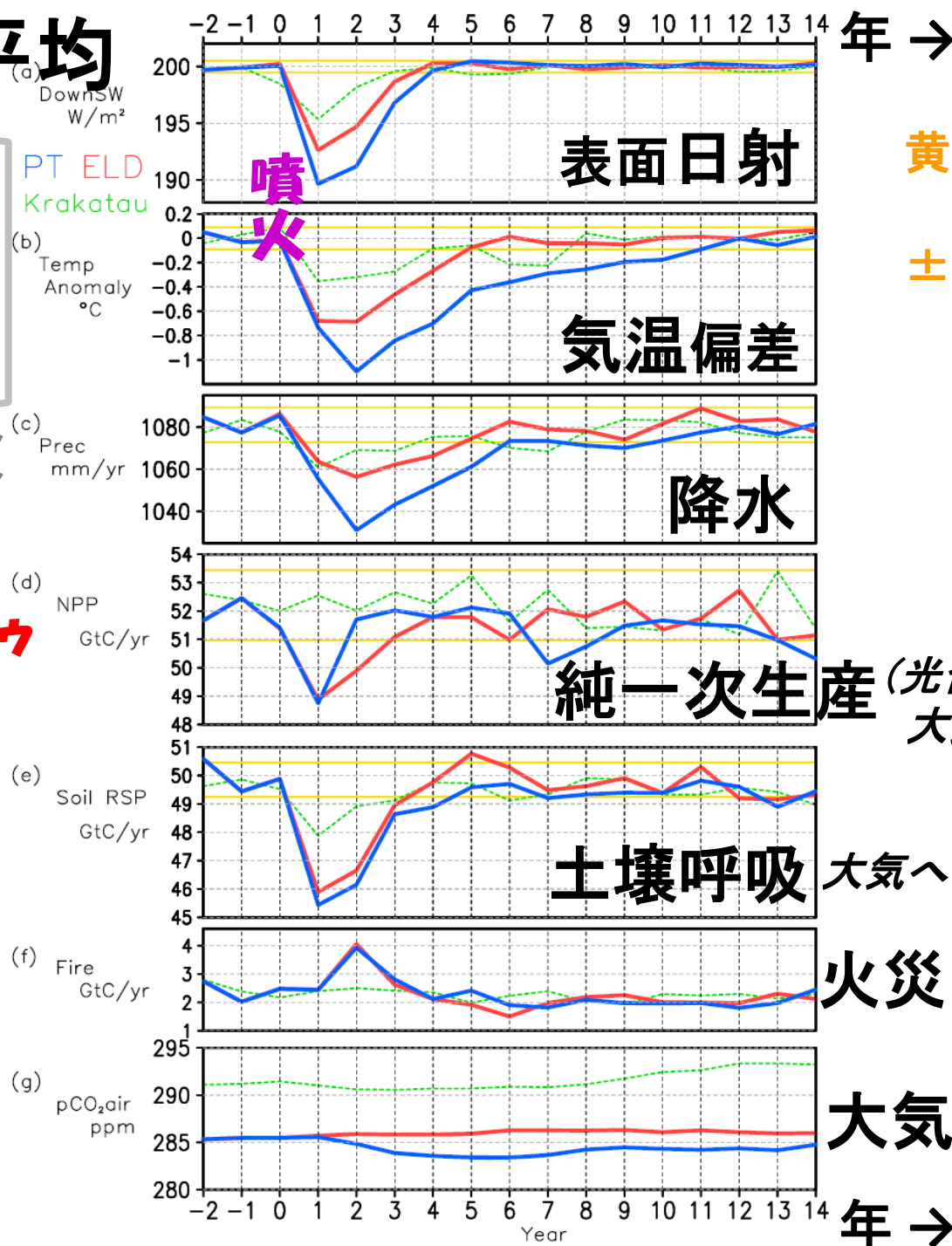
1°C低下

陸生産 5%減

土呼吸 10%減



大気CO₂
1ppm減



黄色の線
の幅は
±2標準偏差

純一次生産 (光合成－維持呼吸)
大気からCO₂吸収

土壌呼吸 大気へCO₂放出

火災 増加→大気CO₂
1ppm増

大気二酸化炭素

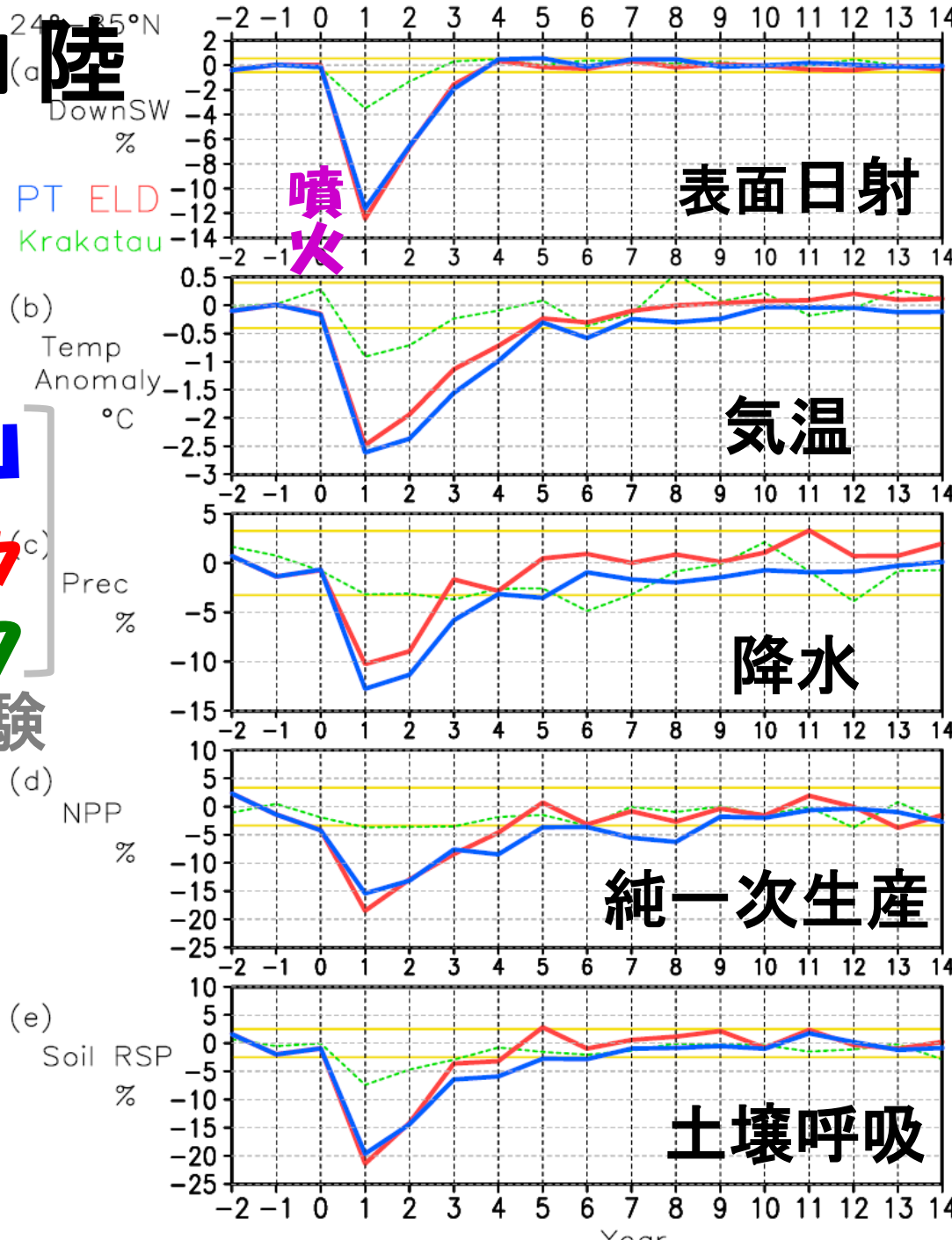
年 →

白頭山 低緯度と南の寒冷化も強い
↓ 全球寒冷乾燥化強

北 24-85N 陸 年 →

偏差

白頭山
エルトギャウ
クラカタウ
実験



黄色の線
の幅は
±2標準偏差

寒冷乾燥
生態系衰退

熱帯

23S-23N 陸

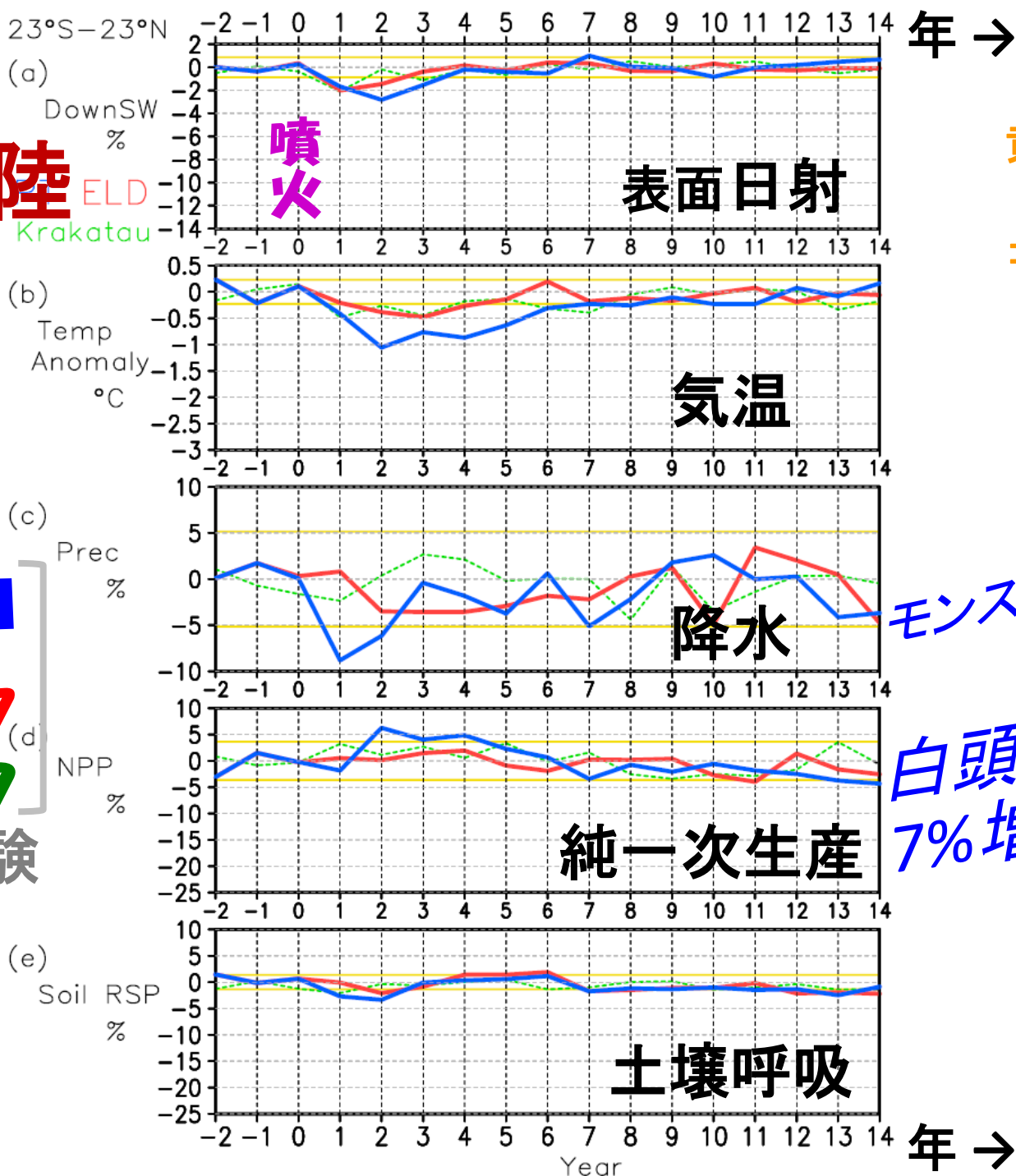
偏差

白頭山

エルトギャウ

クラカタウ

実験



温度による **光合成** の強さ

酵素と電子伝達の性質: **最大は30°C付近**

他に葉の気孔の性質も

↑
電子伝達

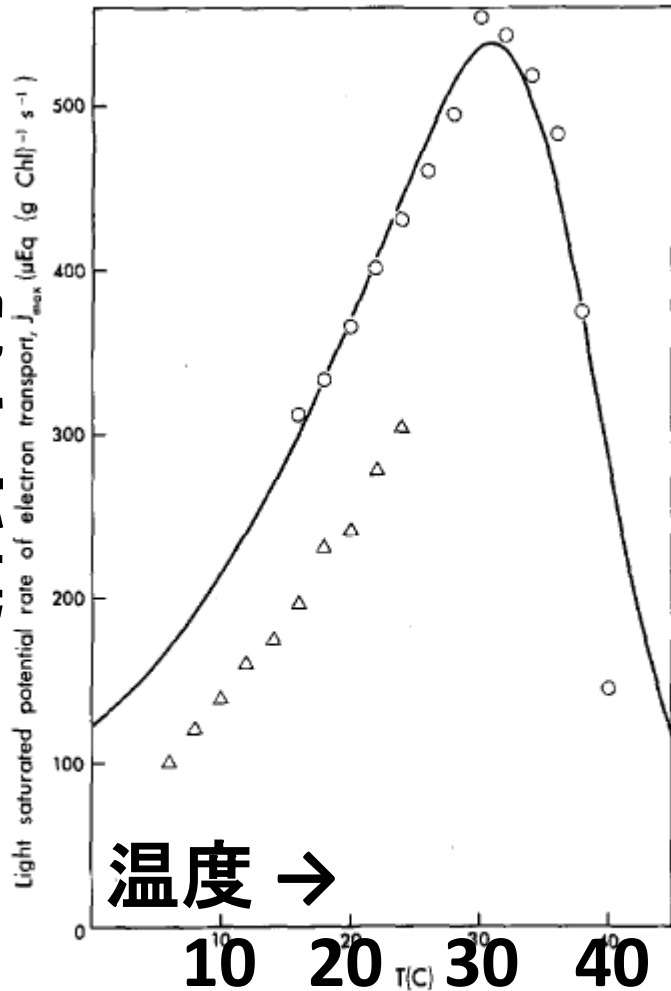


