

「地球温暖化」でアジアの雨と雪は どう変わるか？

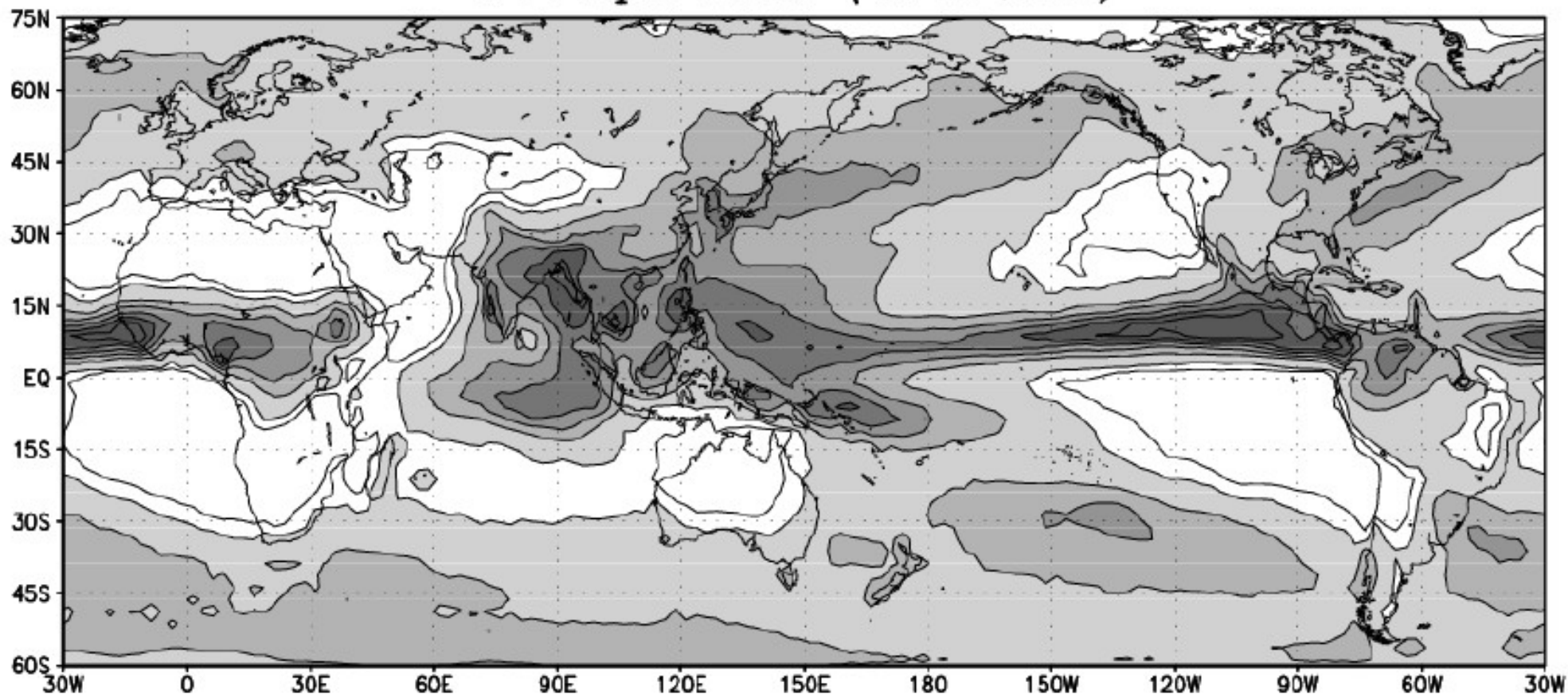
安成哲三

名古屋大学地球水循環研究センター

<http://mausam.hyarc.nagoya-u.ac.jp>

世界の降水量分布 (GPCP) [6-8月]

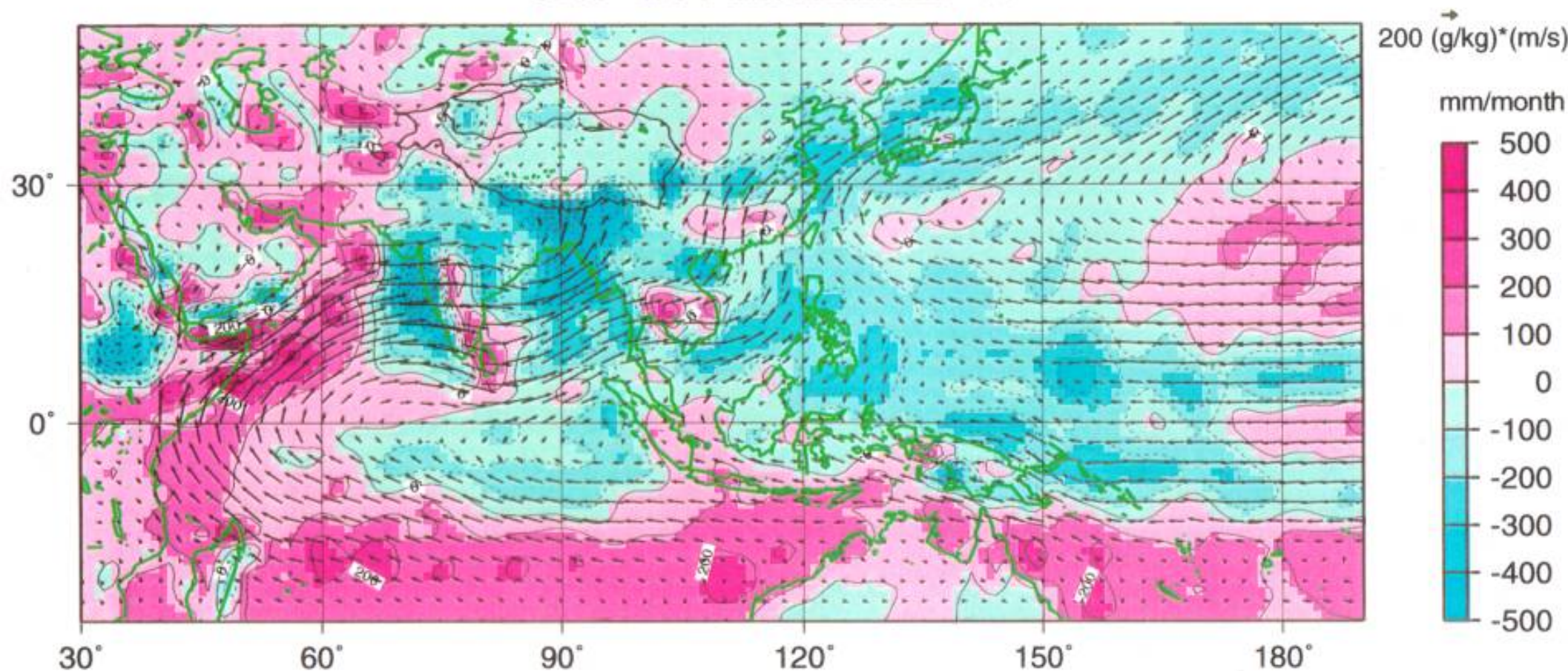
Precipitation (GPCP, JJA)



アジアモンスーン地域の水蒸気の流れと収束量(7月)

ECMWF Re-analysis W.V. Flux and Divergence

1979-1993 mean month=07



モンスーンアジアでは毎年、どこかで豪雨・洪水



ベトナム中部フエの洪水



Photo: FAO/G. Bizzarri



北海道留萌川の氾濫



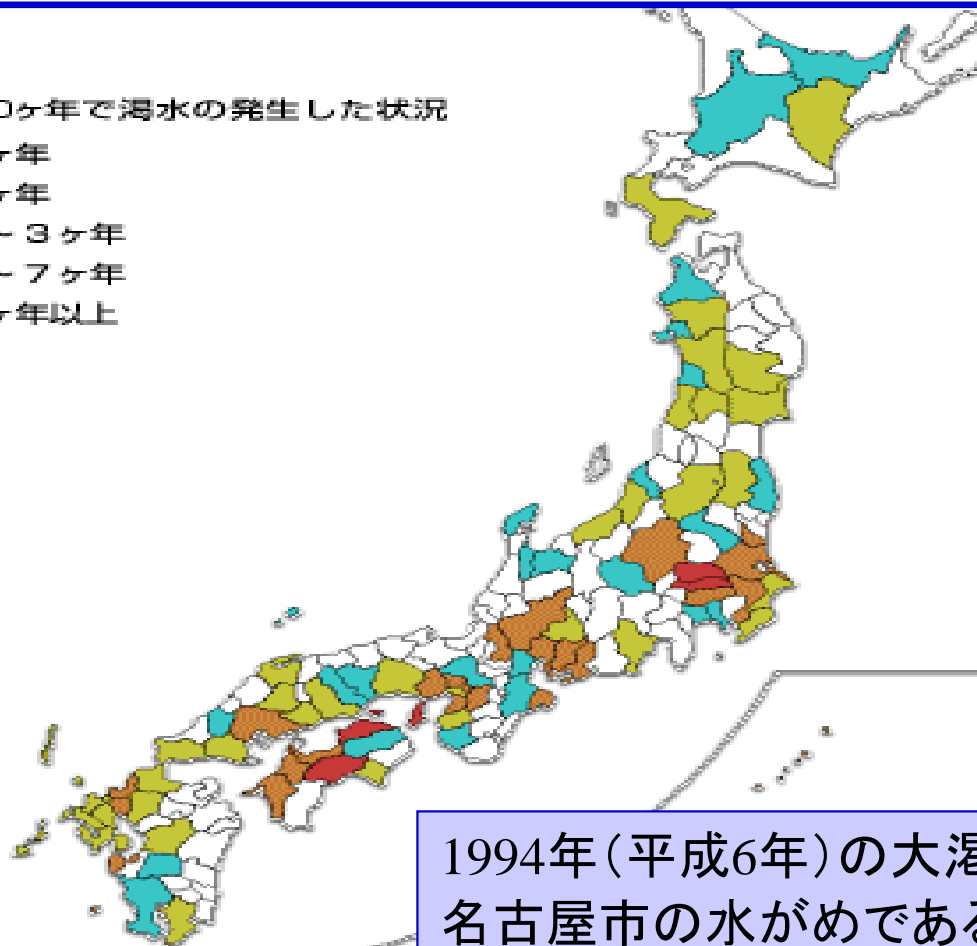
集中豪雨時の藤沢市内(2003年5月)

モンスーンアジアでは干ばつも近年多くなっている？

最近20年間での日本の 渇水(減断水)の発生状況

最近20ヶ年で渇水の発生した状況

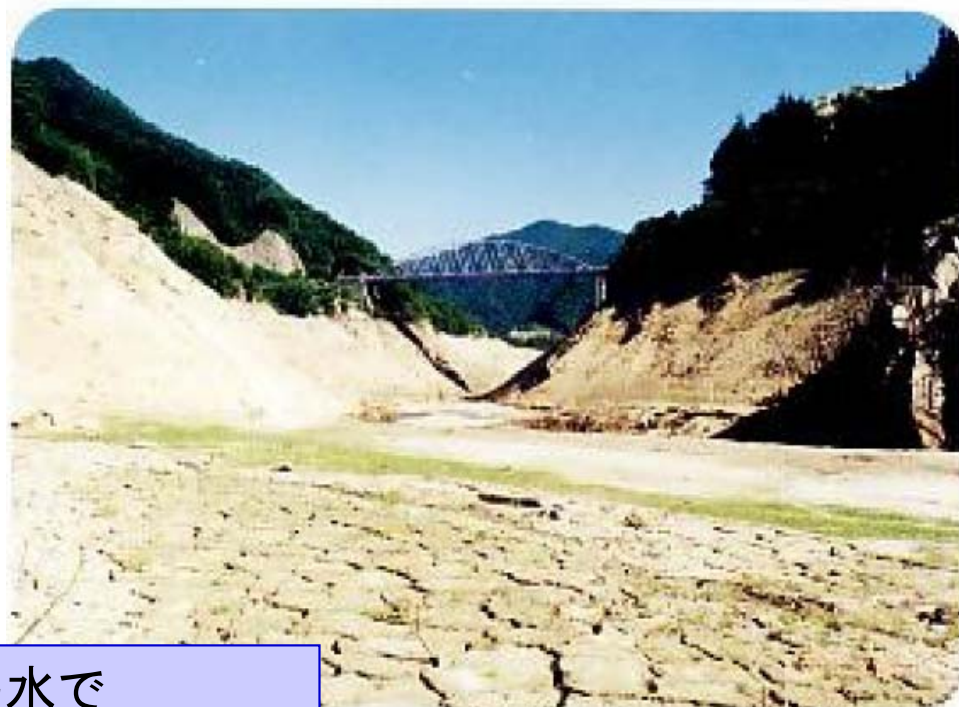
- 0ヶ年
- 1ヶ年
- 2～3ヶ年
- 4～7ヶ年
- 8ヶ年以上



(国土交通省)

1994年(平成6年)の大渇水で
名古屋市の水がめである
飛驒川岩屋ダムは完全に干上がった
(名古屋市上下水道局提供)

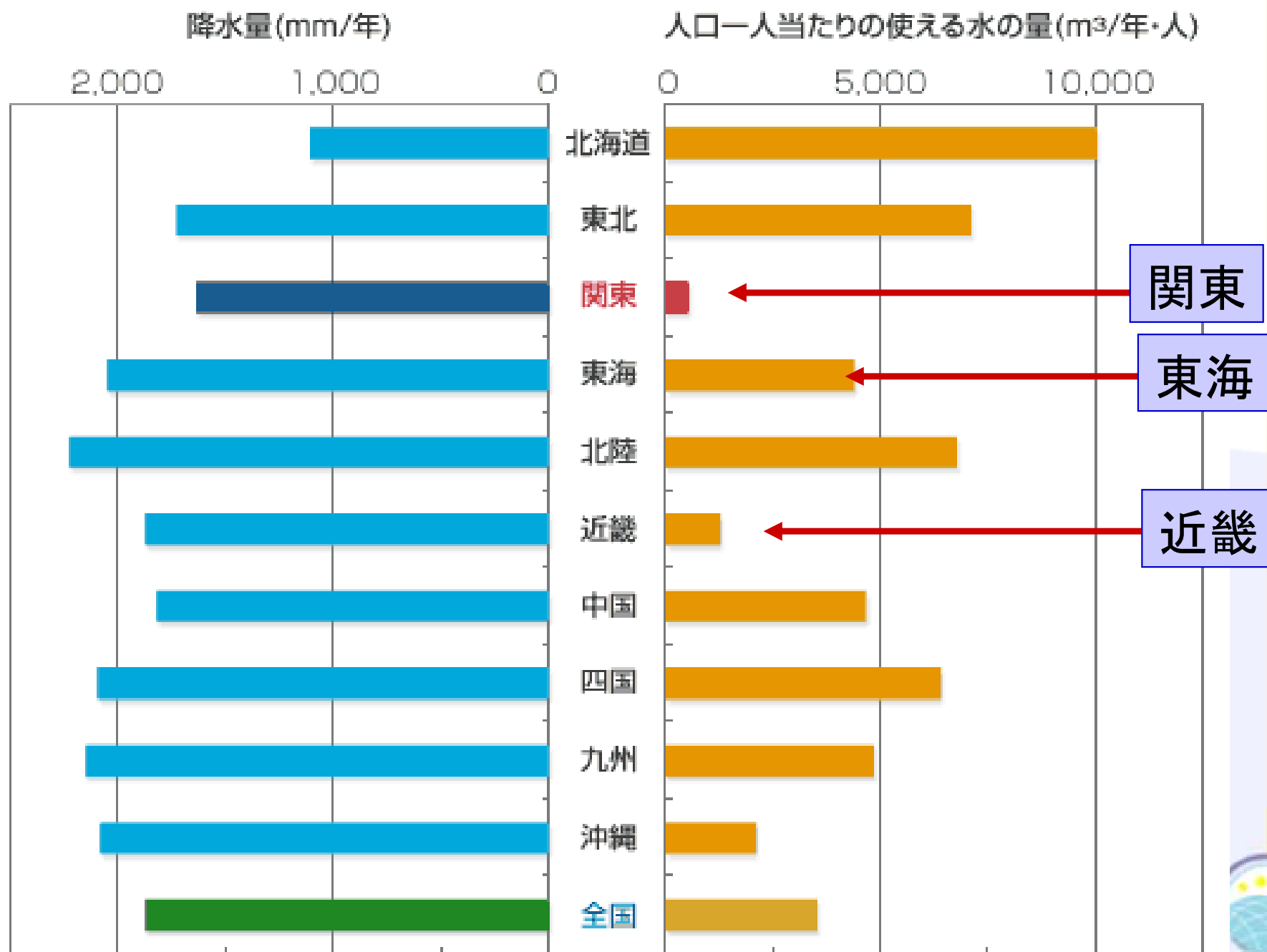
タイの干ばつ
www.kantei.go.jp



平成6年の大渇水で干上がった岩屋ダム



首都圏・大都市圏では一人当たり使用できる水は非常に少ない



温室効果と気候変化

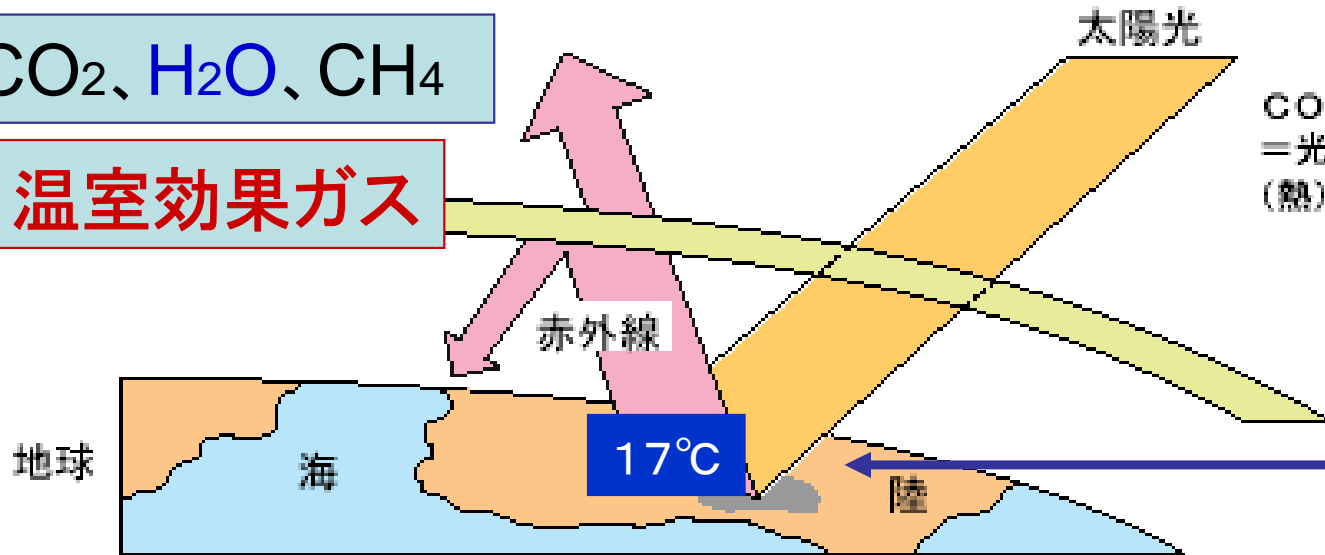
地球大気の温室効果ガスと気候は
これまでどのような変化をしてきたか？



温室効果とは地球の大気を暖めるしくみ

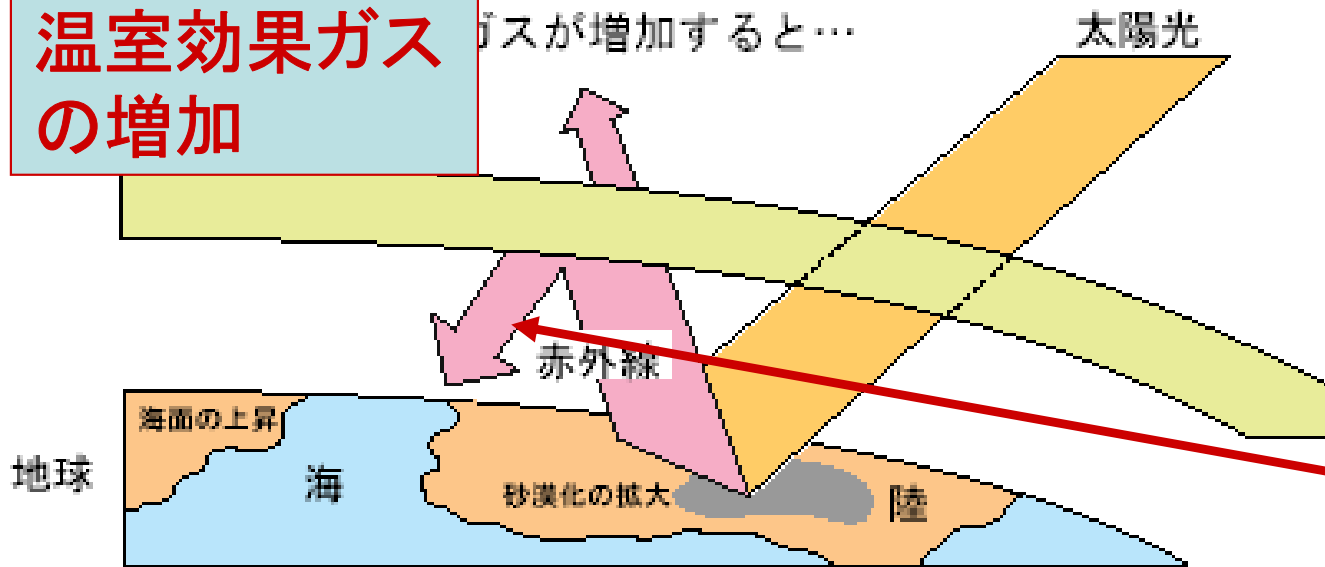
CO₂、H₂O、CH₄

温室効果ガス



温室効果がなければ
地球表面の気温は
- 20°C !

温室効果ガス
の増加



CO₂などの温室効果
ガスの増加で地球表面
を暖める放射エネル
ギーが増加する。

温室効果ガスやエアロゾルが放射エネルギー変化を通して、 大気を暖める(冷やす)割合

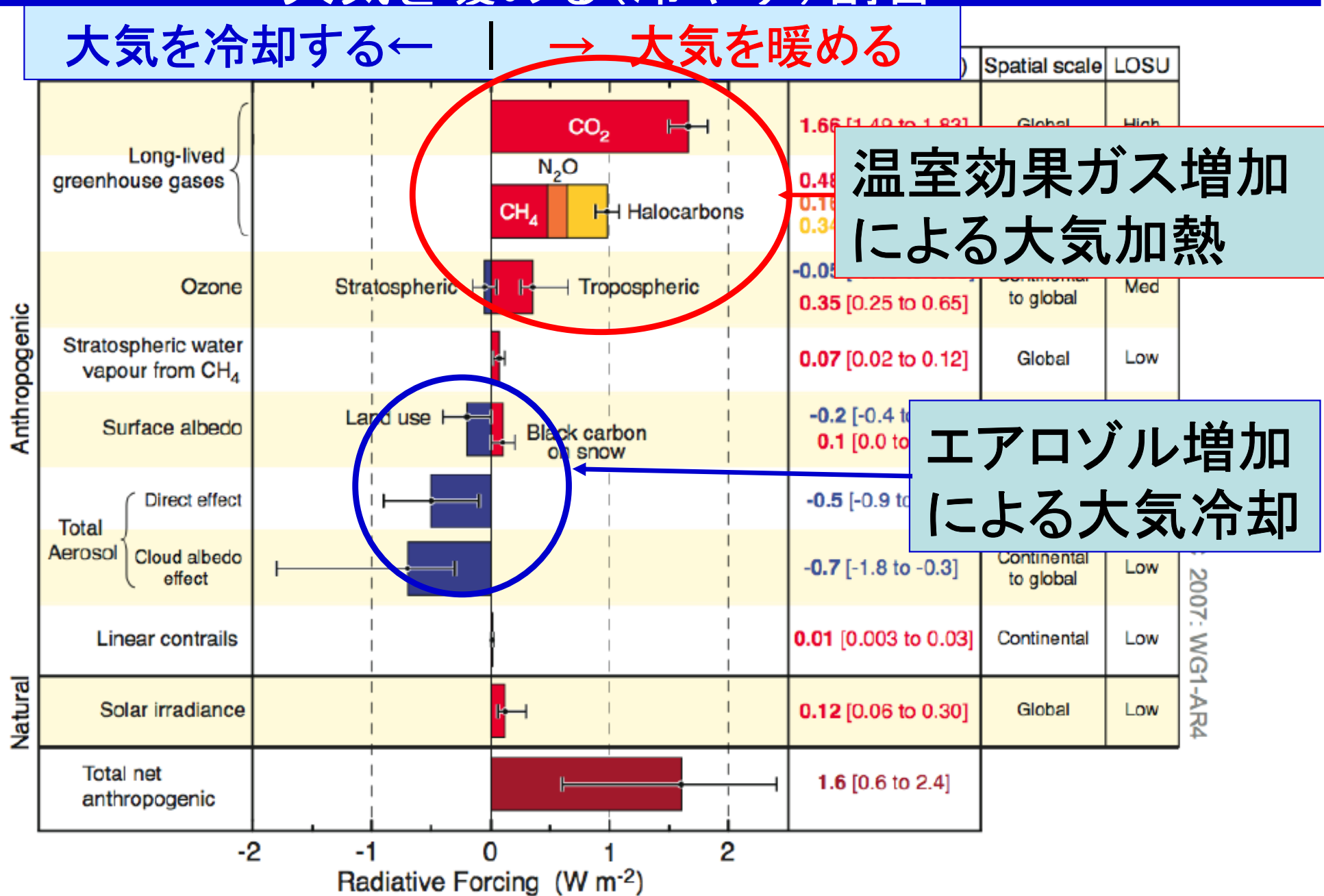
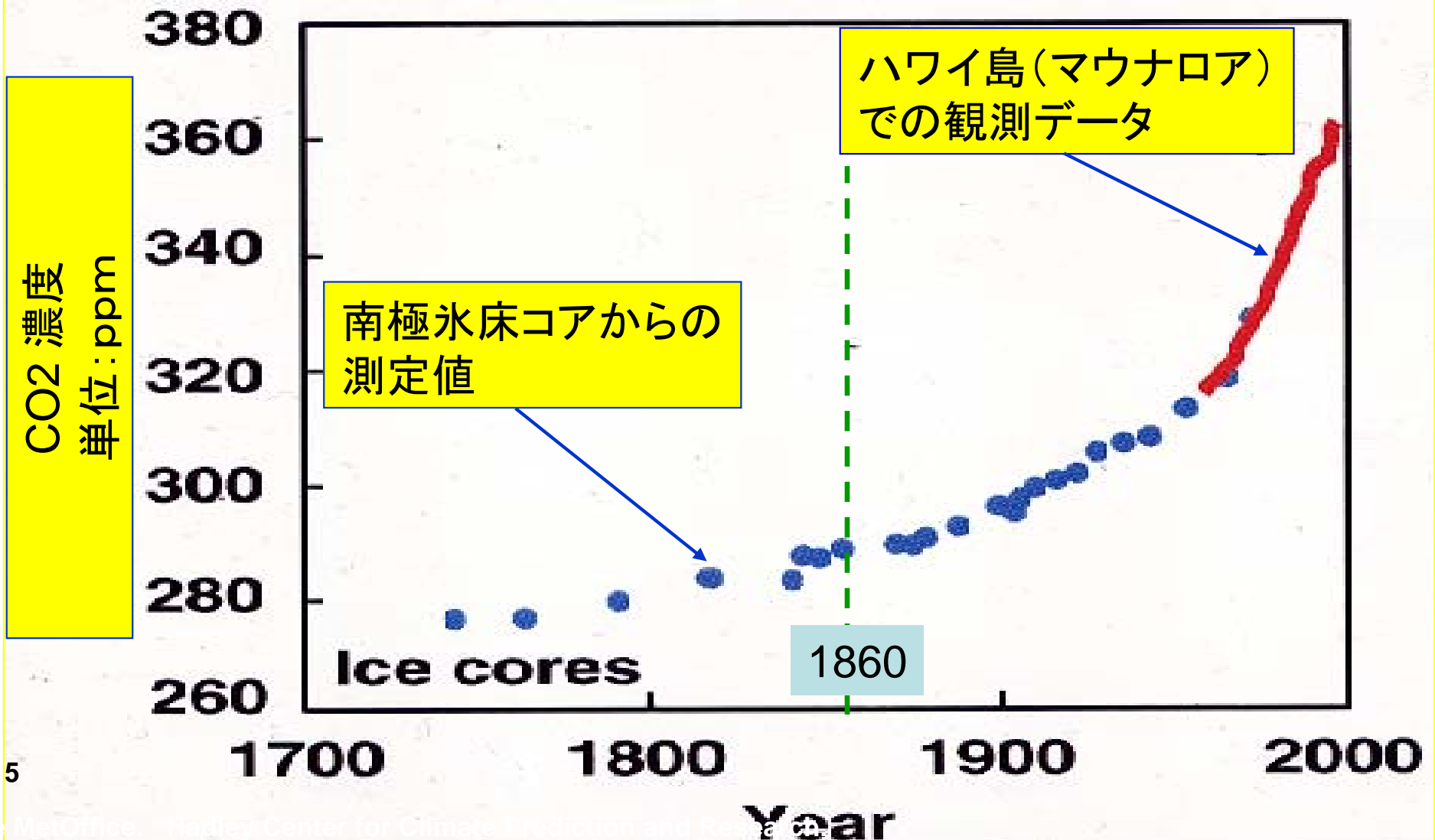


FIGURE SPM-2. Global-average radiative forcing (RF) estimates and ranges in 2005 for anthropogenic carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O) and other important agents and mechanisms, together with the typical

大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度

19世紀の産業革命頃から急激に増加し続けている
(280ppm → 370ppm: 33%の増加)

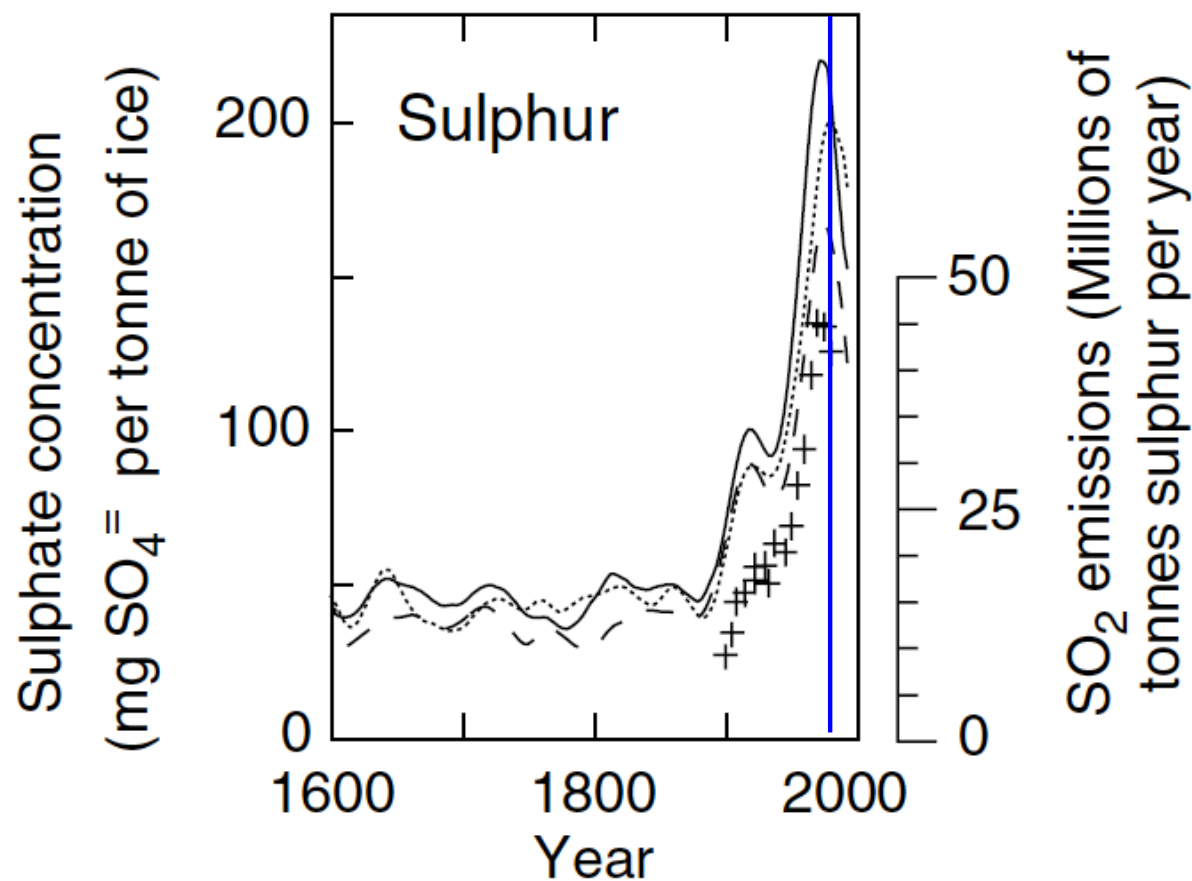


BW 5

MetOffice, Hadley Center for Climate Prediction and Research

単位の話: ppm=100万分の1 1ppm = 0.0001%

硫酸エアロゾル(sulphate)は人間活動による亜硫酸ガスSO₂の放出により、1900年頃から急増している。1970年代がピーク

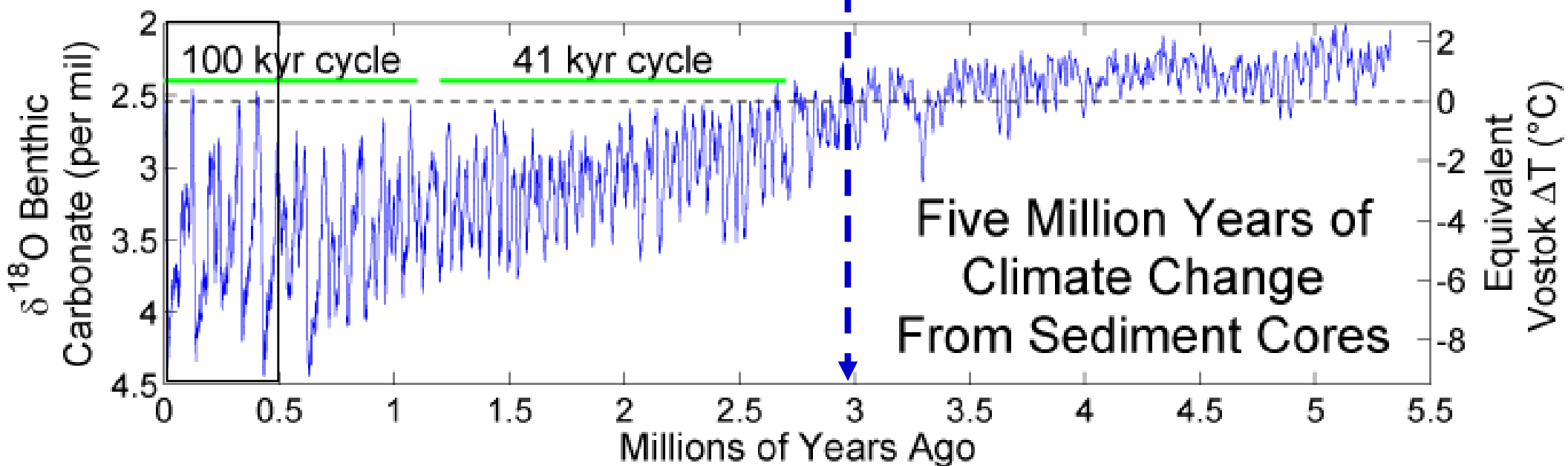


1970年代の寒冷化は増加したエアロゾルによる日傘効果が効いている？

of the concentrations of sulphate, not in the atmosphere but in ice cores in Greenland (shown by lines; from which the episodic effects of volcanic eruptions have been removed). Such data indicate the local deposition of sulphate aerosols at the site, reflecting sulphur dioxide (SO₂) emissions at mid-latitudes in the Northern Hemisphere. This record, albeit more regional than that of the globally-mixed greenhouse gases, demonstrates the large growth in anthropogenic SO₂ emissions during the Industrial Era. The pluses denote the relevant regional estimated SO₂ emissions (right-hand scale).

氷河時代*は約300万年前に始まり、現在も続いている。(4~10万年周期の気候変化を繰り返している)

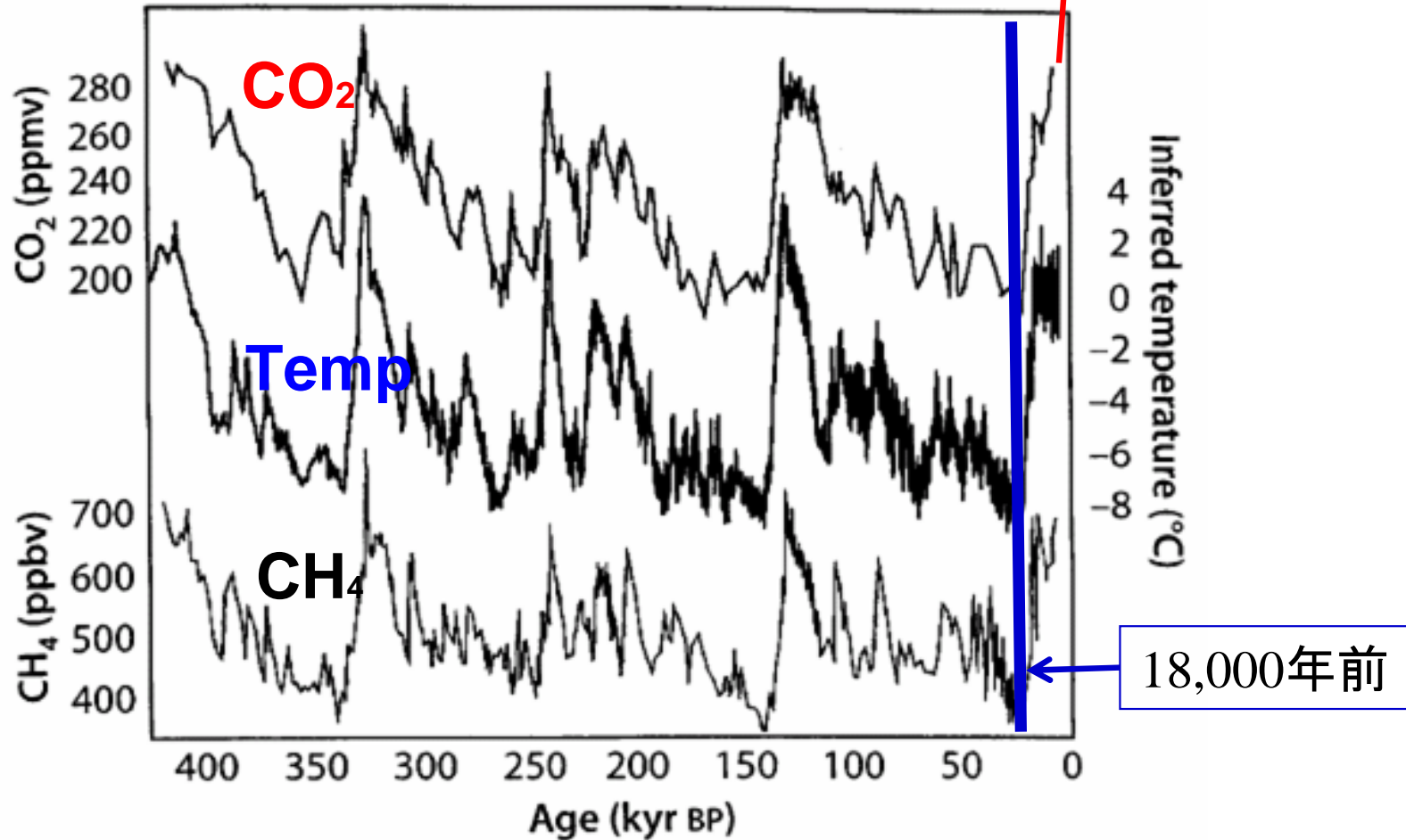
* 地球上に氷河・氷床が存在する時代



この氷河時代に人類は出現し、人類活動は拡大してきた。

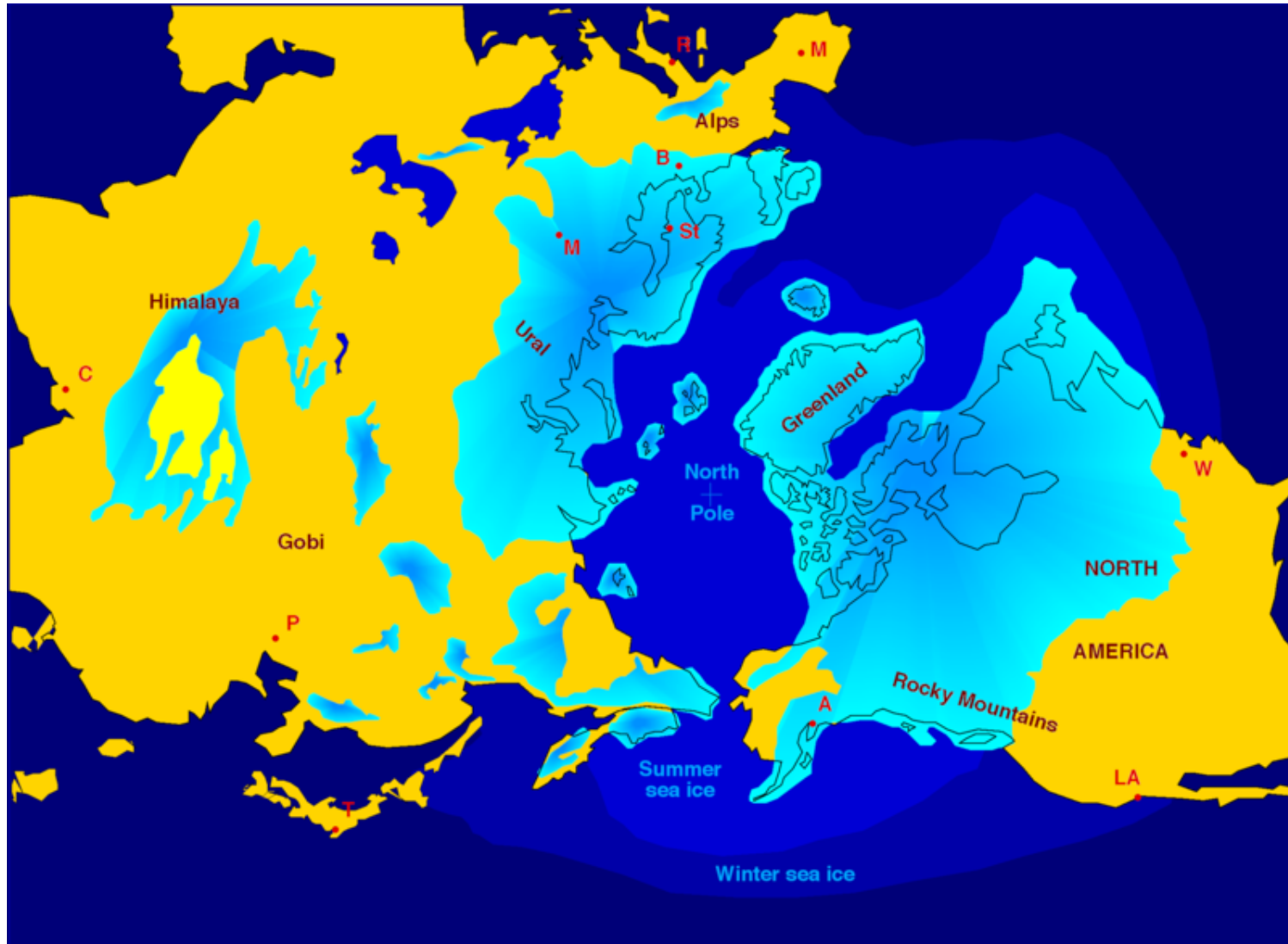
南極氷床コア(ボストーク基地)から得られた 過去40万年のCO₂, CH₄, T(気温)変動

380ppm (present)



氷河時代は、気温や氷床だけでなく、温室効果ガスも
約10-12万年周期で氷期-間氷期サイクルが、
数サイクル繰り返している

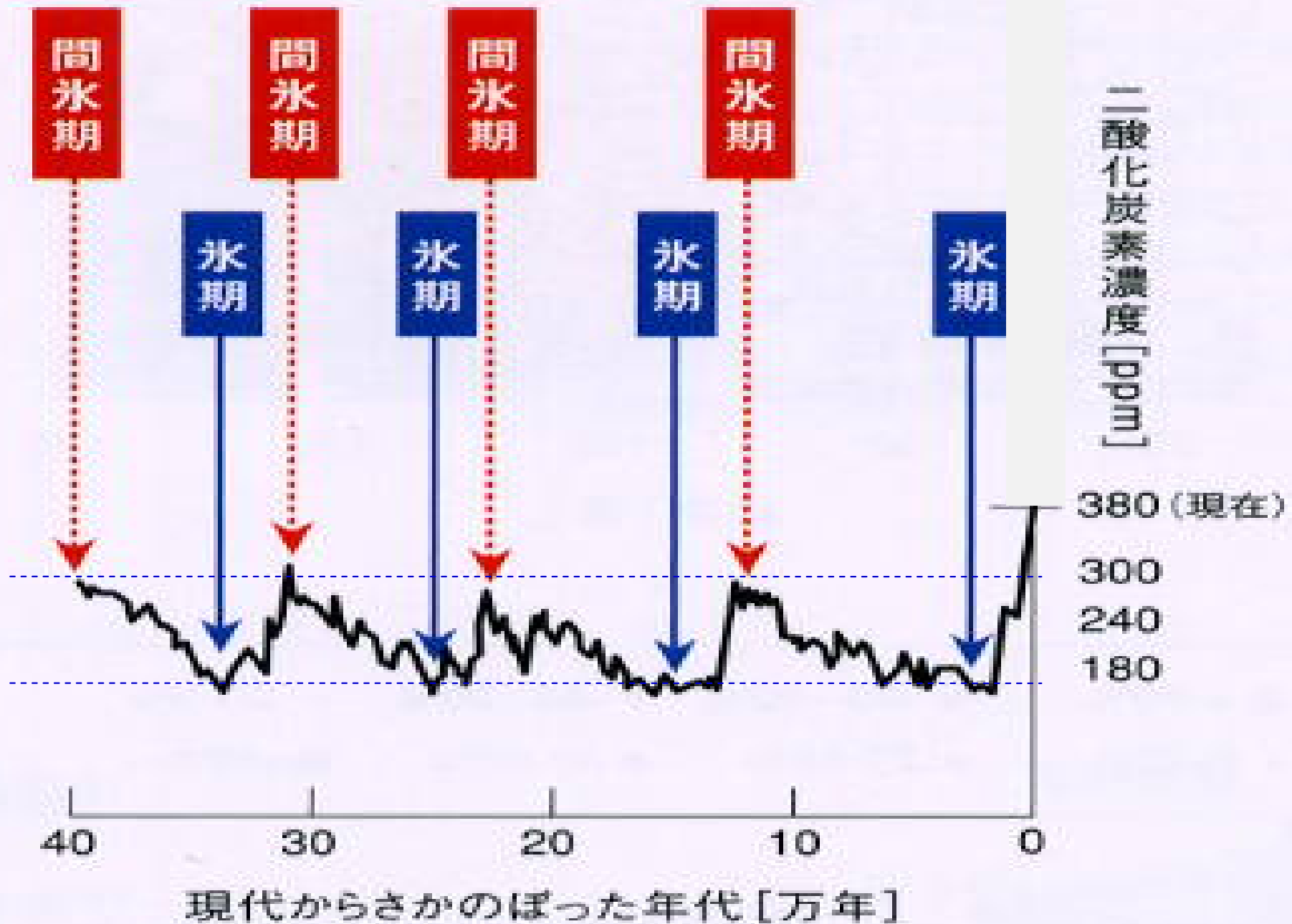
最終氷期 (約1万8千年前)における 北半球の氷床分布



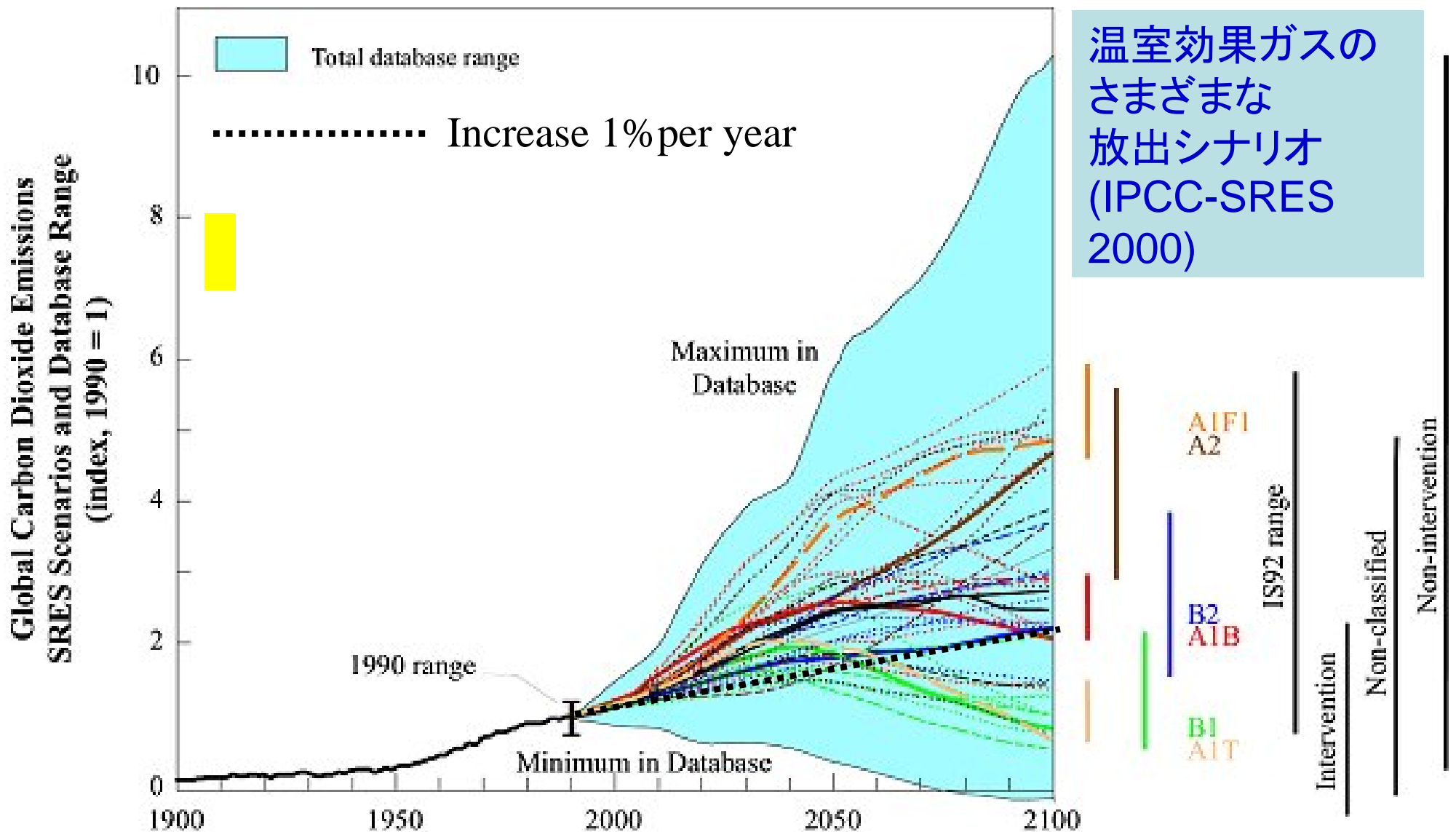
http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Northern_icesheet_hg.png