Fig. 2. Temperature dependence of the light saturated potential rate of electron transport, j_{max} . The data are the rates of DCIP reduction (here doubled to obtain rates of electron transport) obtained by Nolan and Smillie (1976) in two batches of chloroplasts from *Hordeum vulgare*. The smooth curve is given by Eq. (36)

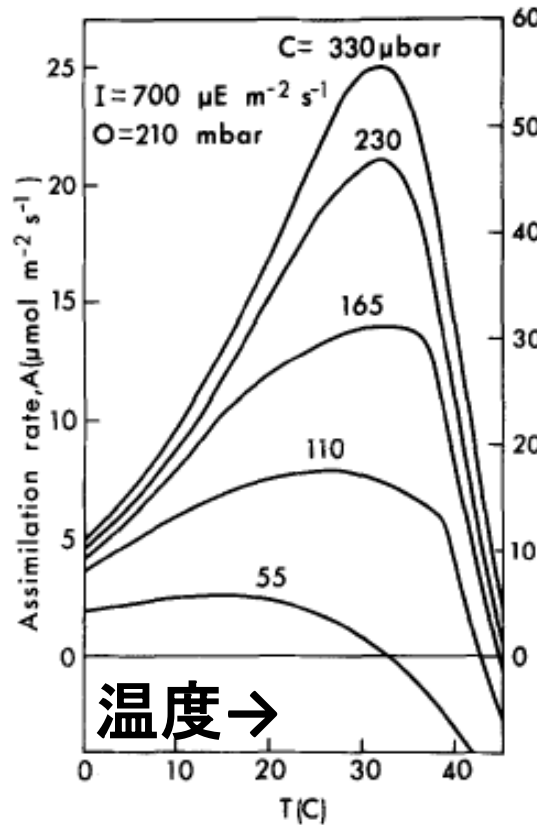


Fig. 8. Effect of intercellular $p(\text{CO}_2)$, $C(\mu\text{bar})$, on the temperature response of net CO_2 assimilation rate. The absorbed irradiance was $700 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and the $p(\text{O}_2)$ is 210 mbar