CO₂濃度は過去100万年間、氷期・間氷期サイクルに伴って(180~280ppmの幅で)規則的に変動してきたが、

.....



2100年には、CO₂濃度は現在の2~4倍 (700~1400ppm)となる!?



さまざまなCO₂放出のシナリオで気温の変化予測も大きく異なる。(2~4°C上昇の予測がもっともらしい?)

MULTI-MODEL AVERAGES AND ASSESSED RANGES FOR SURFACE WARMING

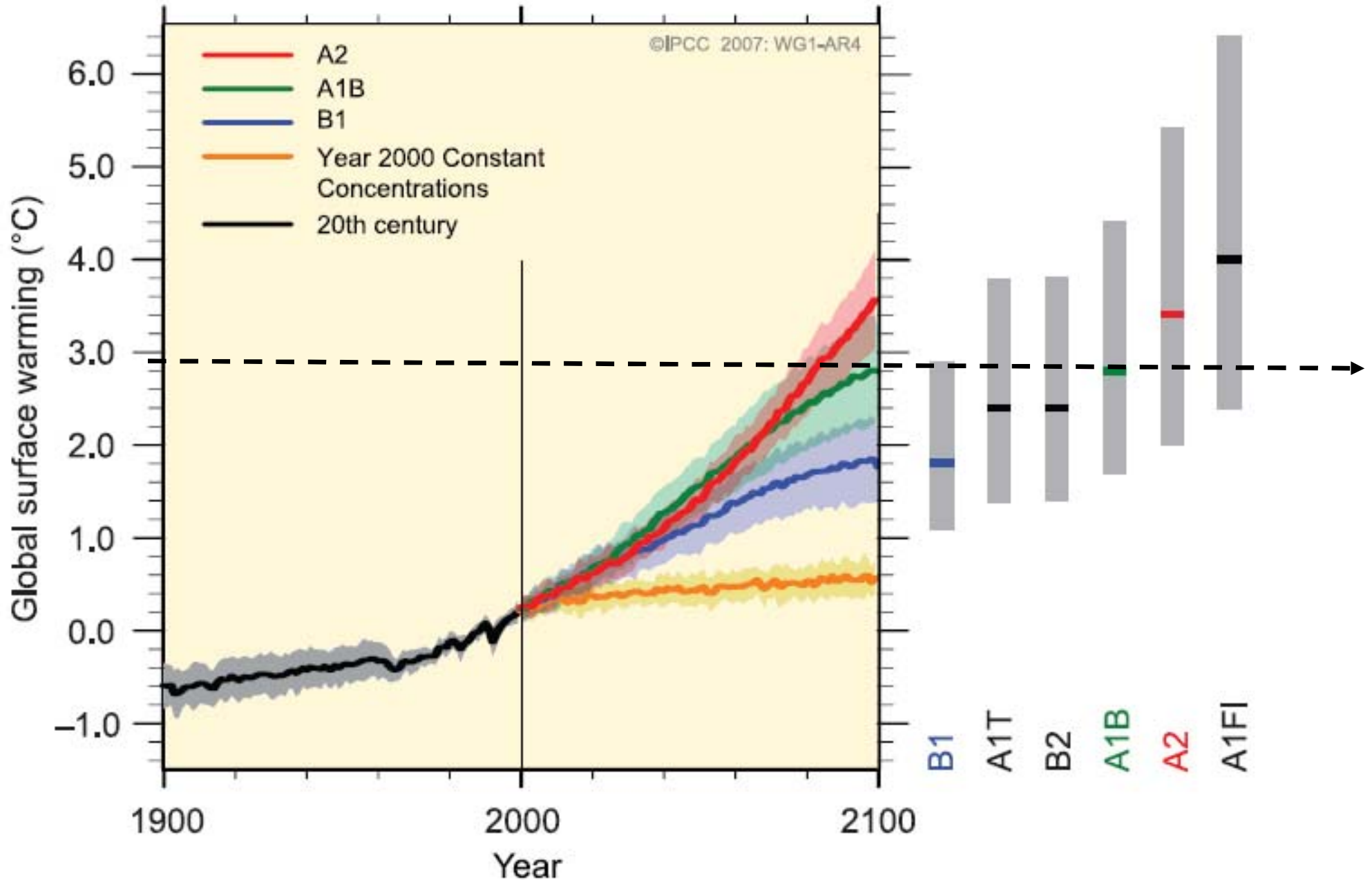
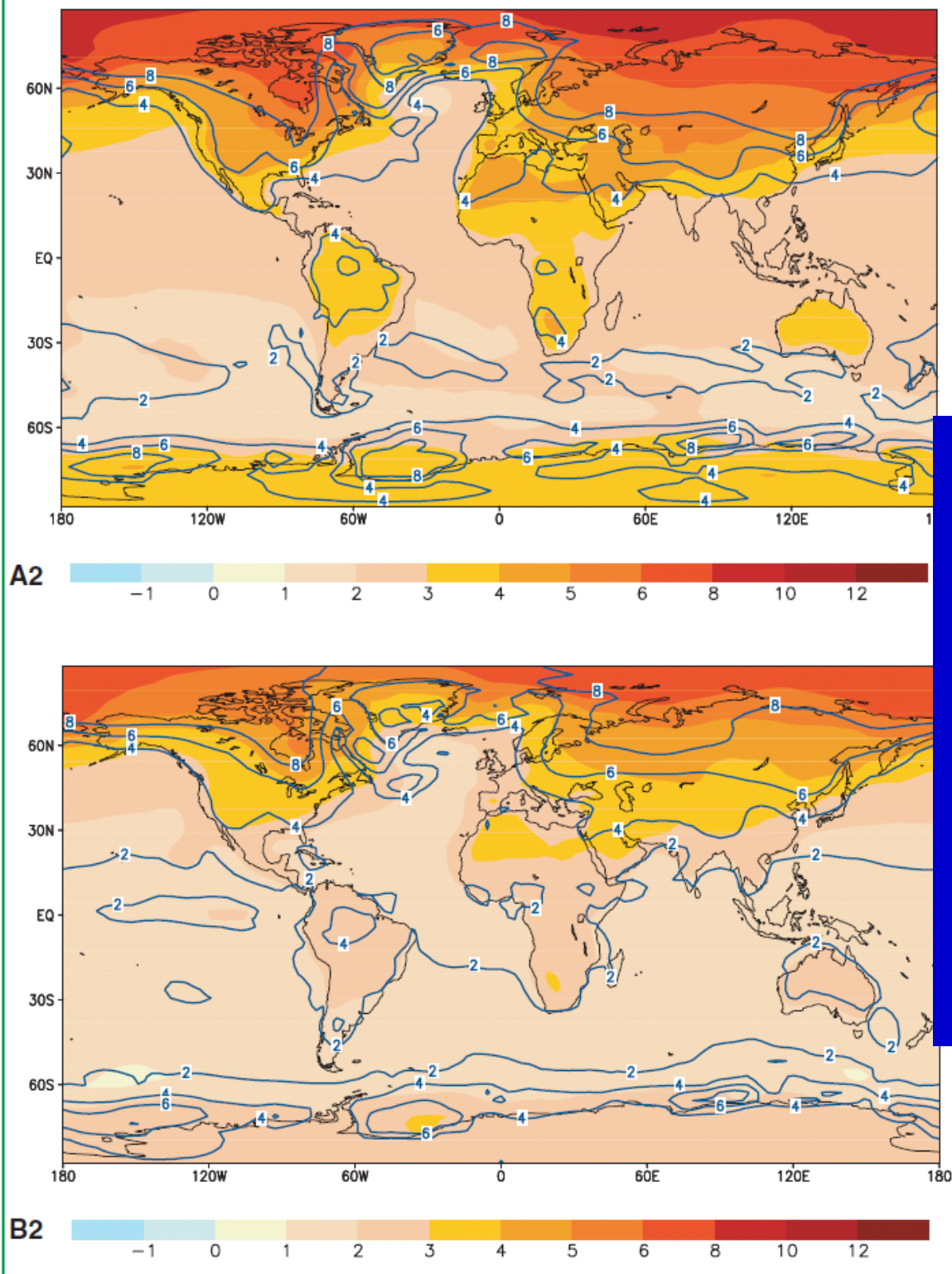


Figure 20: The annual mean change of the temperature (colour shading) and its range (isolines) (Unit: °C) for the SRES scenario A2 (upper panel) and the SRES scenario B2 (lower panel). Both SRES scenarios show the period 2071 to 2100 relative to the period 1961 to 1990 and were performed by OAGCMs. [Based on Figures 9.10d and 9.10e]

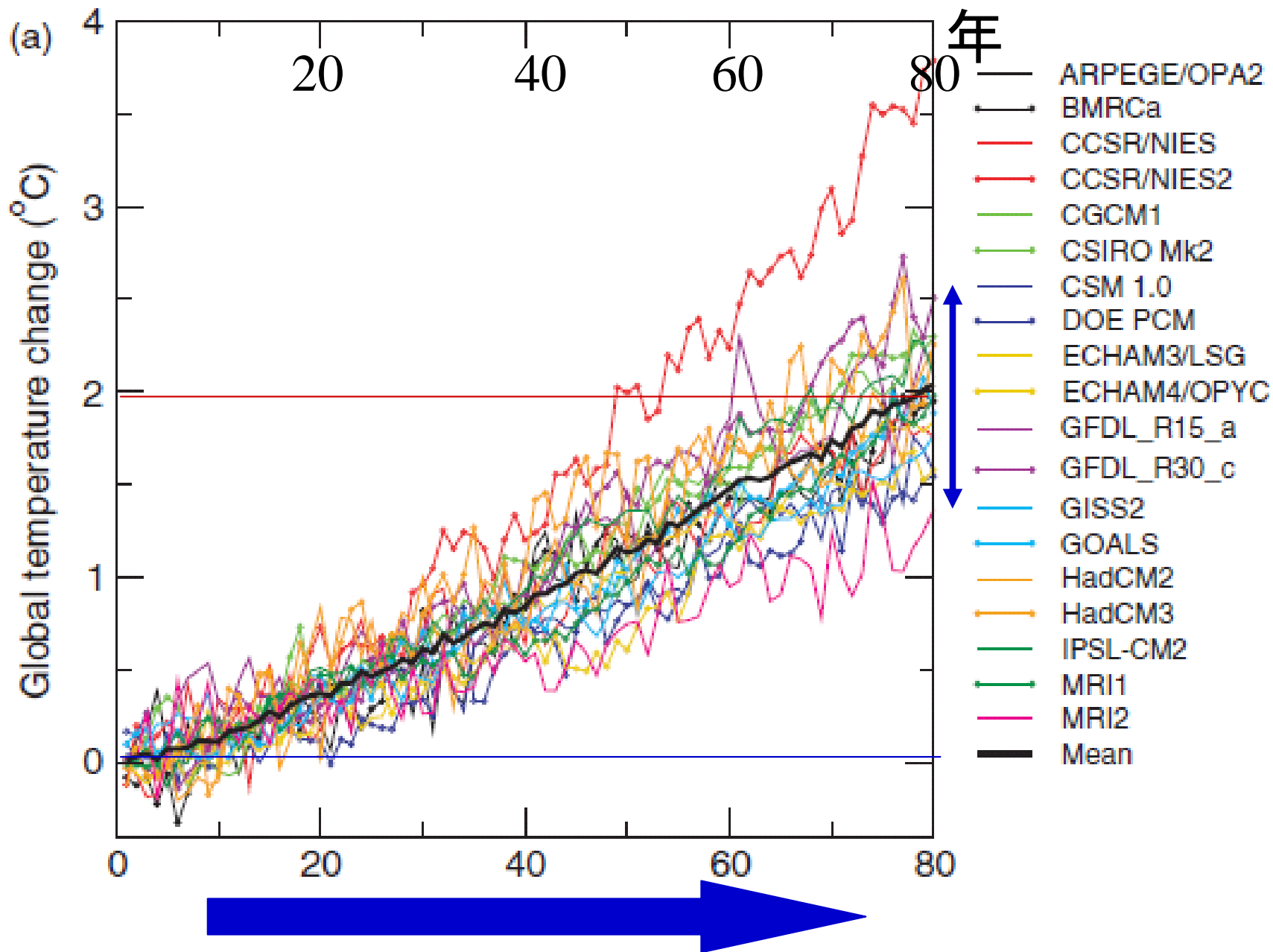


2100年頃の気温変化量

北半球高緯度・極域を中心に
温暖化が進行

(上) CO₂ 現在の4-6倍
(下) CO₂ 現在の3倍

CO₂増加(1%/年)により、どの最新(最良の)気候モデルも、 全球気温の上昇(平均1.5~2.5°C/100年)を予測

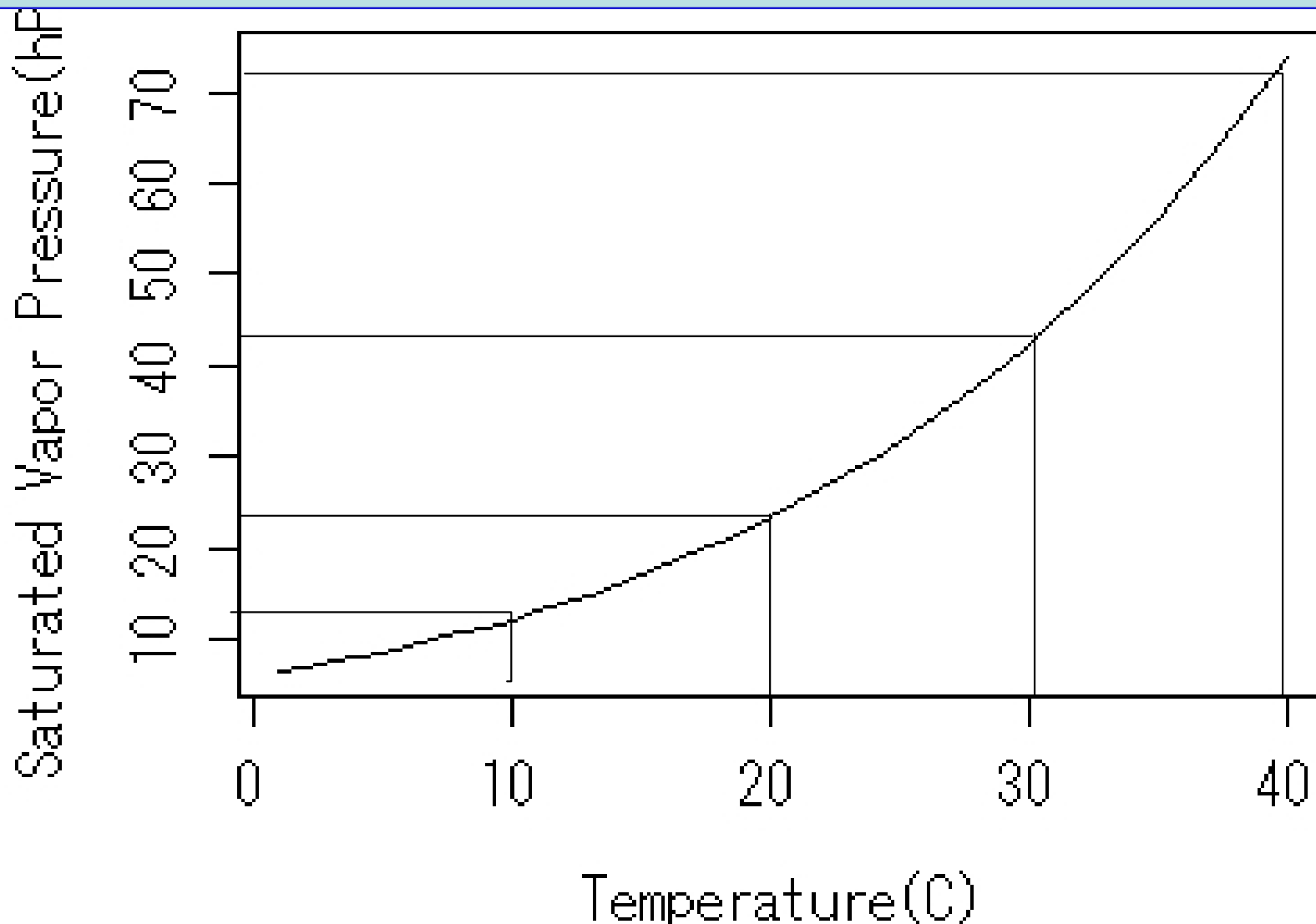


それでは

温室効果ガスの増加⇒気温上昇
に伴い、降水量はどう変化するのだろうか

飽和水蒸気圧曲線

大気に含まうる水蒸気量は、気温上昇とともに指数関数的に増加する
⇒温室効果ガスの増加により地表面付近の気温が上がると、水蒸気量も
多くなる傾向となる。



潜在（または対流）不安定

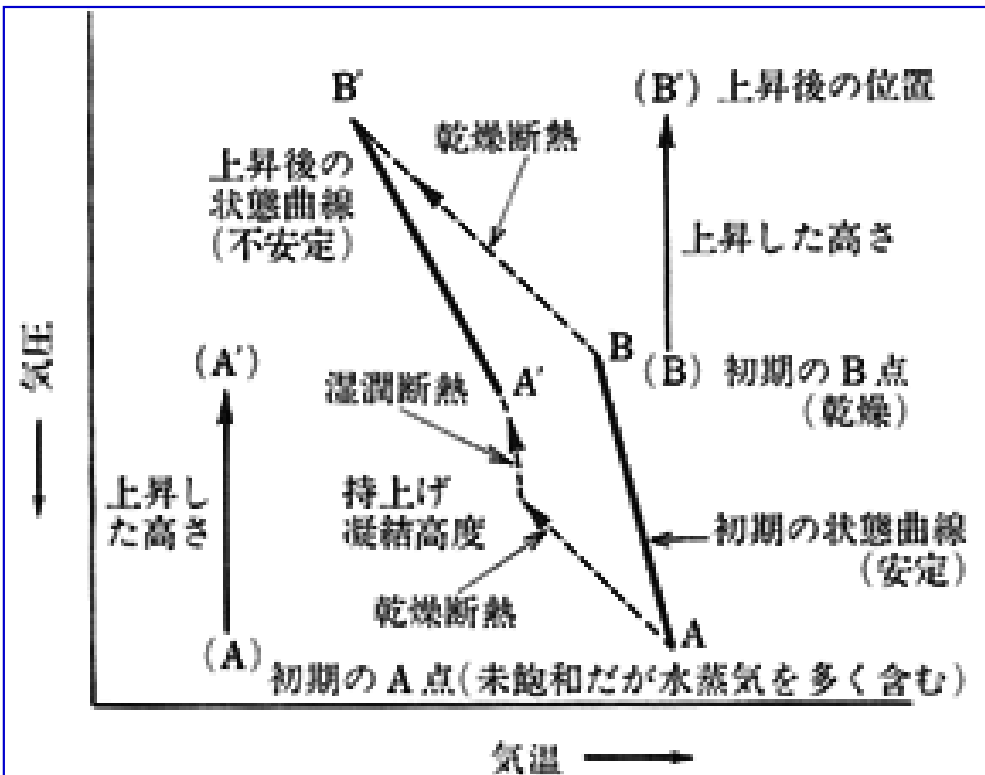


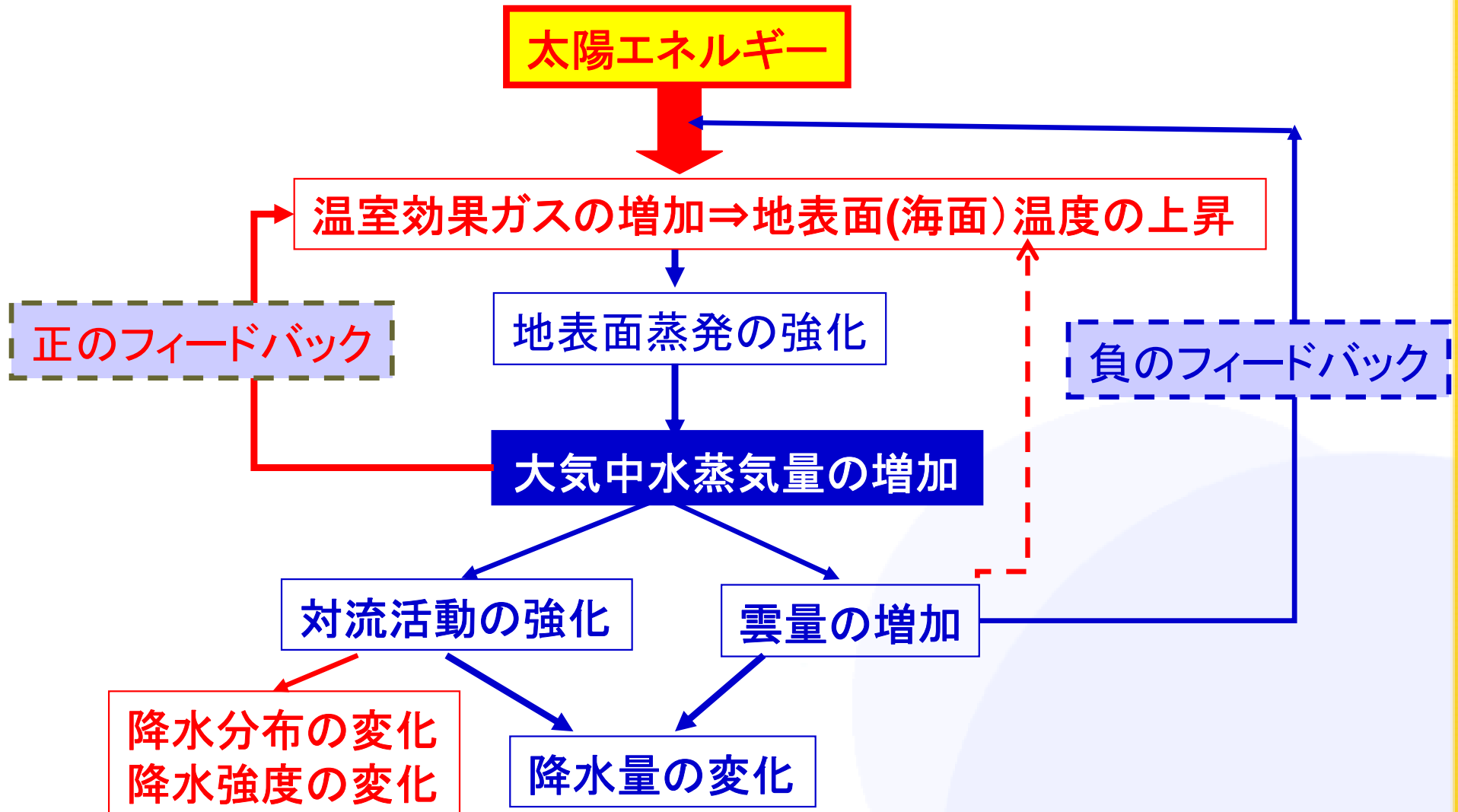
図 1 潜在不安定の説明

(Barry, R. G. and Chorley, R.J.: Atmosphere, Weather and Climate, Methuen, 1987)



大気の下層（地表面に近い）が湿って、上層が乾燥していると大気は不安定になり、積乱雲系の雲が発達しやすくなる

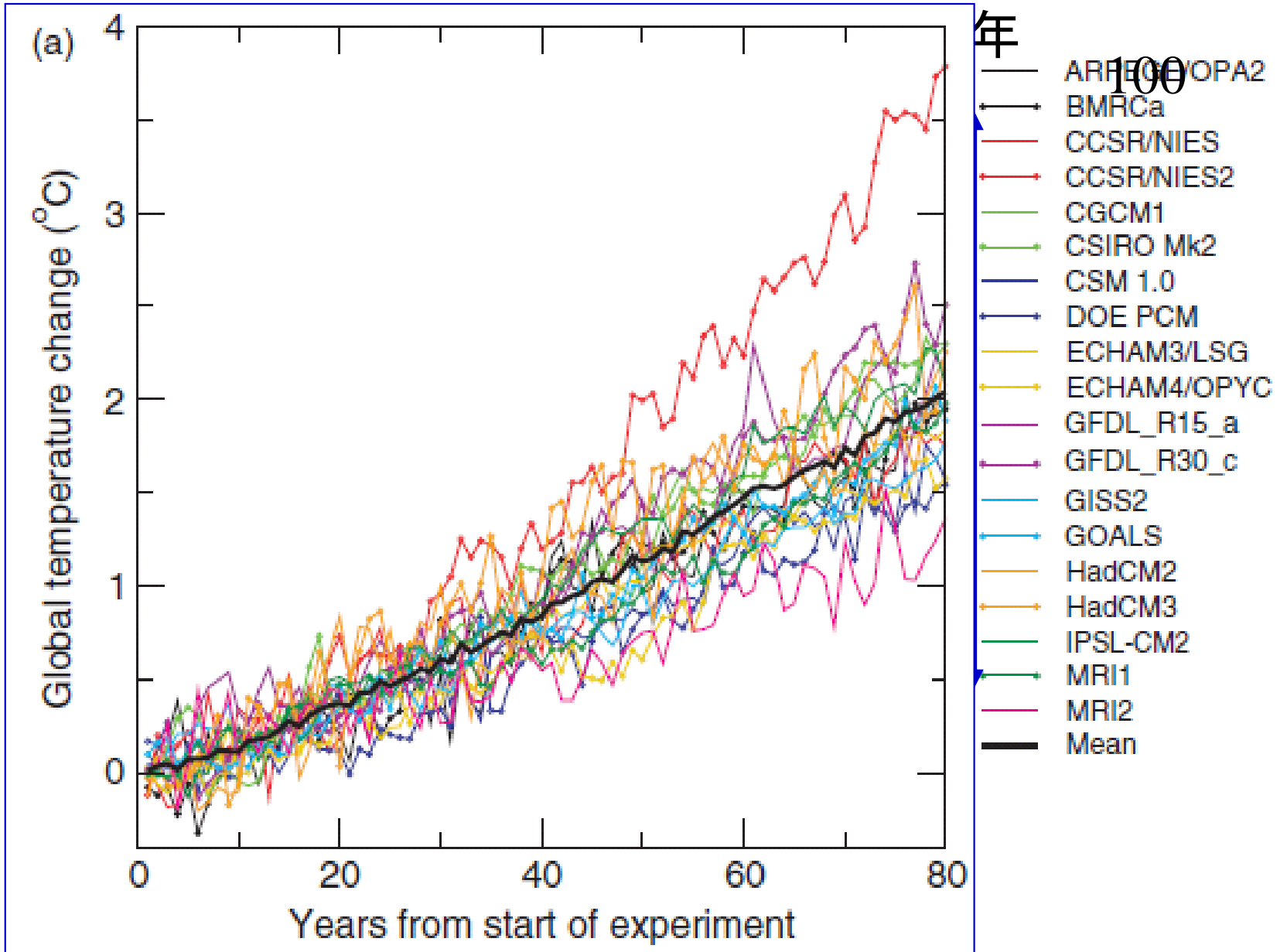
「地球温暖化」が地球の水循環と気候に与える影響のフローチャート



水蒸気はもっとも強力な温室効果ガスである！



CO₂増加(1%/年)により、どの最新(最良の)気候モデルも、
全球降水量の増加(平均2~3%/100年)を予測
しかし、モデルごとのばらつきは非常に大きい！(0~6%)



温室効果ガス増加(A1B)による降水量変化 (2090/99 – 1980/99) (IPCC, 2007)

PROJECTED PATTERNS OF PRECIPITATION CHANGES

冬季(12-1月)

夏季(6-8月)

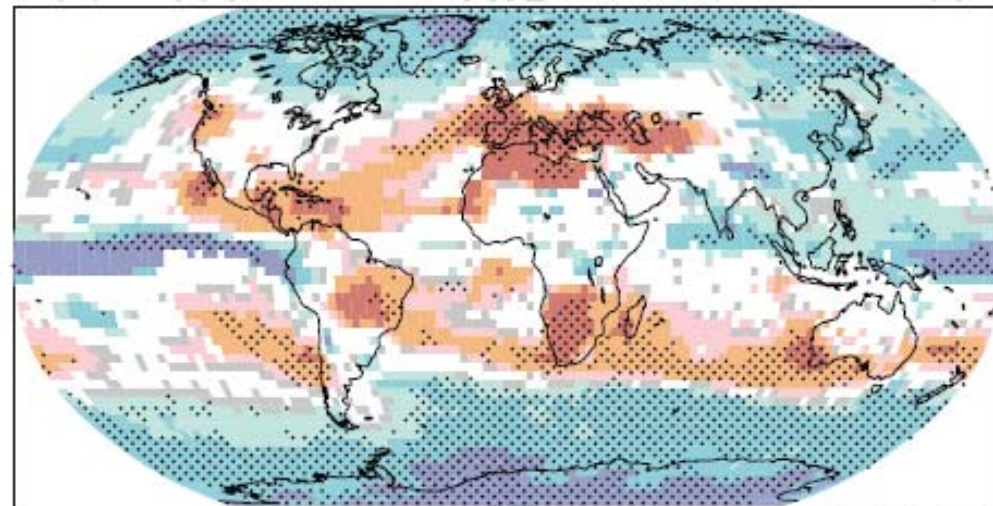
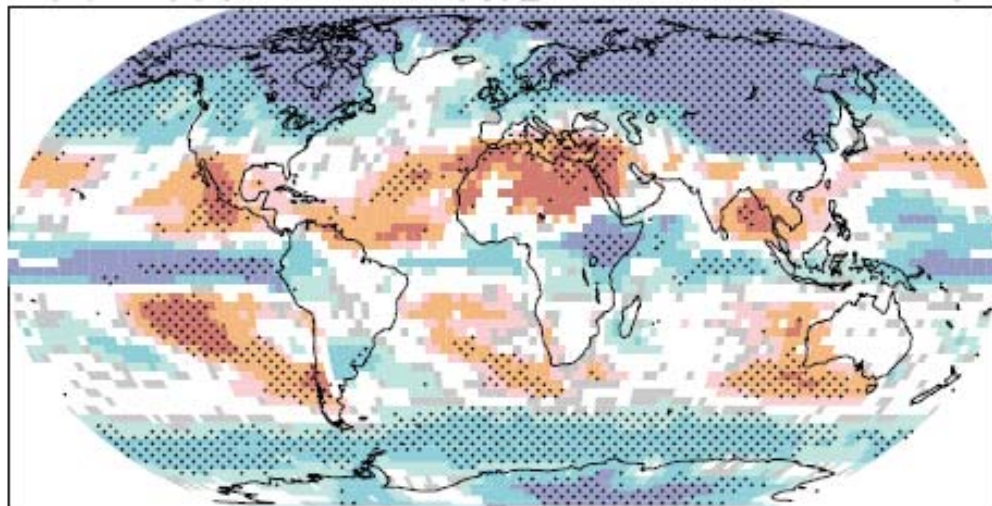
multi-model

A1B

DJF multi-model

A1B

JJA



©IPCC 2007: WG1-AR4

- ・熱帯・亜熱帯を中心に、湿潤な地域はさらに降水が増え、乾燥地域はさらに乾燥する？！
- ・高緯度は、全体に降水は増える？

Annual

DJF

JJA

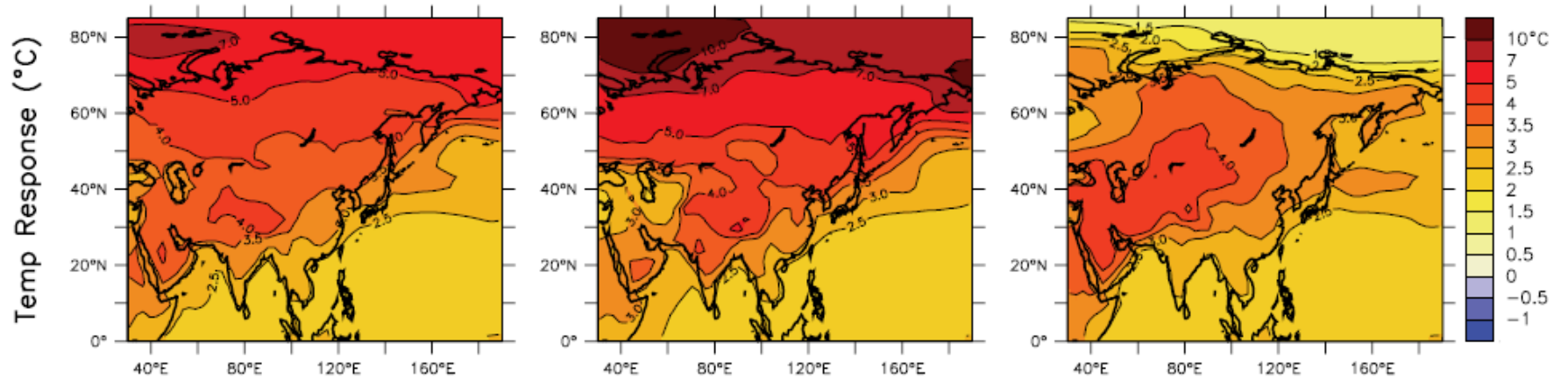
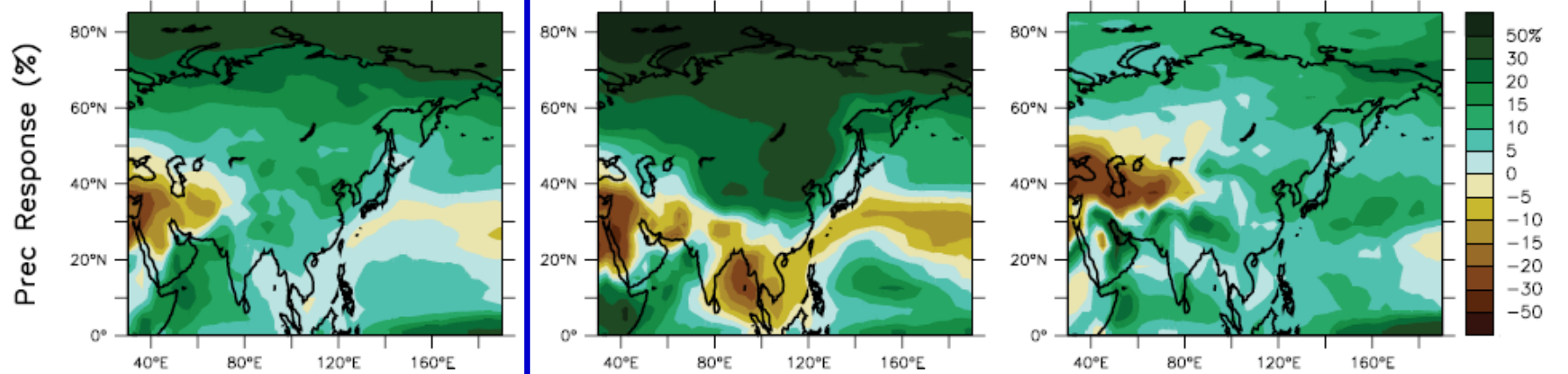
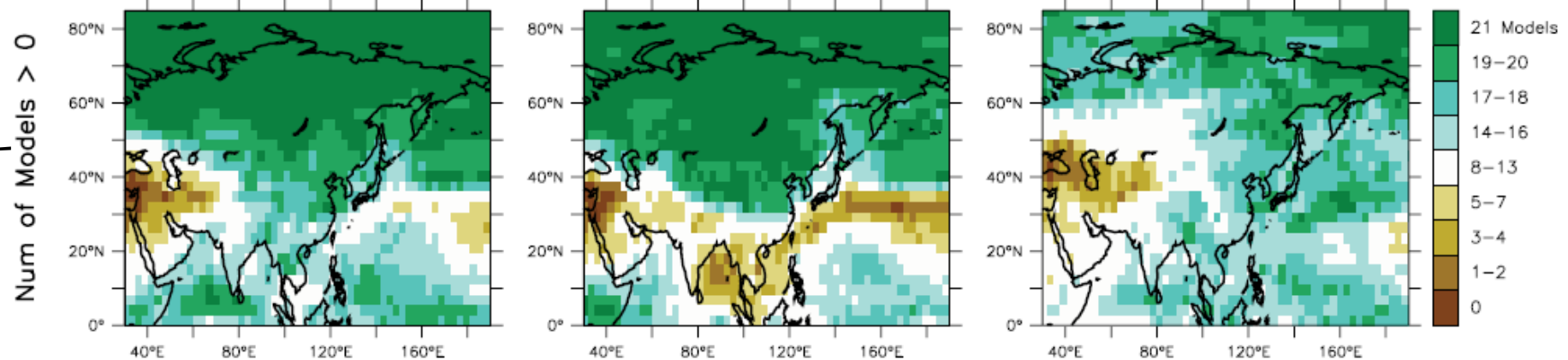
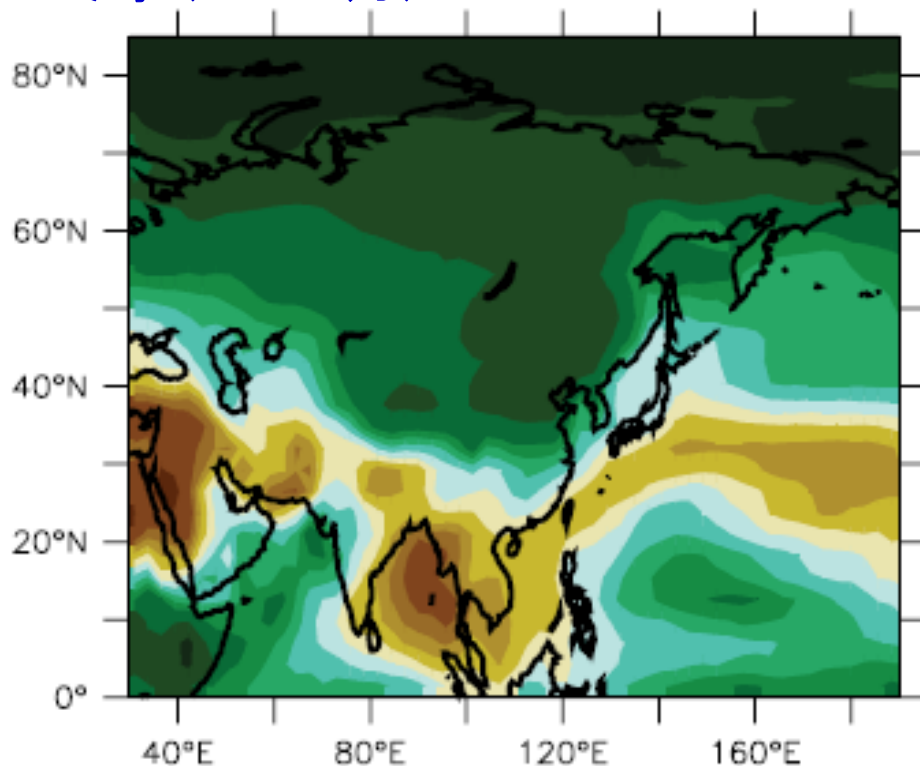
気温
変化降水量
変化降水量
増加を示す
モデル数

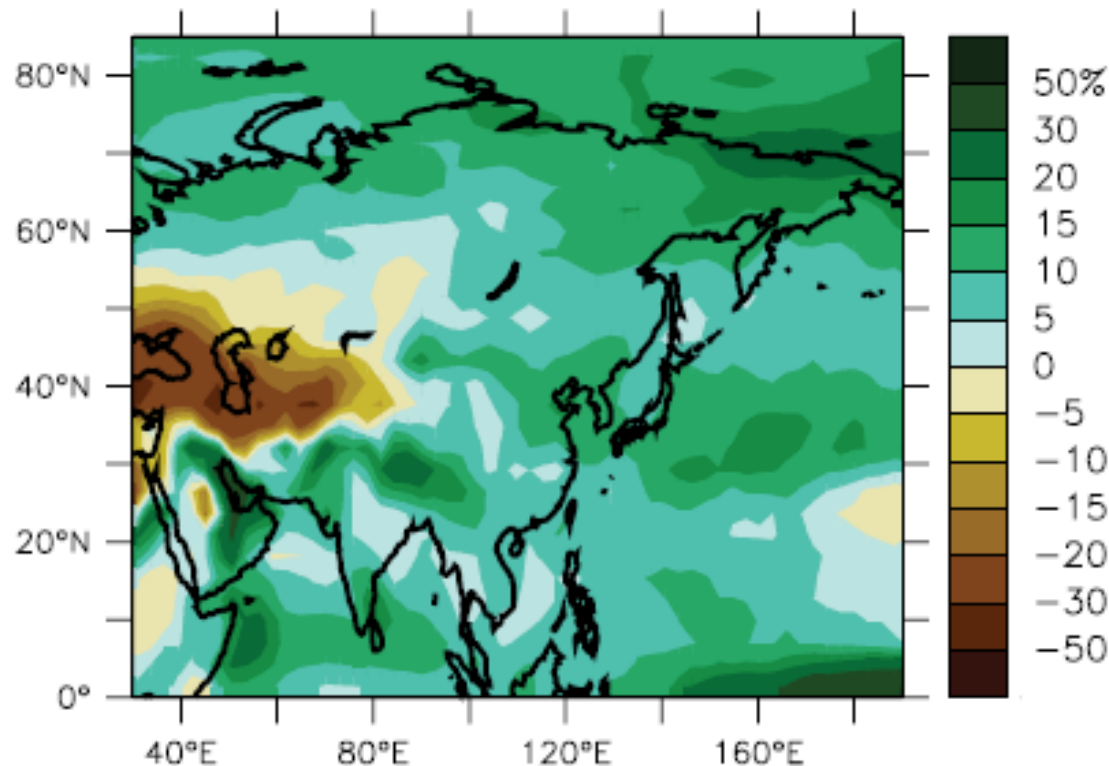
Figure 11.9. Temperature and precipitation changes over Asia from the MMD-A1B simulations. Top row: Annual mean, DJF and JJA temperature change between 1980 to 1999 and 2080 to 2099, averaged over 21 models. Middle row: same as top, but for fractional change in precipitation. Bottom row: number of models out of 21 that project increases in precipitation.