↑
光合成

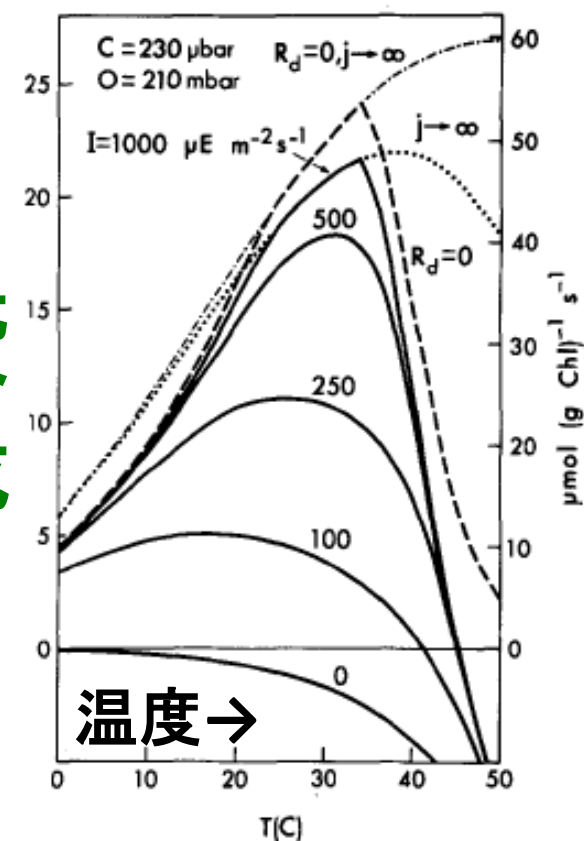


Fig. 9. Effect of absorbed irradiance, I , on the temperature dependence of net CO_2 assimilation rate. The effect of removal of "dark respiration," R_d , is shown as the dashed line and the effect of removal of electron transport limitations (potential electron transport, $j \rightarrow \infty$) is shown as the dotted line. The simultaneous removal of both $R_d = 0, j \rightarrow \infty$ is shown as $(- \cdot - -)$