A1Bシナリオにもとづく2100年前後の アジア地域の冬・夏の降水量変化予測 (IPCC2007)

冬季(12-2月)



夏季(6-8月)



気候モデルによるばらつき(不確定性)もまだ大きいので要注意

(すでに温室効果ガスが増加してきた)

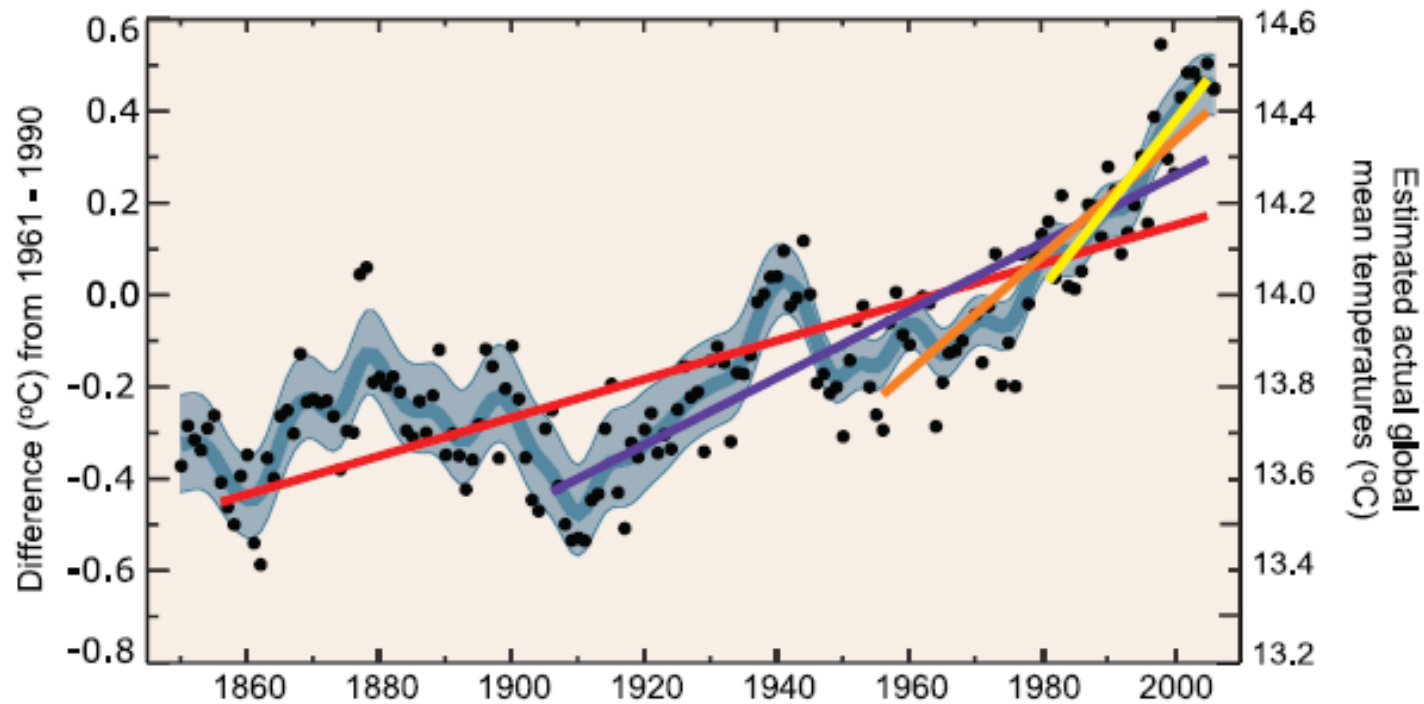
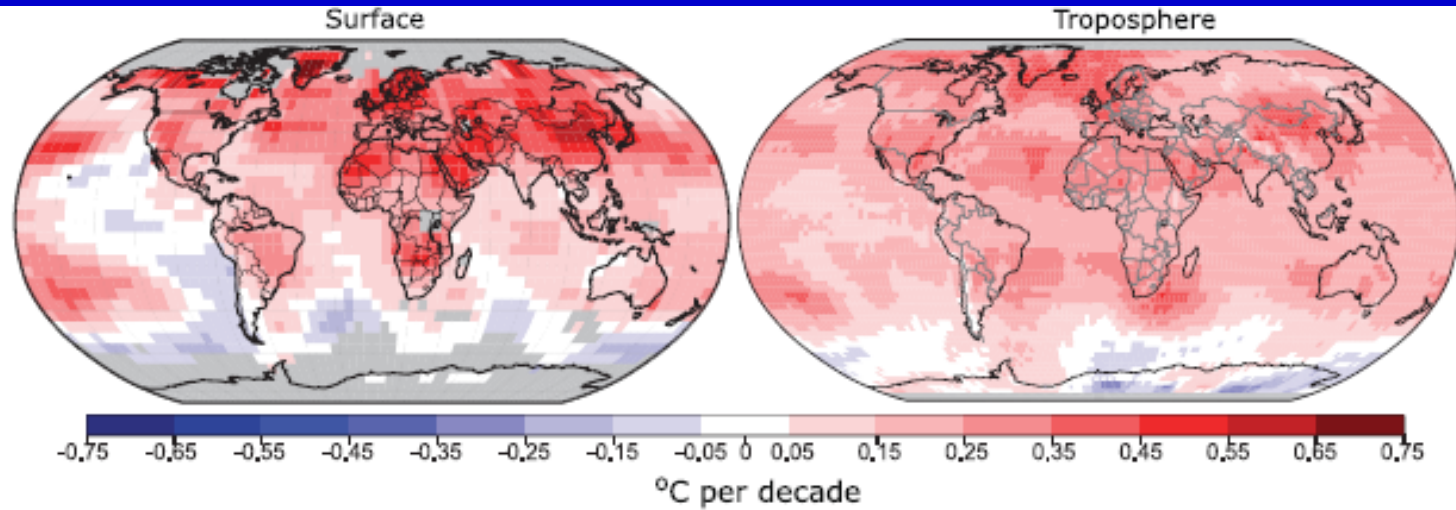
過去100年、地球とアジアの気候は

どう変化してきたか？

(気温は増加してきたか？)

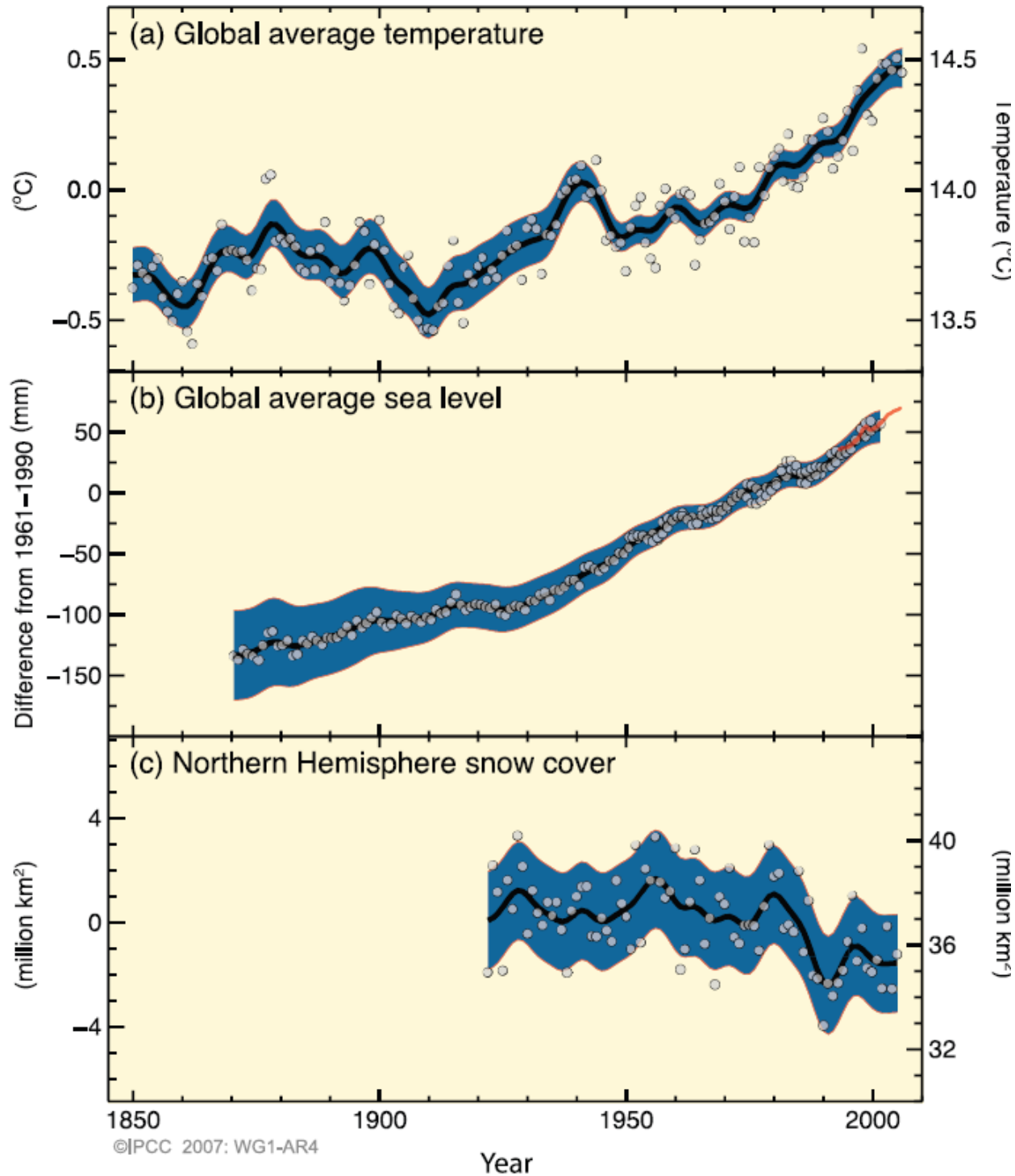
(降水量は増加してきたか？)

過去150年の全球的な気温変化 (IPCC 2007)



	Period Years	Rate °C per decade
● Annual mean	25	$0,177 \pm 0,052$
— Smoothed series	50	$0,128 \pm 0,026$
■ 5-95% decadal error bars	100	$0,074 \pm 0,018$
	150	$0,045 \pm 0,012$

CHANGES IN TEMPERATURE, SEA LEVEL AND NORTHERN HEMISPHERE SNOW COVER



過去150年
(1850-2005)における

(上) 全球平均気温

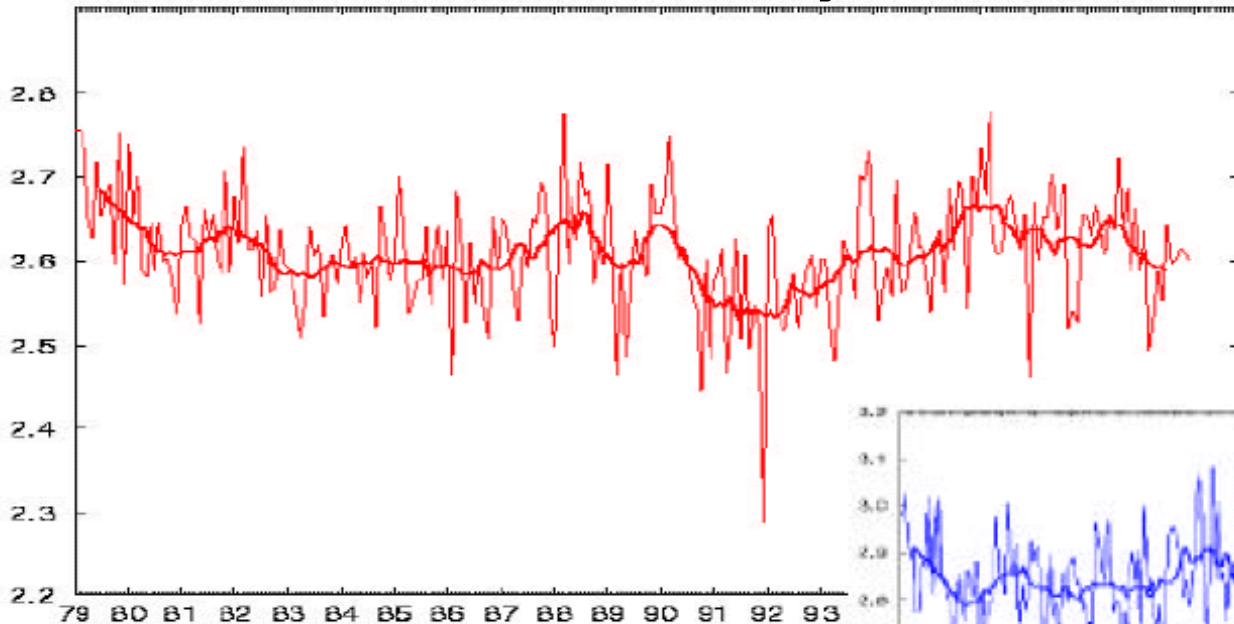
(中) 全球平均海水

(下) 北半球の
積雪面積変化

(IPCC, 2007)

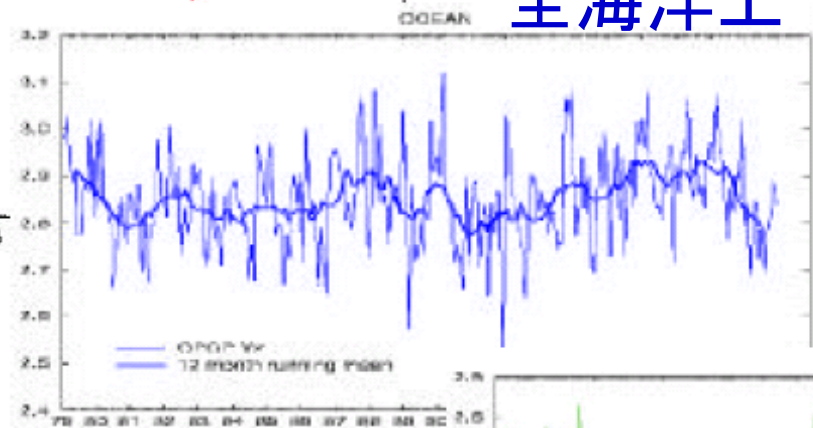
衛星+地上観測データにもとづく全球降水量変化 (過去約20年:1979-2000) (GPCP, 2000)

TOTAL 全球

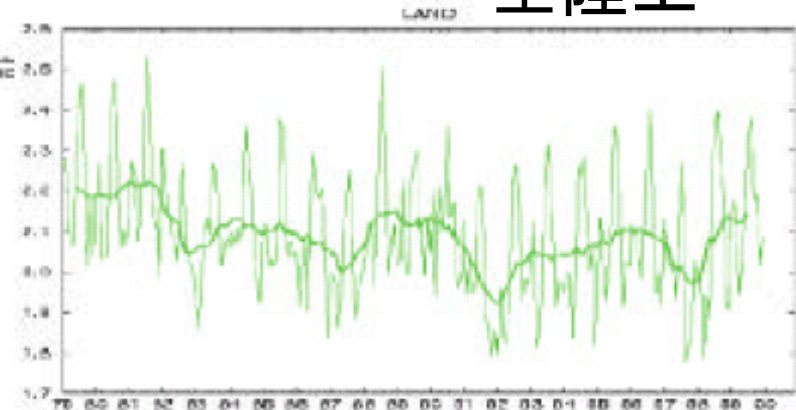


**GPCP RELEASES THREE
NEW PRECIPITATION
PRODUCTS**

全海洋上



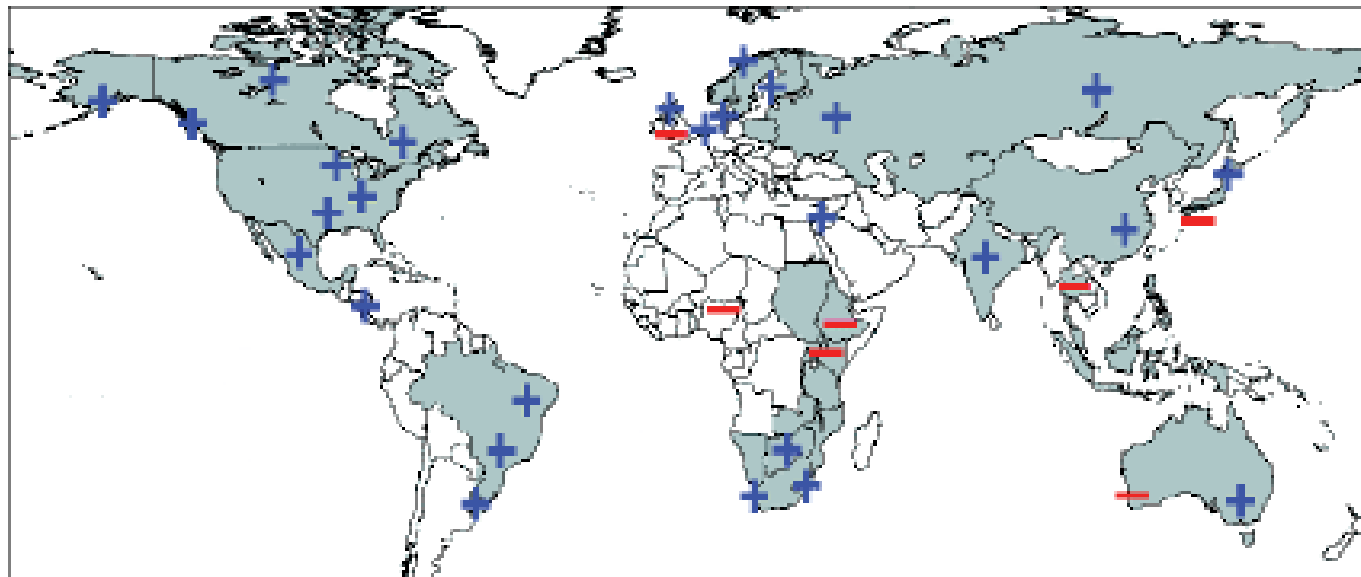
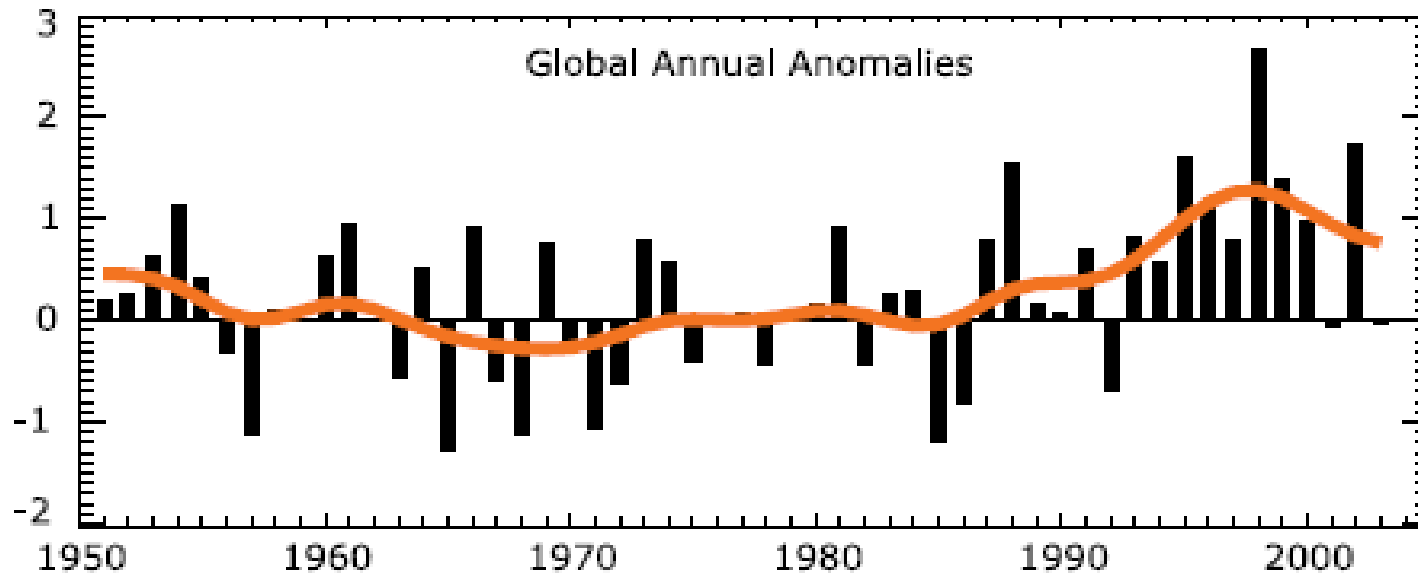
全陸上



Shown above is the new 20+ year GPCP monthly precipitation for 1979 to present. See examples on the back for the corresponding 5-day data set, along with an example of the new 1x1 degree daily product available for the last 3 years. Figures provided by NASA/GSFC. See <http://orbit-net.nesdis.noaa.gov/grad/gpcp>.

顕著な増加・減少傾向は見られない

全大陸におけるHeavy rain(豪雨)が、総降水量に占める割合(%)の変化(1950-2005) (IPCC 2007)

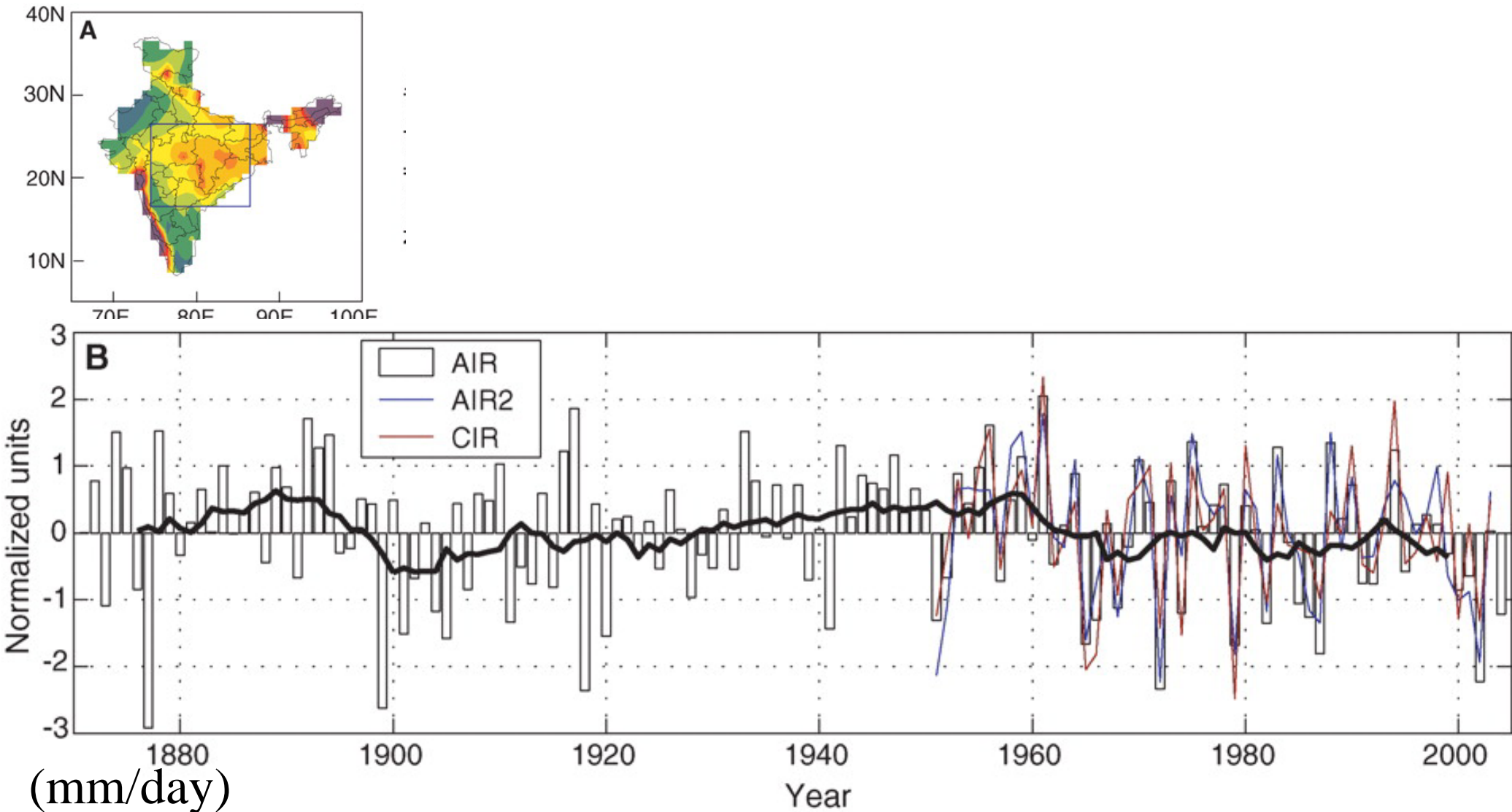


22.5% (with respect to 1950-1979) from the base (see Appendix 3.A). From 1980 to 2005, there was a 22.5% increase in heavy and very heavy precipitation (+) or decrease (-) in heavy precipitation served. (from Groisman et al. 2005) vary by season and region, with more than changes in heavy precipitation served.

近年のアジア地域の降水は どう変化してきたか？

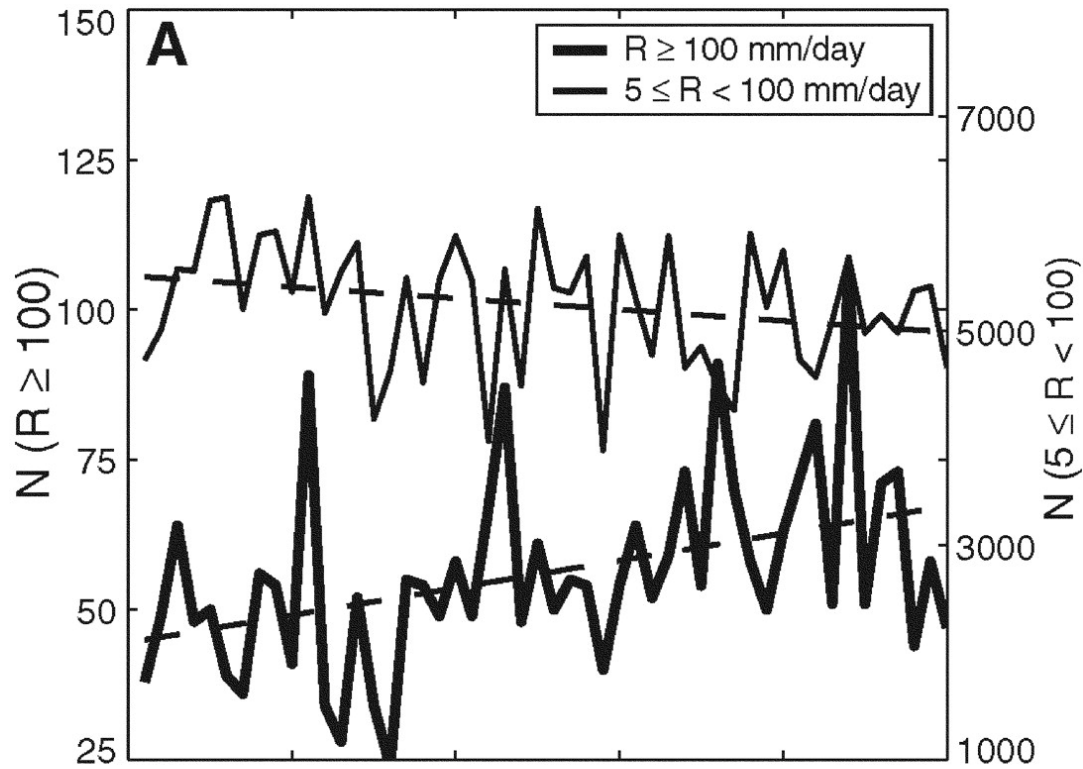
<1900年代後半以降、特に80年代以降、すでに
人間活動の影響が現れている可能性は高い>

インドモンスーン降水量の経年変動 (1871-2005)



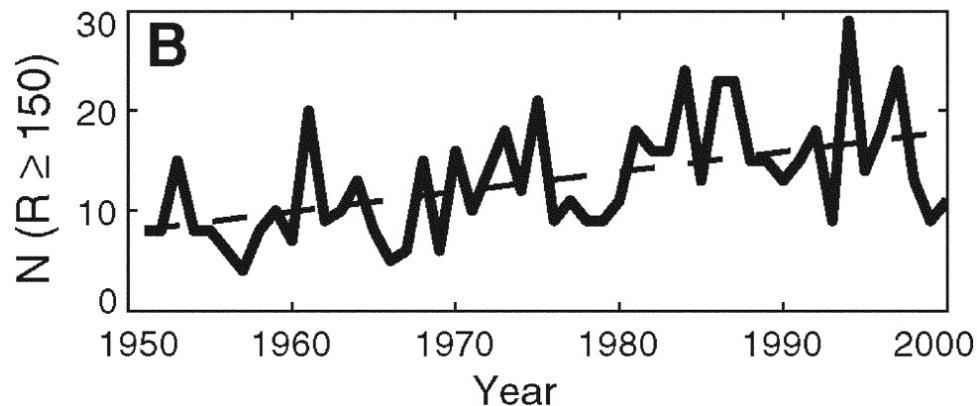
B. N. Goswami et al., Science 314, 1442 -1445 (2006)

インドモンスーンの雨(1951-2000)では、 並雨は減り、豪雨が増加しつつある



並雨 ($5 < R < 100$ mm/day)

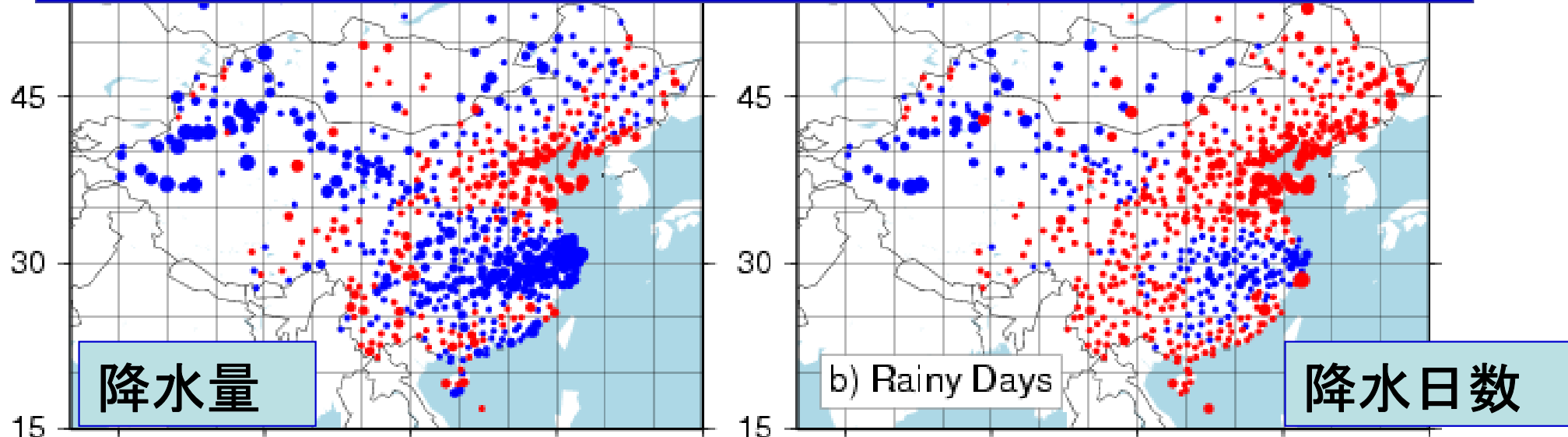
強雨 ($R > 100$ mm/day)



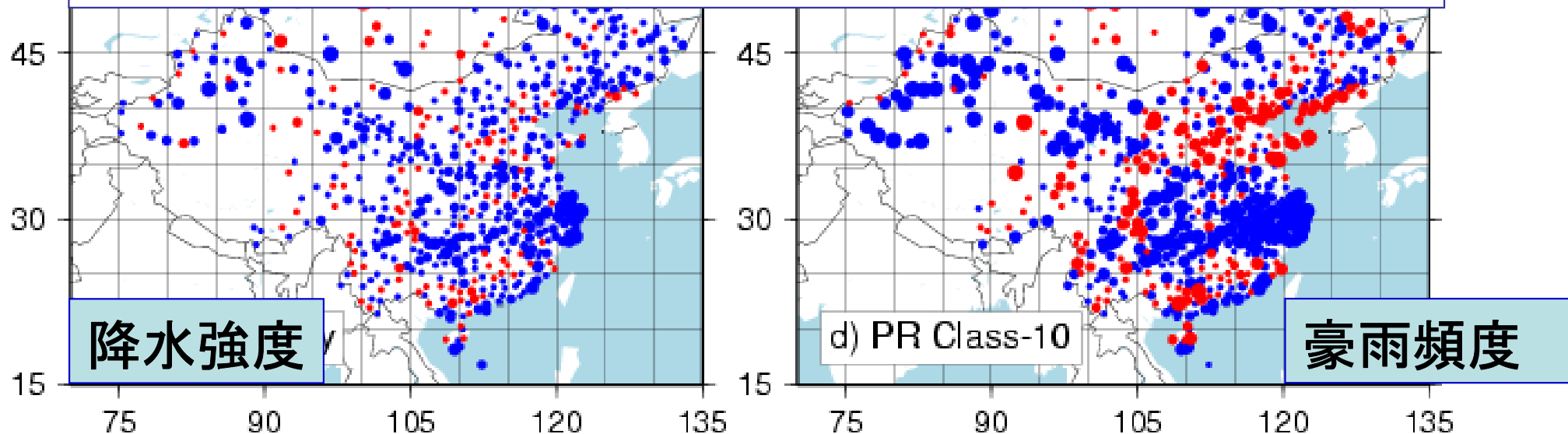
豪雨 ($R > 150$ mm/day)

過去40年(1960-2000)の東アジアの夏季降水の変化

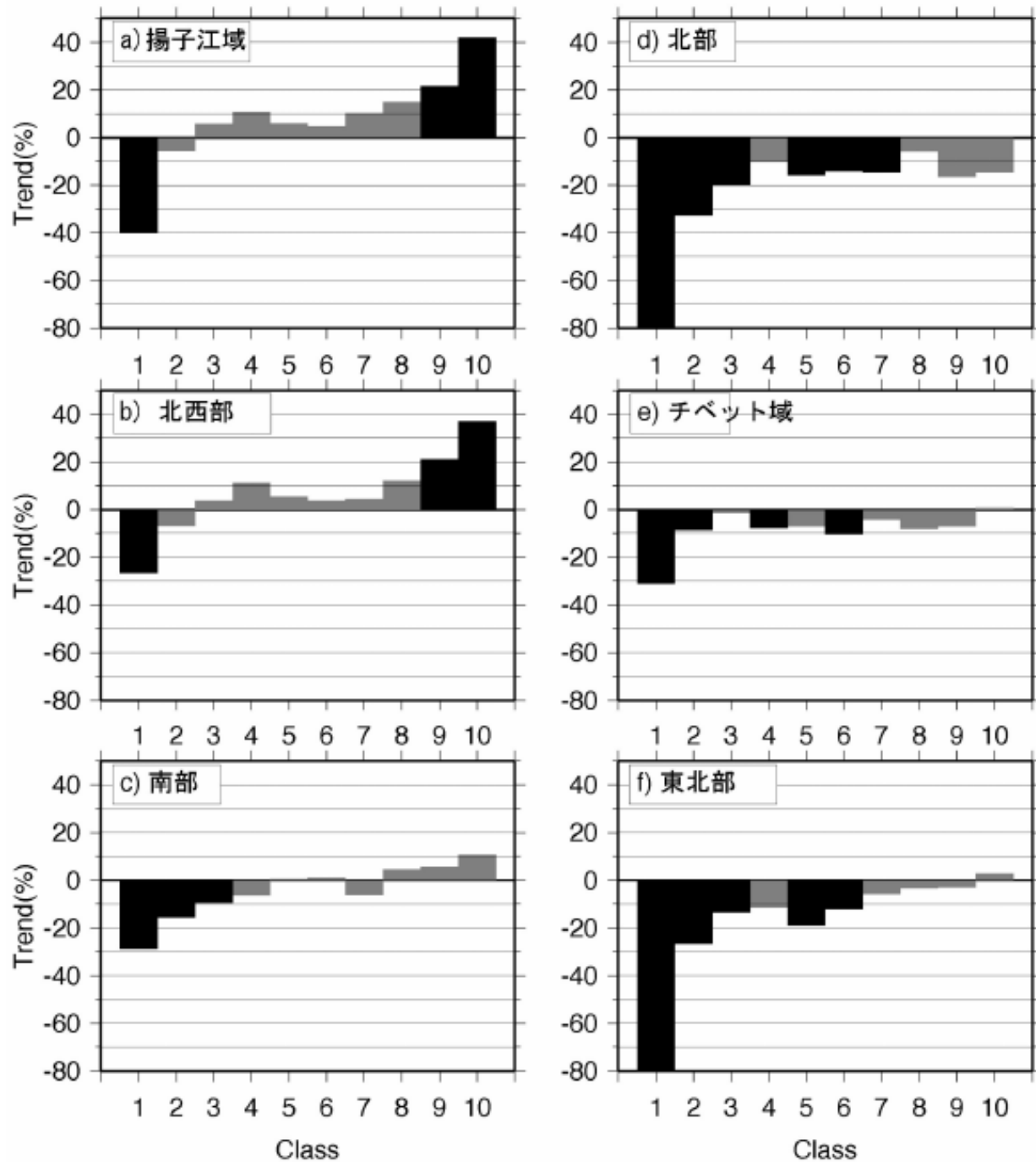
(Endo, Yasunari and Ailikun, 2005 JMSJ)



- 長江流域: 降水量・豪雨増加、黄河流域: 乾燥化 が進行
- 降水量だけではなく、強い降水の頻度の増加している



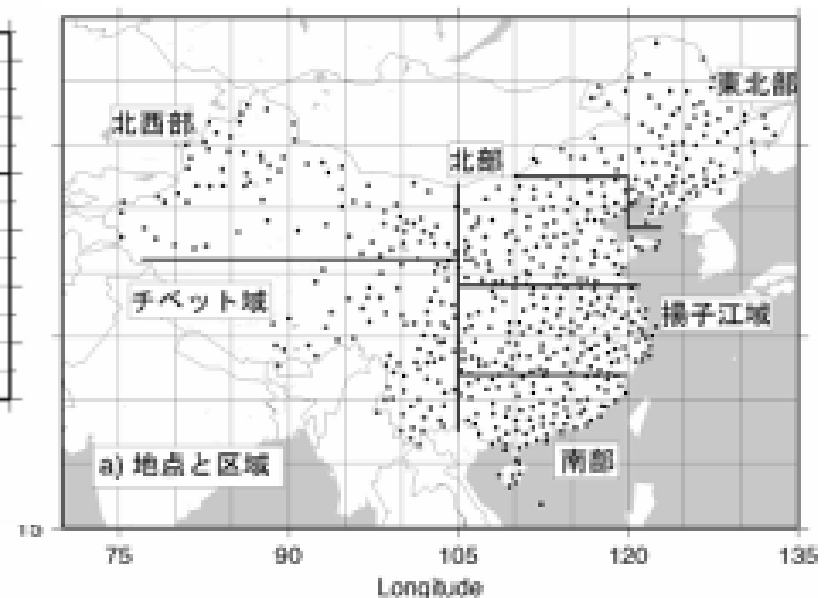
● <-60% ● -60--40% ● -40--20% ● -20-0% ● 0-20% ● 20-40% ● 40-60% ● >60%



1961～2000年における中国の区域ごとの降水強度別の変化傾向(%/40年)

弱い雨が極端に減少
強い雨は増加傾向

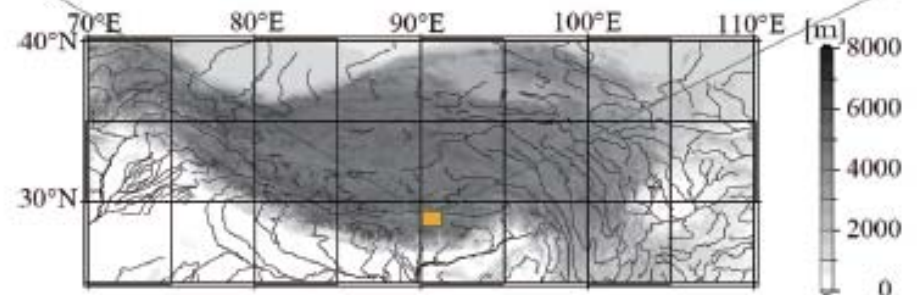
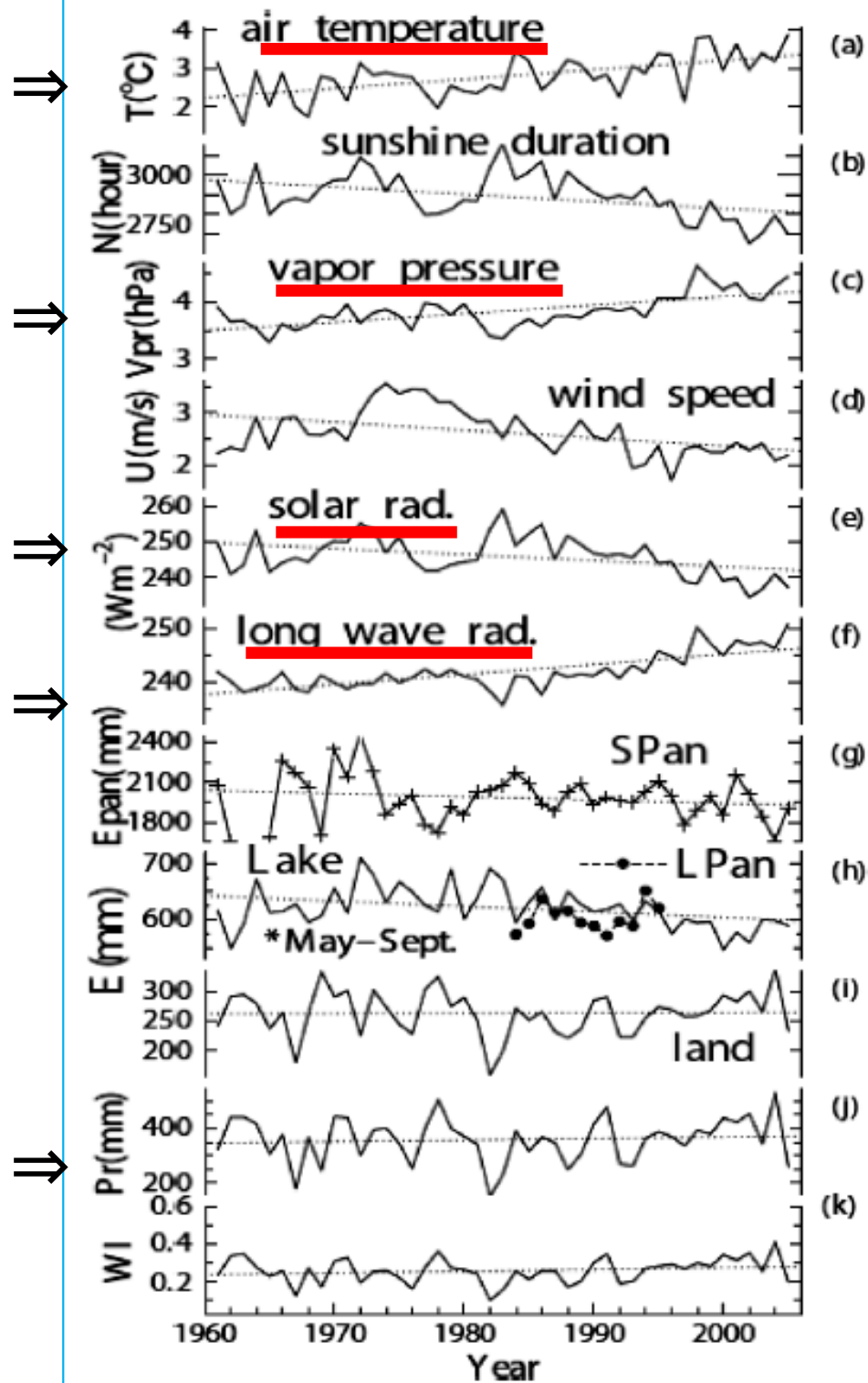
と区域。ともにEndo et al. (2005)より説明文を修正して引用。 図1.3.29



1:非常に弱い雨⇔10:非常に強い雨

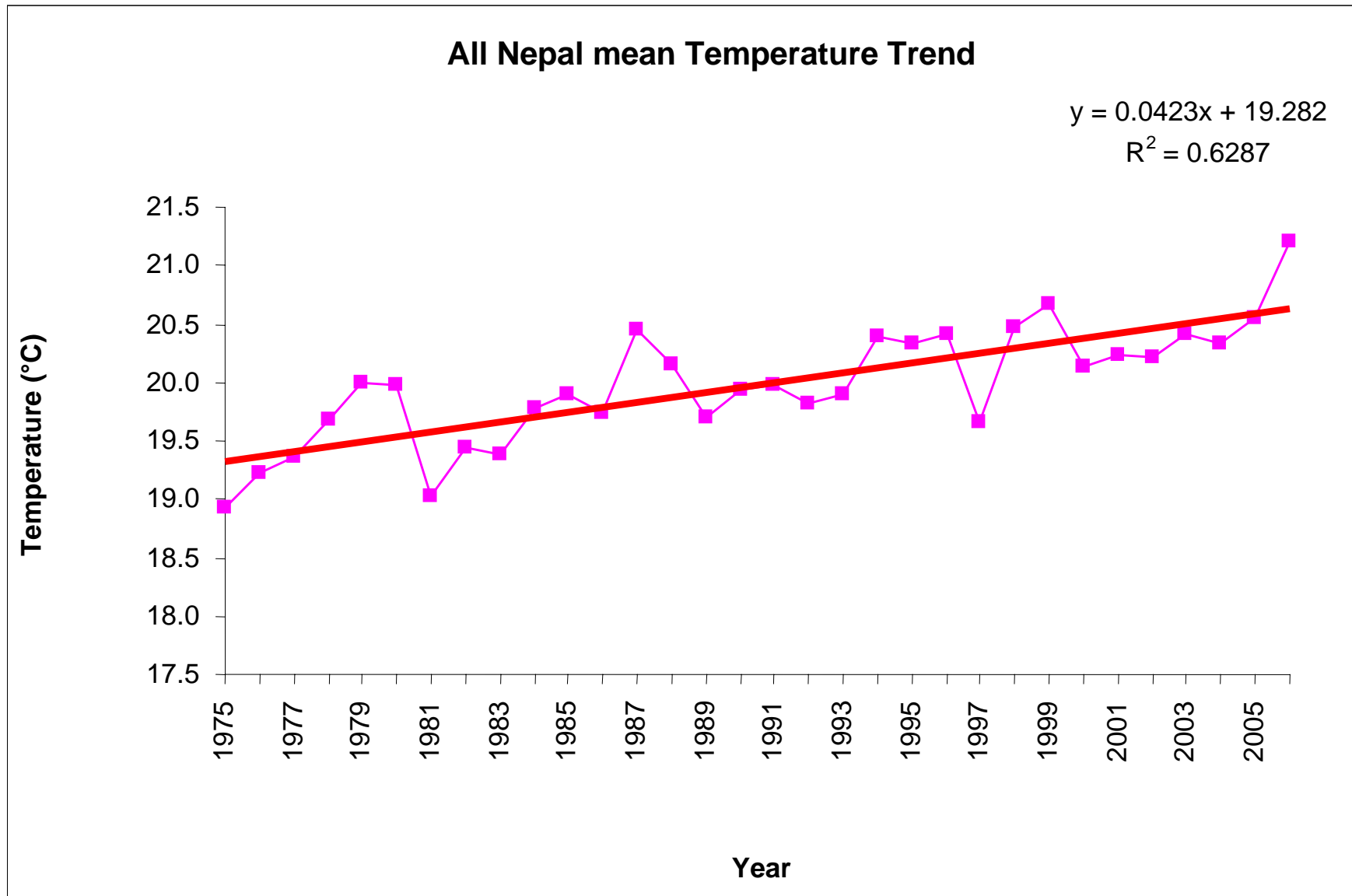
チベット高原(南部)での温暖化

水蒸気の増加と(雲量の増加)が
地表面に向かう赤外放射を強化し
て、地表付近の気温を上昇させてい
る? (Xu et al., Hydro.Res.Lett., 2009)