Farquhar et al. (1980 Planta)

光合成、20～24℃で最大

熱帯では低温化により

光合成増加

(維持呼吸(消費)減少 も加わり)

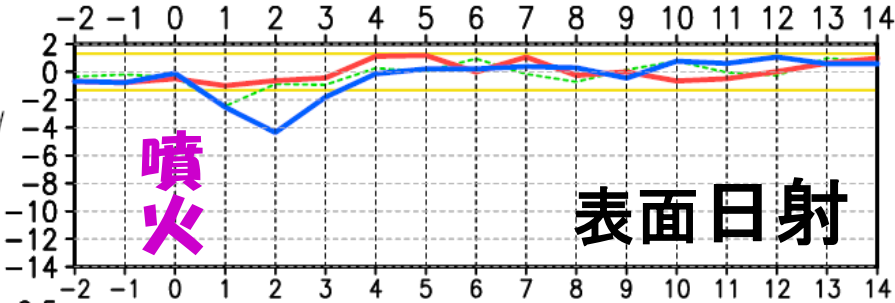
純一次生産(光合成－呼吸)増加

熱帯では

農作物増加の可能性大

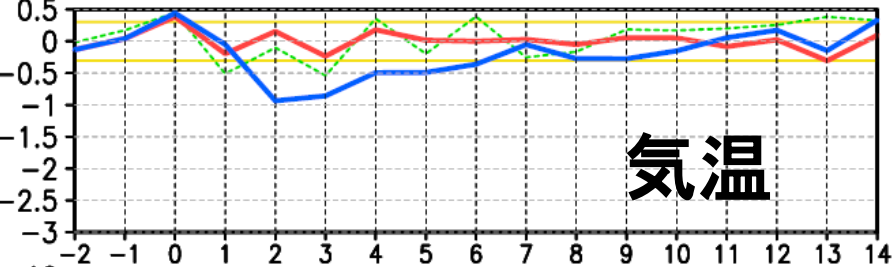
南 24-60S 陸 偏差

60°-24°S
DownSW %
PT ELD
Krakatau



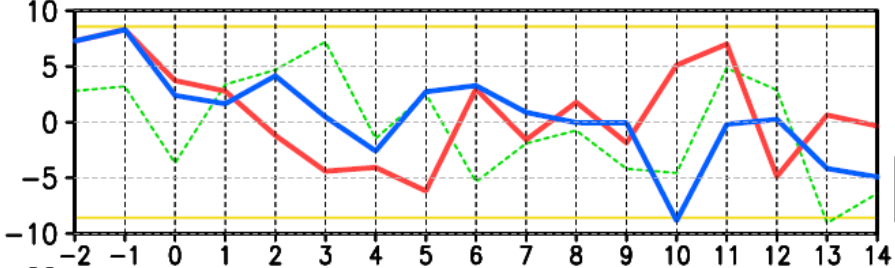
黄色の線
の幅は
±2標準偏差

(b)
Temp
Anomaly
°C



不明瞭

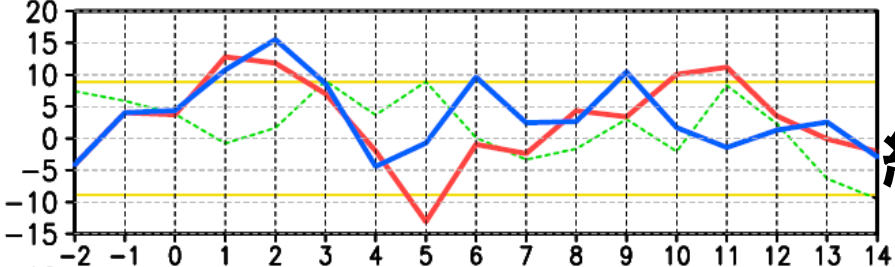
(c)
Prec
%



降水

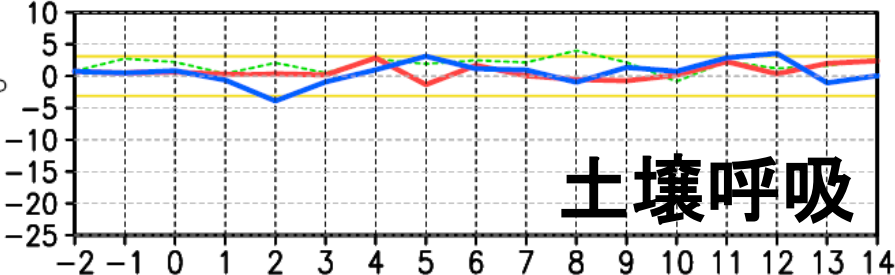
白頭山
エルトギャウ
クラカタウ
実験

(d)
NPP
%



純一次生産

(e)
Soil RSP
%



土壤呼吸

Year 年 →

火災

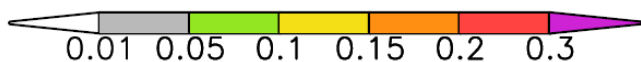
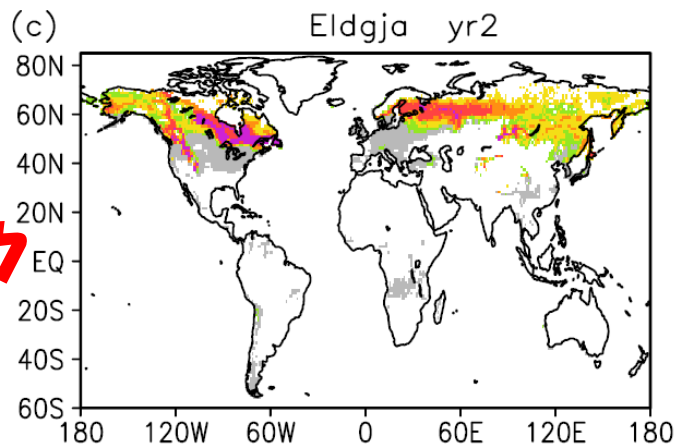
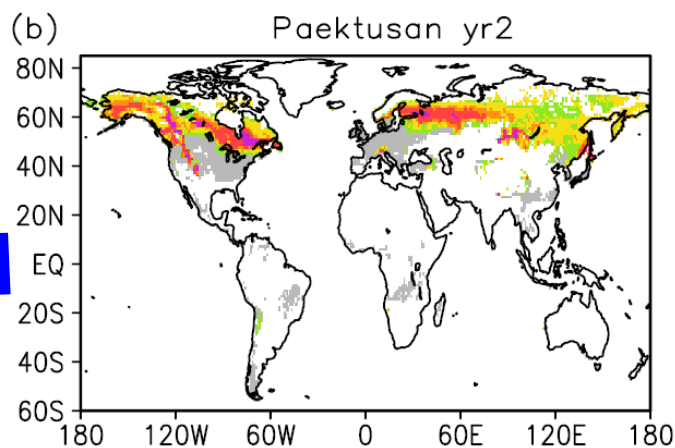
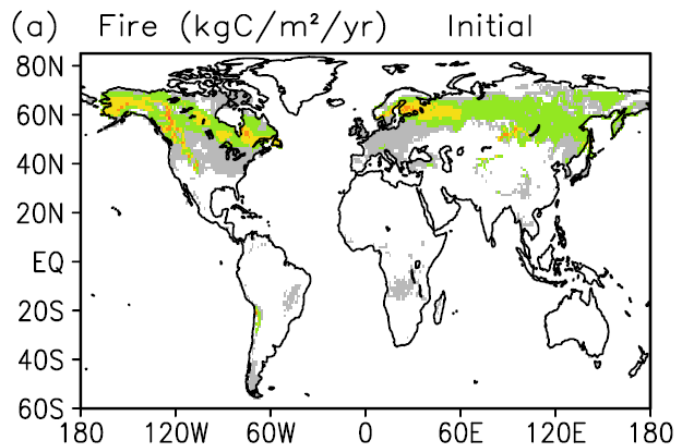
初め