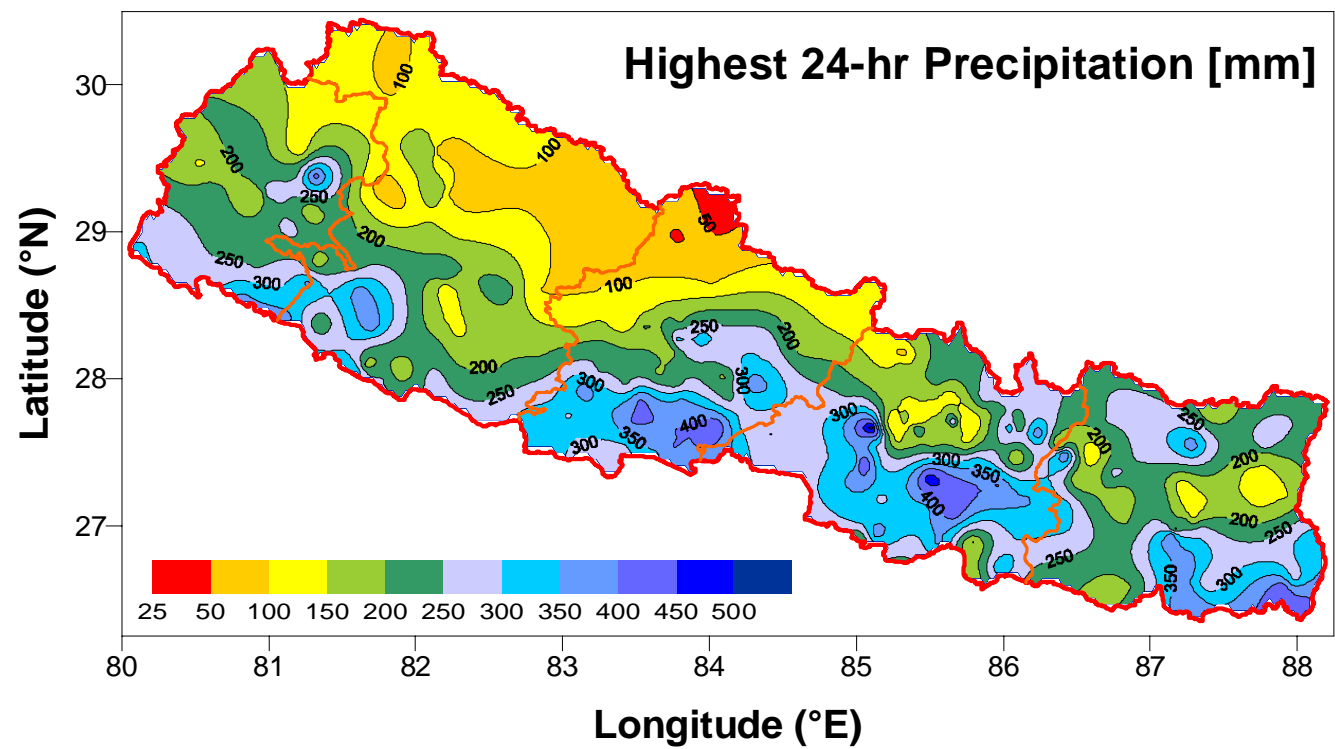
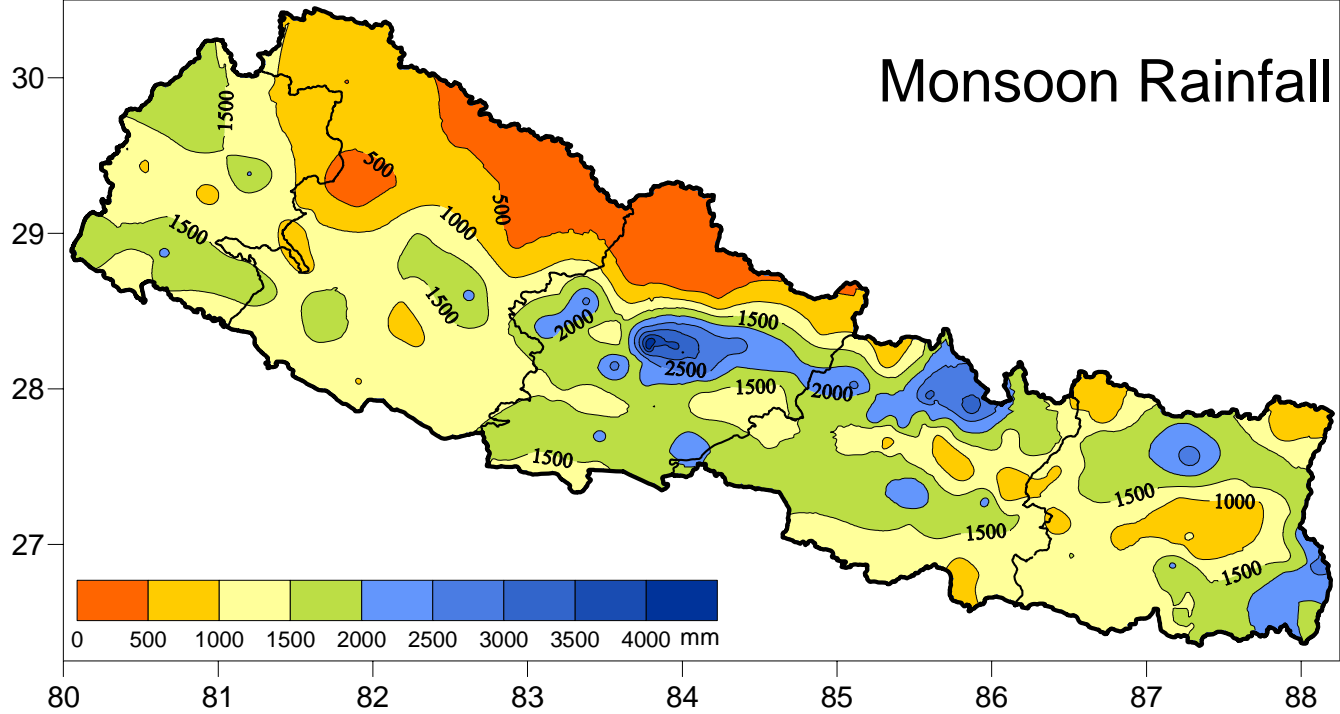


Map of the Tibetan Plateau

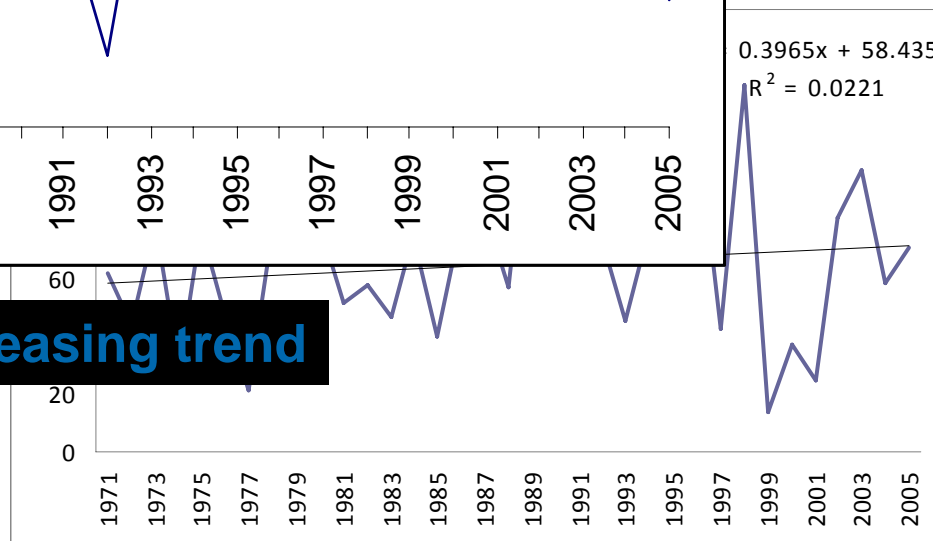
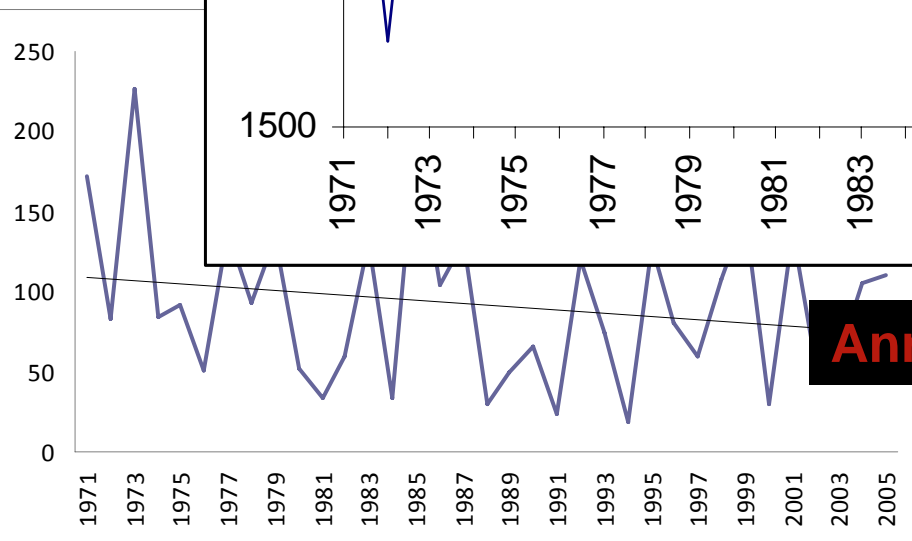
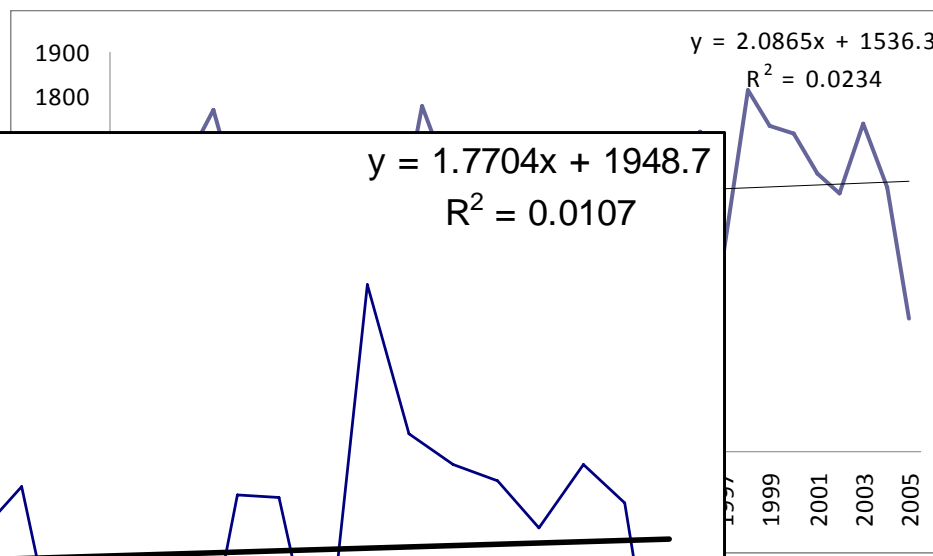
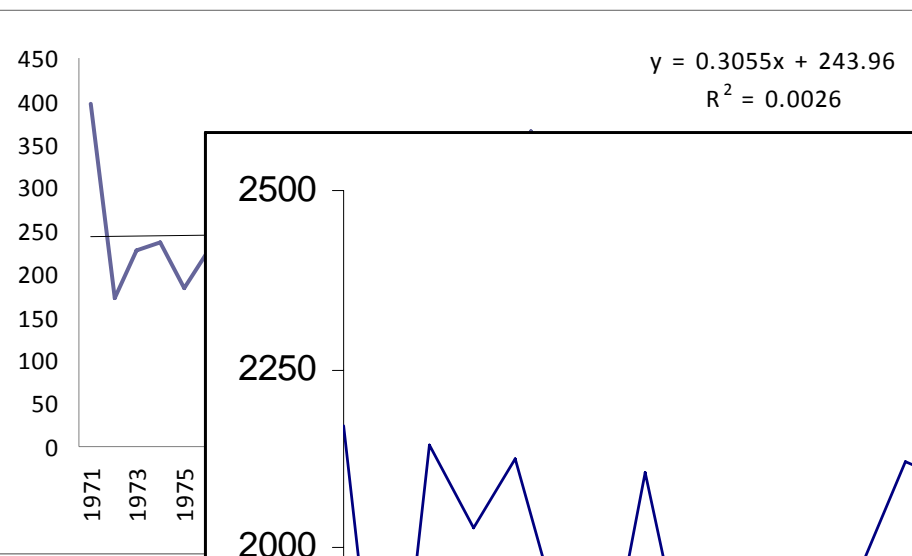
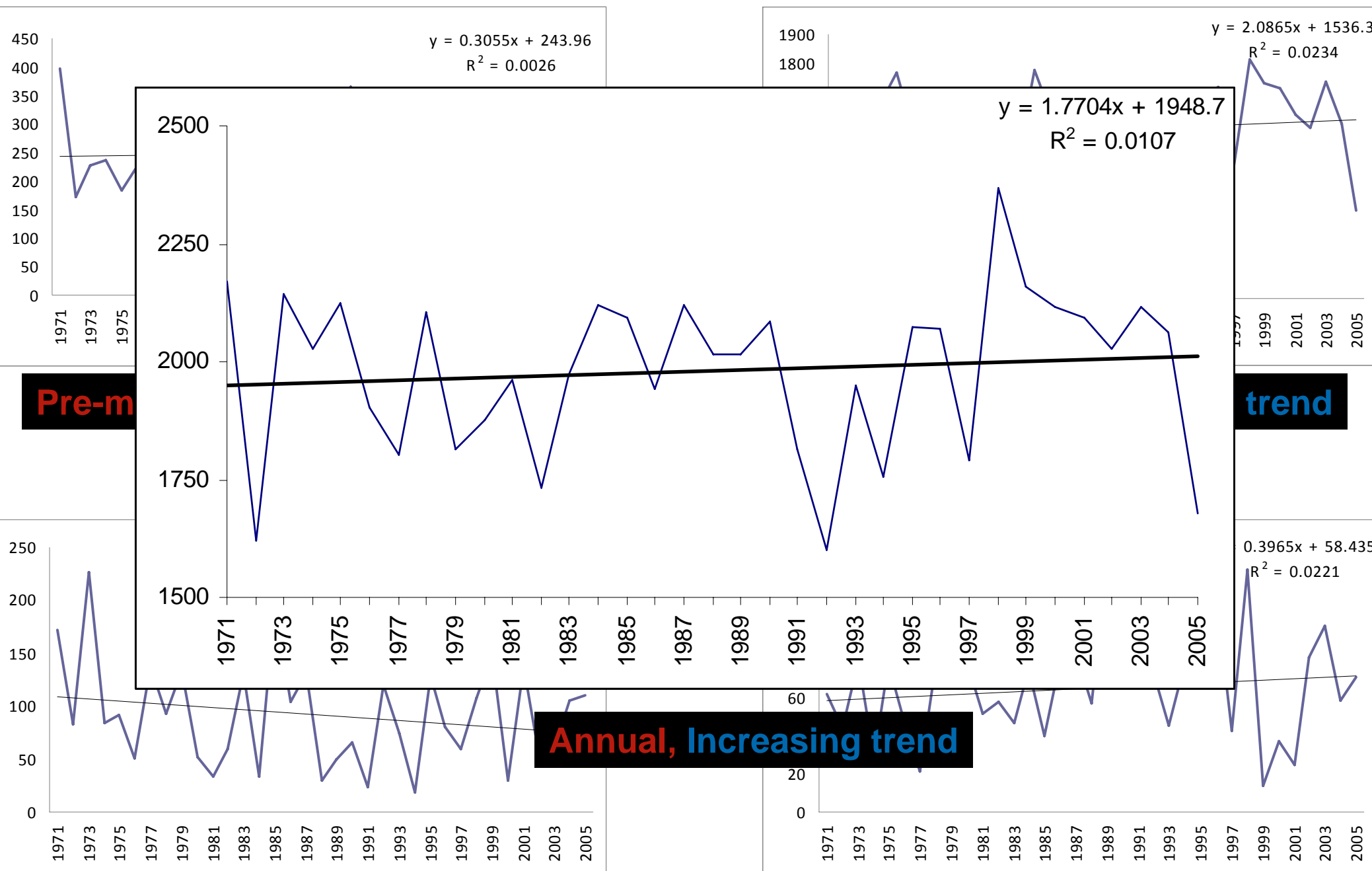
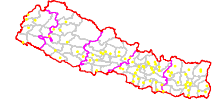
ネパールの年平均気温の長期傾向



- All Nepal Temperature is increasing steadily



ネパール全域平均の降水量の長期傾向



Pre-m

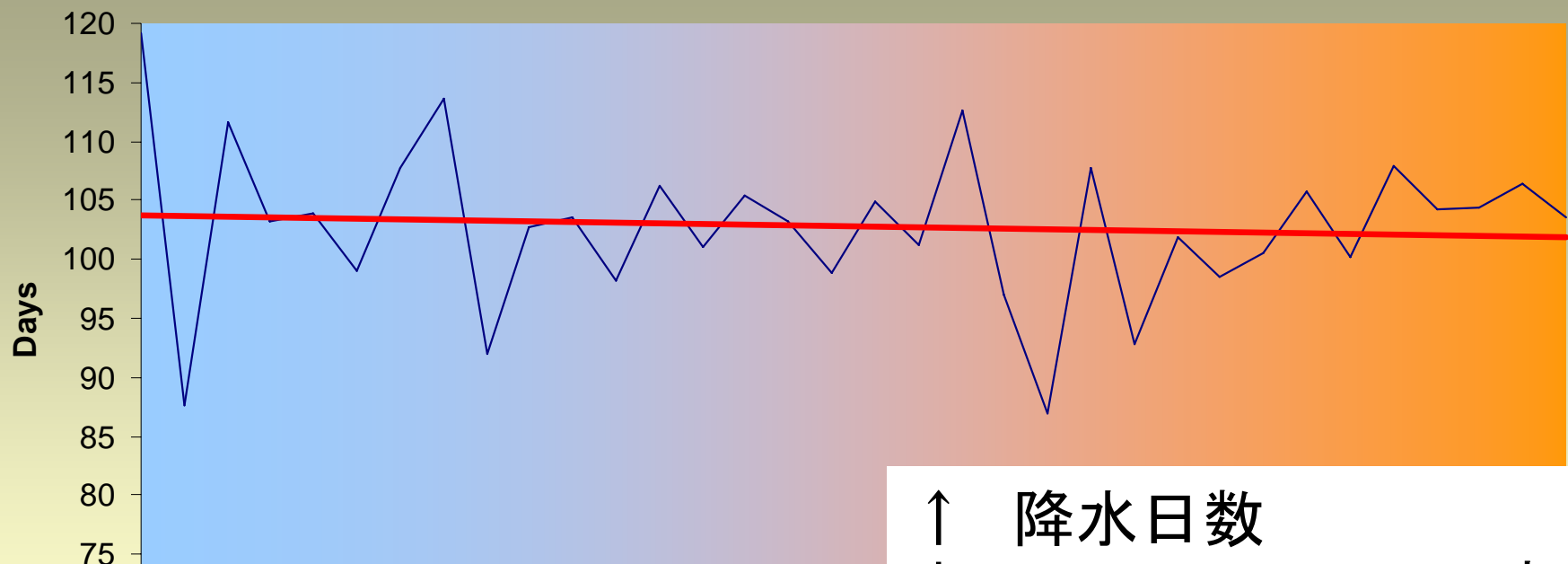
trend

Annual, Increasing trend

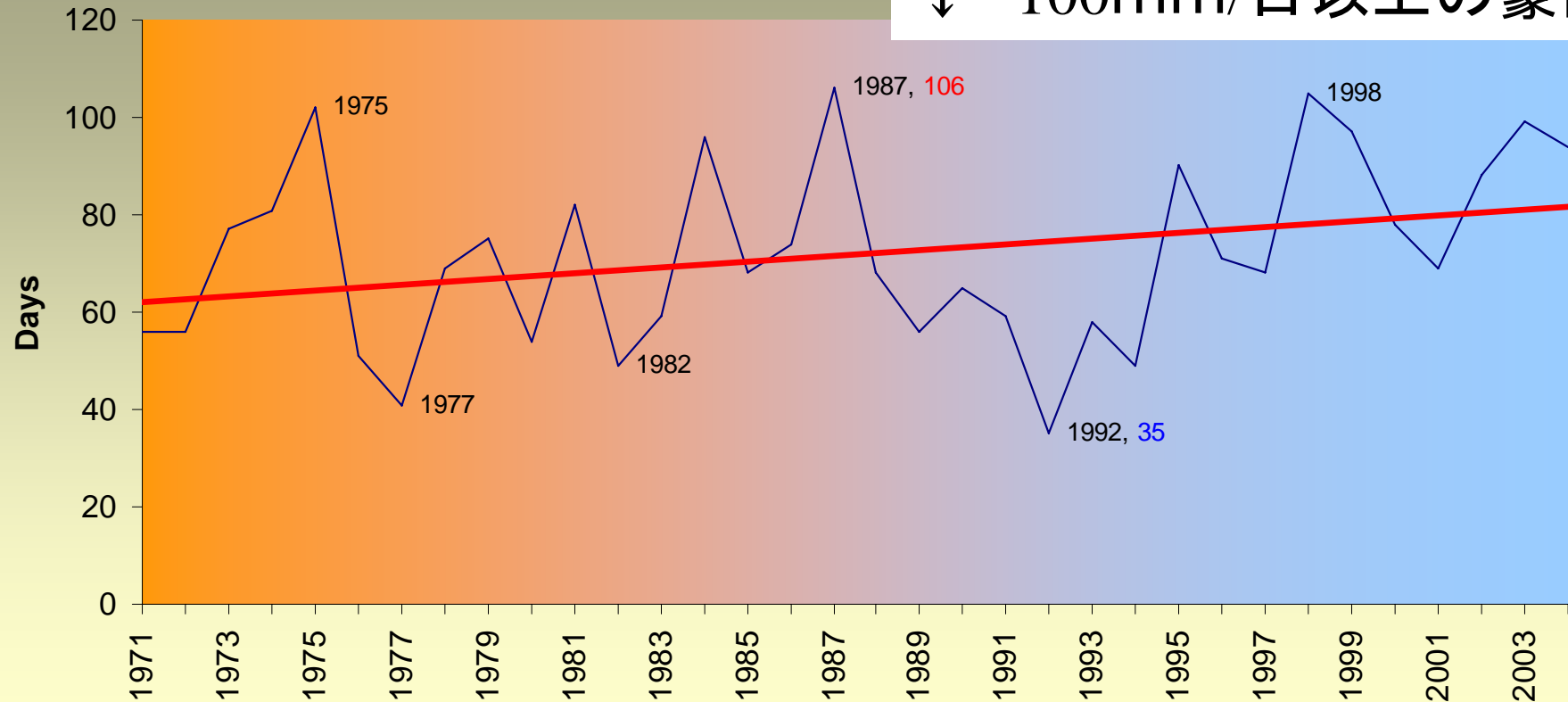
Post-monsoon, Decreasing trend

Winter, Increasing trend

ネパール全体で降水日数は減少傾向、豪雨頻度は増加傾向



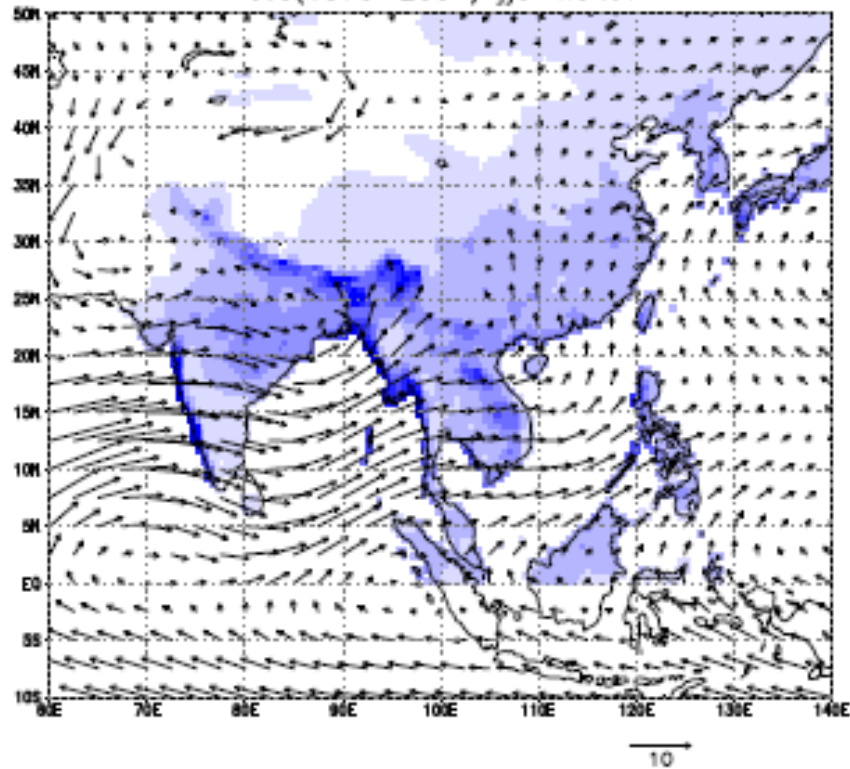
↑ 降水日数
↓ 100mm/日以上の豪雨日数



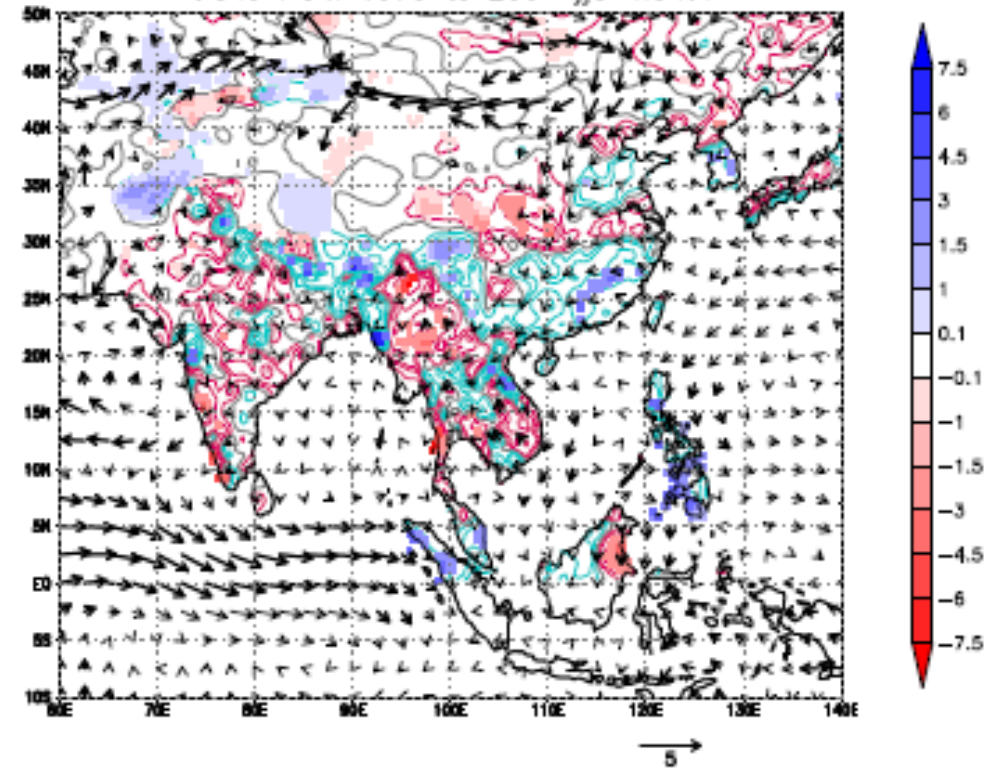
高解像降水量データ(1979→2004)による解析

ヒマラヤ山脈沿いから中国南部は降水量の増加傾向が顕著→水蒸気の増加傾向と南アジアモンスーンの全体的な弱化(変化)が関係? インド洋での海面水温の上昇も関係?