噴火 2年後

白頭山

エルトギャウ



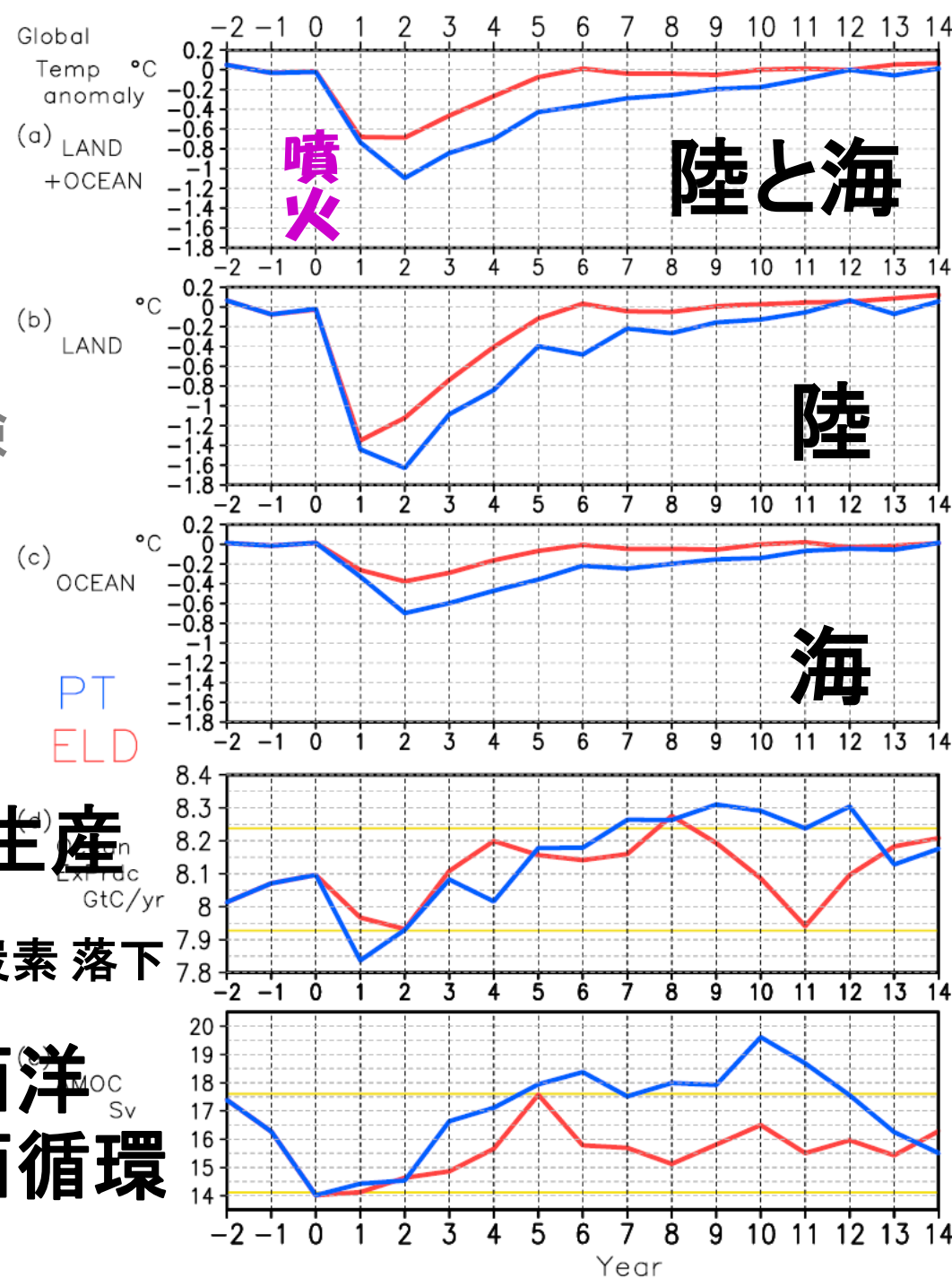
乾燥で増加
北米、北欧
2倍以上

$\text{kgC}/\text{m}^2/\text{yr}$

年 →

気温偏差

年 →



白頭山
エルトギャウ
実験

海洋 新生産
深海への
粒子有機炭素 落下

北大西洋
子午面循環

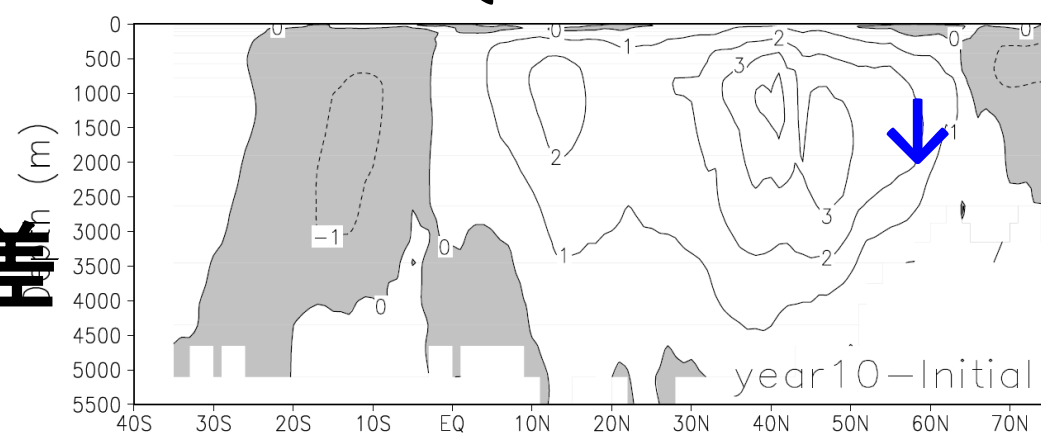
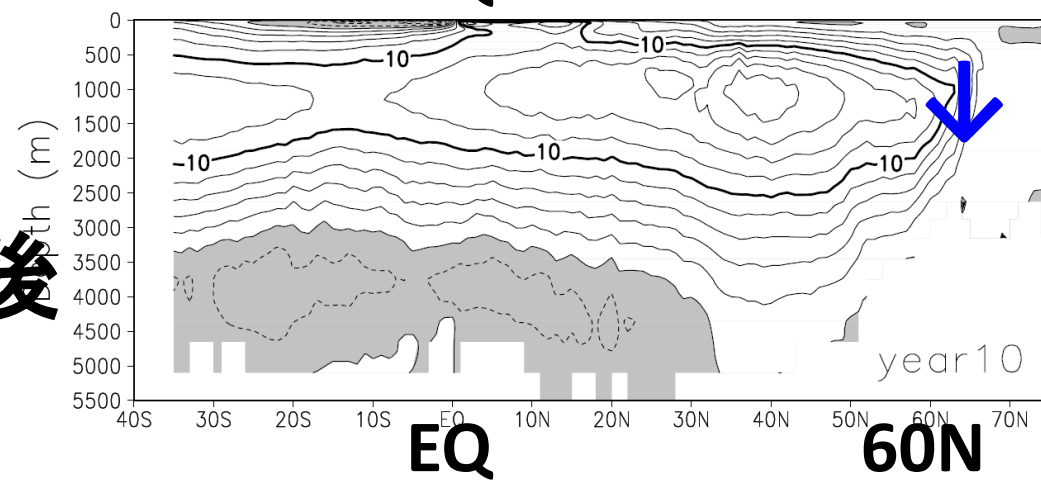
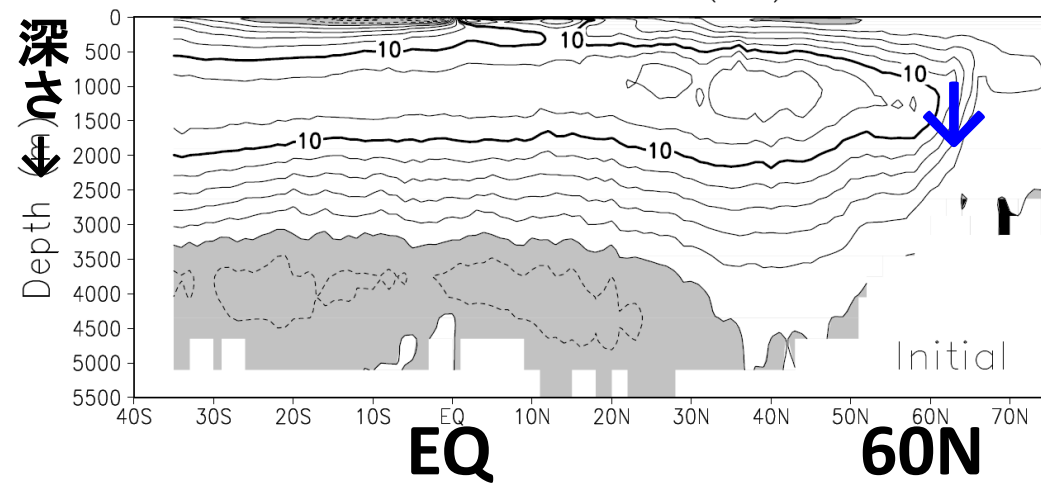
黄色の線
の幅は
±2標準偏差

白頭山実験

初期

噴火
10年後

初期
との差



北大西洋
子午面循環

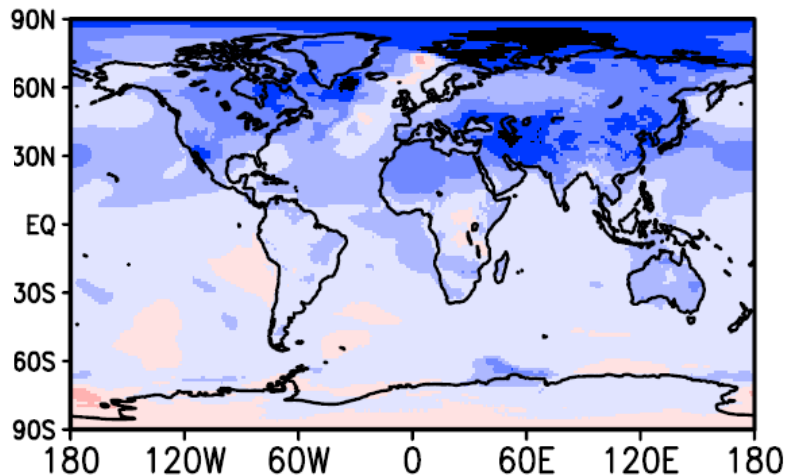
北の寒冷化
降水減少
塩分増加も

より重い水生成
沈み込み盛んに

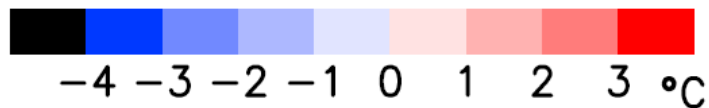
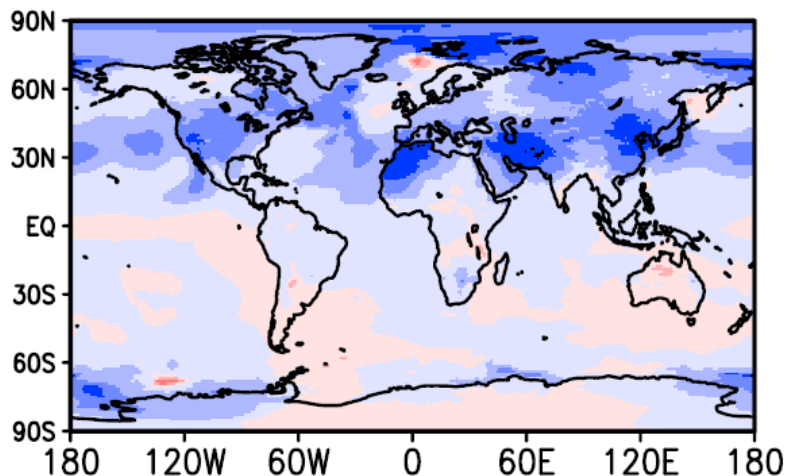
噴火後 2年 偏差

Anomaly
year2 (a) 表面 気温

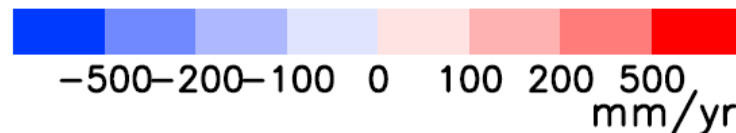
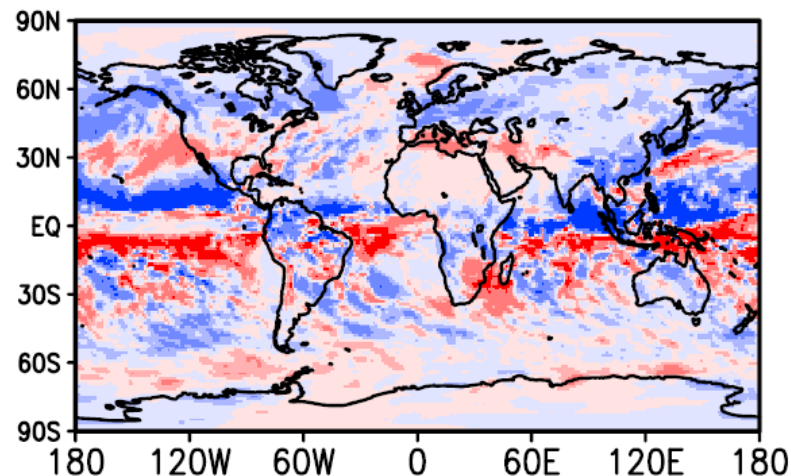
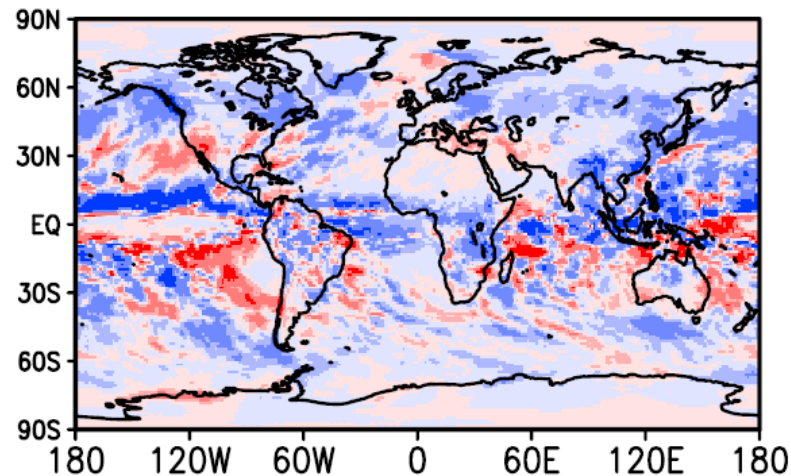
白頭山



エルトギヤウ



(b) 降水量



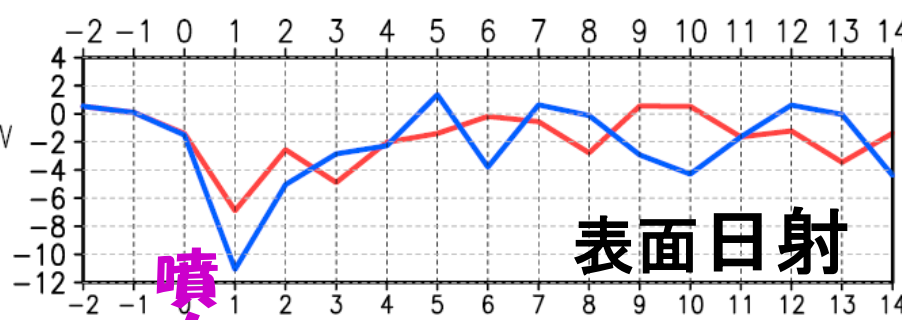
出羽 40N 140E 偏差

白頭山
エルトギャウ

水稻 作況指数
平成5年
(ピナツボ噴火影響)
全国 74 (-26% ?)
東北 56
北海道 40
昭和20年 全国 67

Dewa

DownSW
%

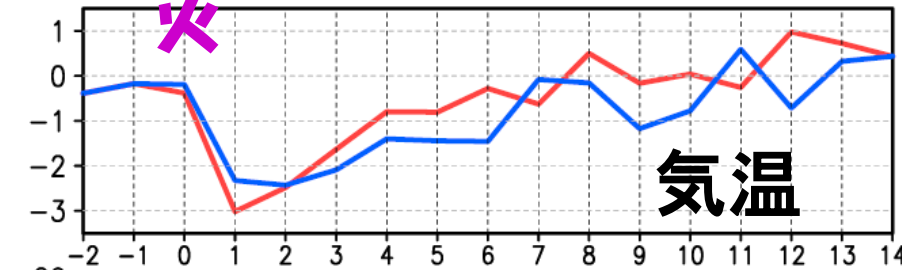


(b)

Temp
°C

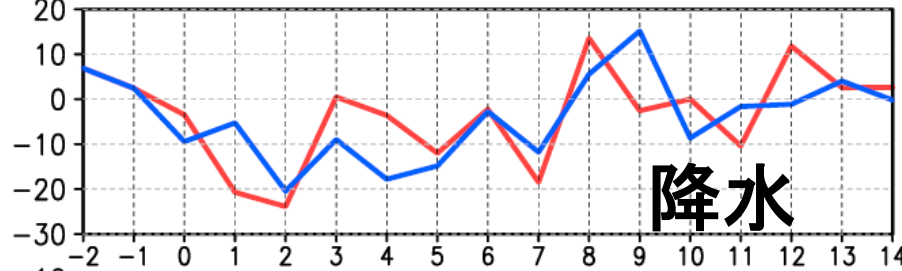
PT

ELD



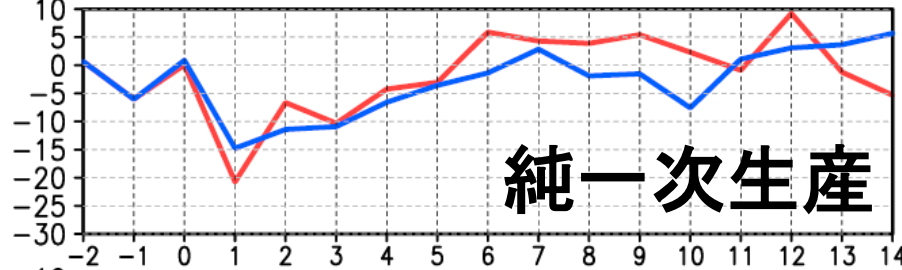
(c)

Prec
%



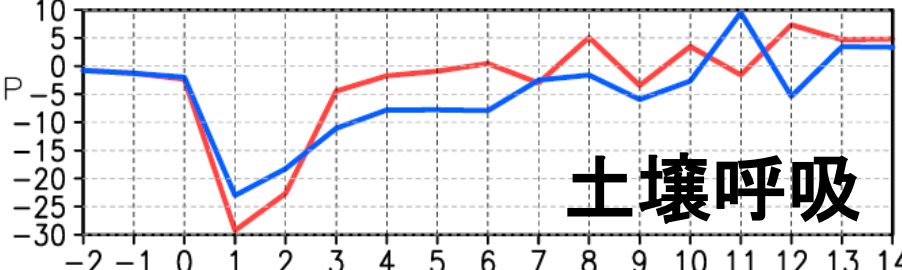
(d)

NPP
%



(e)

Soil RSP
%



年 →

2.5°C低下

作況指数80?
20%減少

25%減少
年 →

硫酸エアロゾル粒子、火山灰降下

環境変動（日射減少、寒冷乾燥化）

← 不作・飢饉・社会不安

「天慶出羽の乱」

（船木2011みちのくの考古学）

藤原忠平（太政大臣）

天慶二年四月十七日条 『貞信公記抄』

（939年5月8日）

十七日 出羽国馳駅言上 凶賊乱逆

与秋田城軍 合戦事等

俘囚反乱之状 『日本紀略』

五月六日

賊徒到来秋田郡 開官舎 掠取官稻

焼亡百姓財物 率異類可来

七月十五日 賊戦行事

俘囚反乱之由 『日本紀略』

まとめ

地球システムモデル

成層圏 二酸化硫黄大量放出 実験

10世紀、白頭山とエルトギャウの噴火

1991ピナツボの数倍放出

世界平均、概ね同じ影響

日射減少 (5%, 10W/m^2)

気温低下 (1°C)

純一次生産減少 (5%)

土壌呼吸減少 (10%)

熱帯、純一次生産増加、豊作

(1)光合成が熱帯気温より低温で最大

(2)気温低下で呼吸(消費)の減少

北半球中緯度、激しい寒冷化(2.5°C)

純一次生産減少(20%)、不作

→ 飢饉 → 東北日本での反乱、騒擾