JRA25 850hPa wind and APHRO DITE precipitation
ave(1979-2004) jja month



JRA25 850hPa wind and APHRO DITE precipitation
trend from 1979 to 2004 jja month



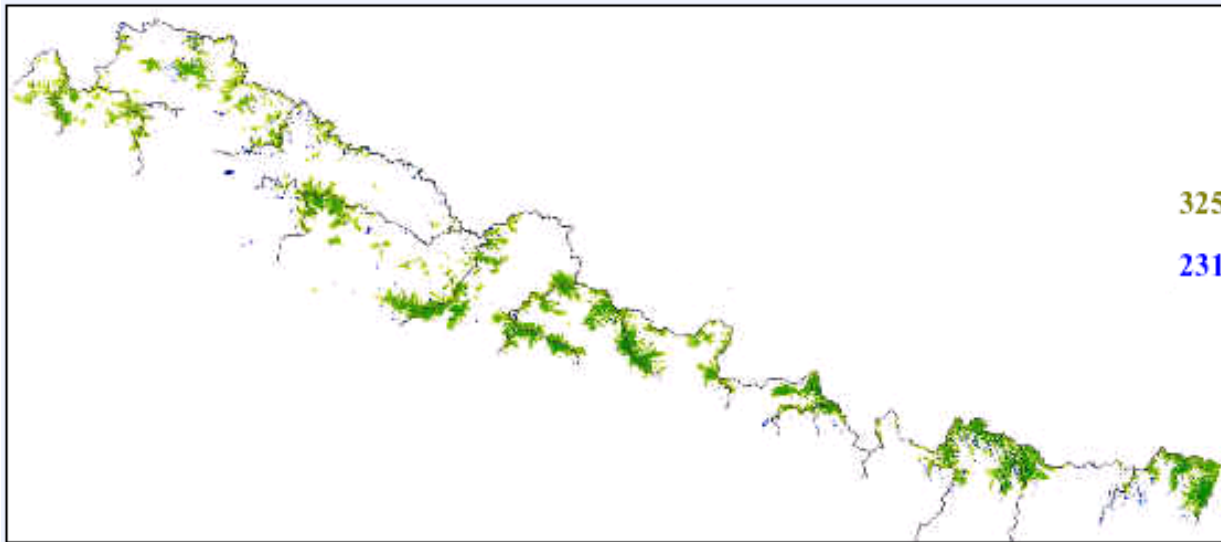
ネパールヒマラヤにおける

氷河と氷河湖の変化

(名大環境学研究科 藤田耕二氏提供)

Impact on Glaciers

Map of Glaciers and Glacier Lakes Distribution



3252 Glaciers (5323 sq.km.)

2315 Glacial lakes (75 sq. km.)

Major Basin	Glacier Number	Area (km ²)	Lake Number	Area (km ²)	Ice Reserve (km ³)
Koshi Basin	779	1409.84	1054	24.81	152.06
Gandaki Basin	1025	2030.15	338	12.28	191.39
Karnali Basin	1361	1740.22	907	37.66	127.72
Mahakali Basin	87	143.23	16	0.38	10.06
Total	3252	5323.44	2315	75.13	481.23

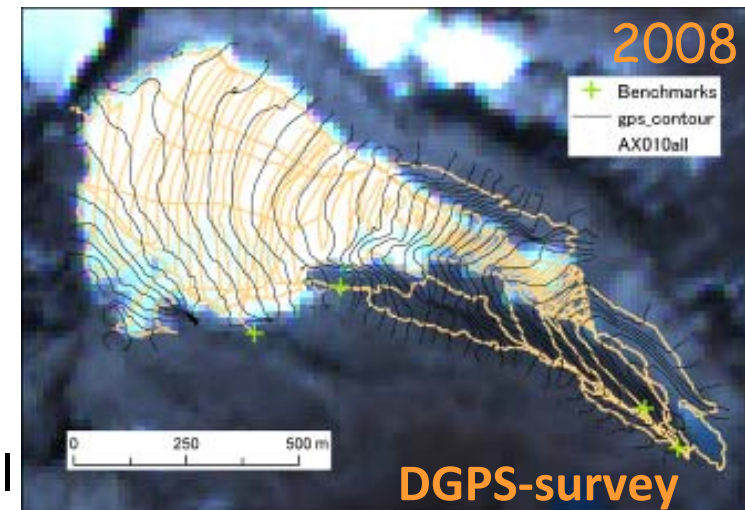
AX010 Gl. (Shorong Himal)



- 3つのネパールヒマラヤの氷河のモニターが1970年代から名大によってつづけられている。
- これらの氷河は、世界のどの氷河より急速に縮小していることが明らかになった。

Fujita et al. [1997 JG]

Glacier AX010, Shorong, Nepal



Trends of Glacier Change in Nepal Himalaya

- AX 010: This small clean glacier is **shrinking** at an alarming rate. If it continues to shrink at the same rate **it will disappear** by 2060.
- Rika Samba: The terminus of this glacier is **retreating** by 10 m per year
- Other glaciers in Hidden Valley, Dhaulagiri Region are also **retreating** at the rate of 1.5 to 3 m per year
- Lirung: About 4 m of **surface lowering** in one year
- Khumbu: This large debris covered glacier the **surface lowering** between 1978 and 1995 was 10 to 30 m (max 2 m/yr). This glacier might divide into two at 5000 m
- Majority of glaciers in Kanchenjunga area are also **retreating**

Consequences of Glacier Retreat !

- Initially the discharge will increase due to higher rate of melting, but later it will decrease as ice mass is depleted
- Glacier lake formation
- Glacier Lake Outburst Flood (GLOF)



Ngojumba Glacier

Settlement

KHUMBU

Formation and Growth of Glacier Lakes

- Valley glaciers generally contain supra-glacial ponds
- Due to warming climate, these ponds grow bigger and merge.
- During Little ice Age (1550-1850 AD) the glaciers were much longer than today. As the glacier retreat they leave a large void behind. The ponds occupy the depression earlier occupied by glacier ice
- These glacier lakes are very unstable and may outbreak causing catastrophic flood called Glacier Lake Outburst Flood (GLOF)

Tsho Rolpa Glacier Lake, Nepal



L=3.3 km

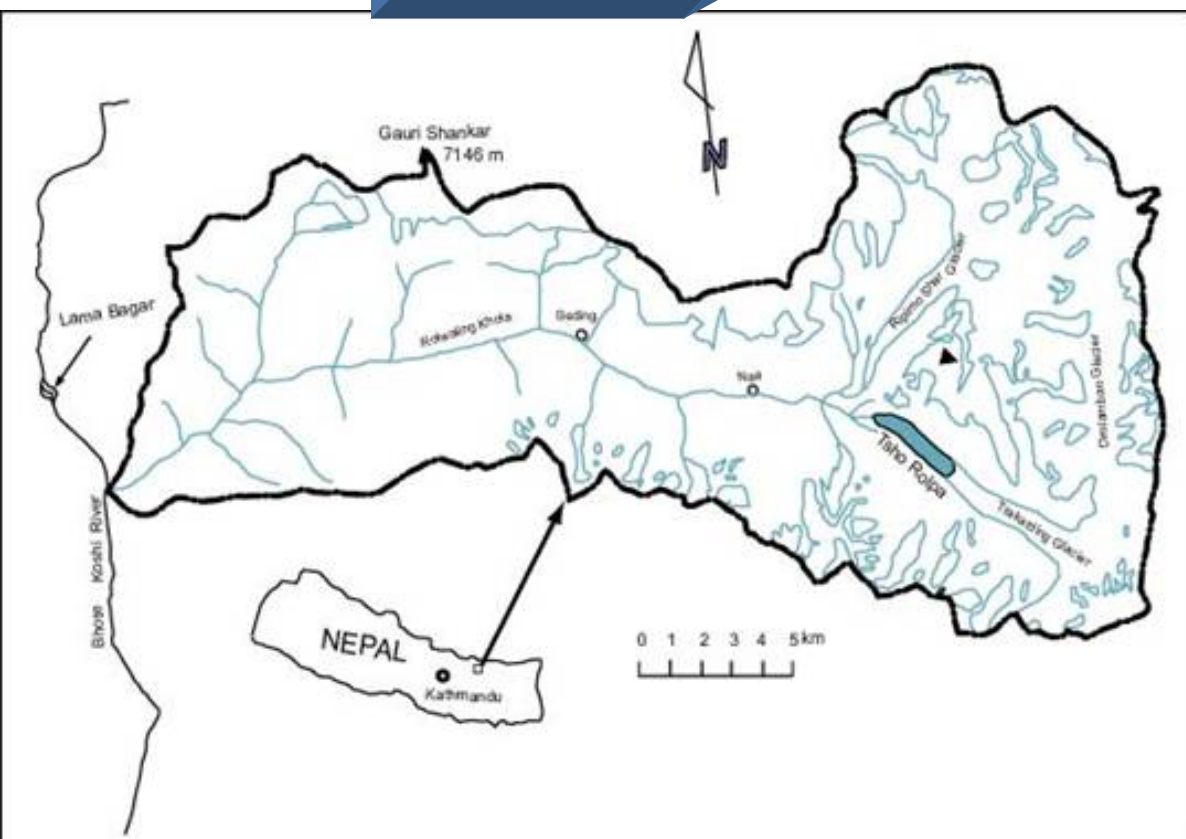
B=500 m

D=142 m

Department of Hydrology and Meteorology

Tsho Rolpa Glacier Lake

Location



Lake Development

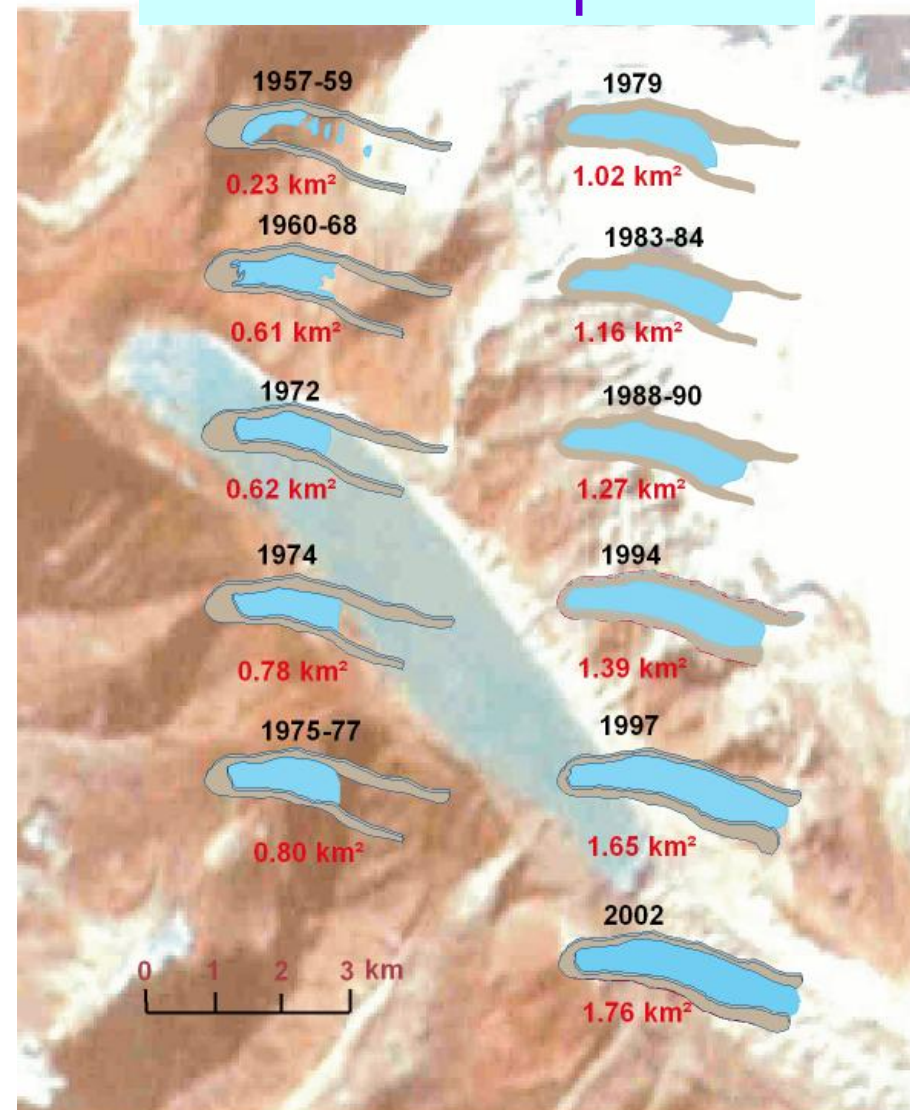


Figure 1

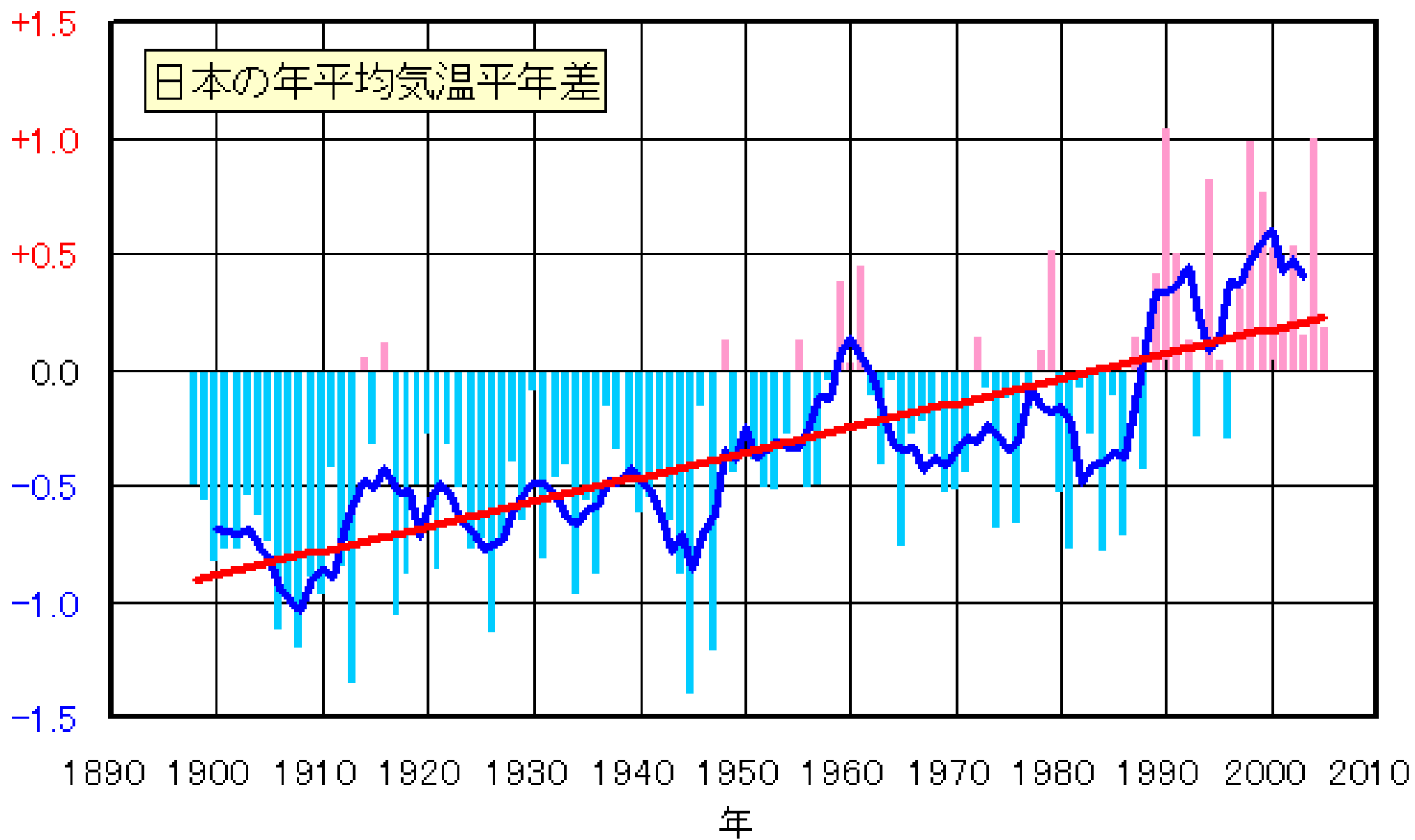
Modified after WECS 1994,

Department of Hydrology and Meteorology, 2004

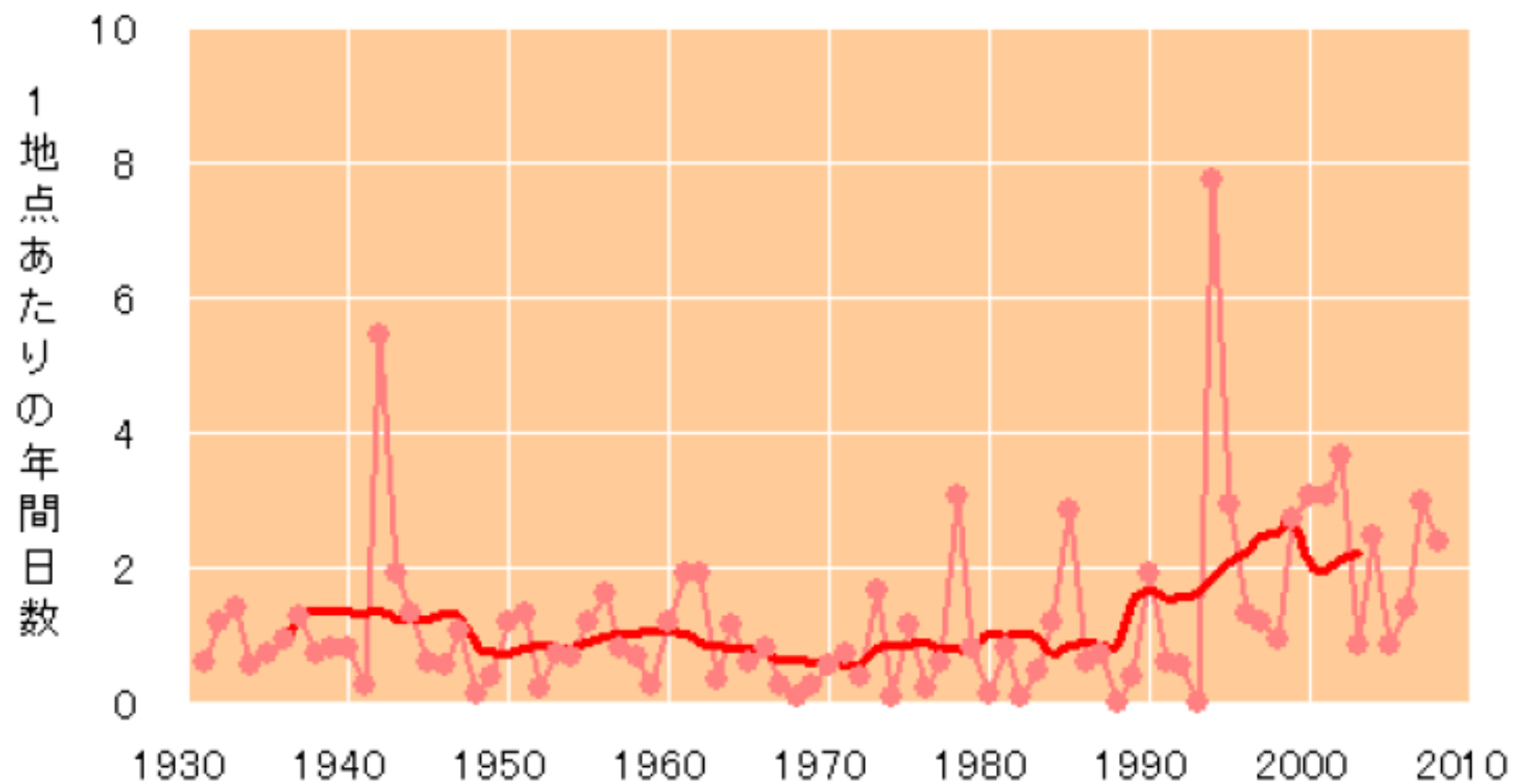
日本の降水量は どう変化してきたか？

- 異常気象レポート2008 (気象庁)
日本の数10か所の気象観測地点の
データから

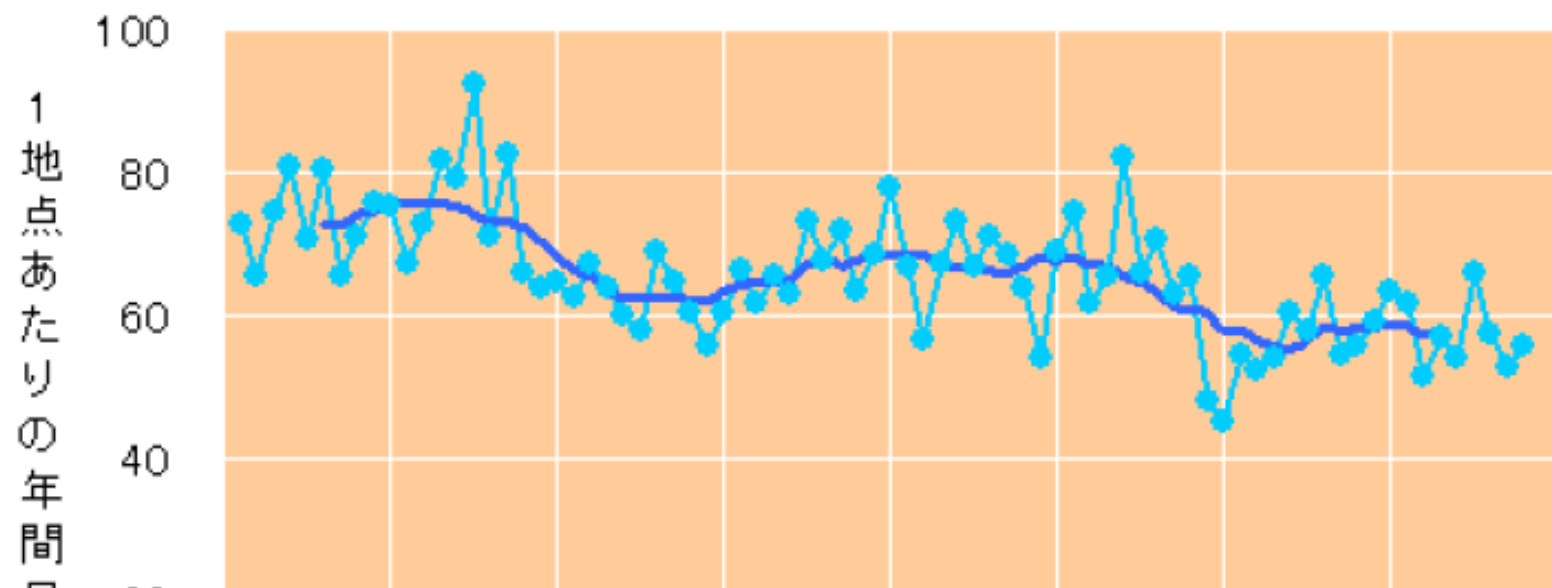
平年差
($^{\circ}\text{C}$)



猛暑日(日最高気温35℃以上)の日数

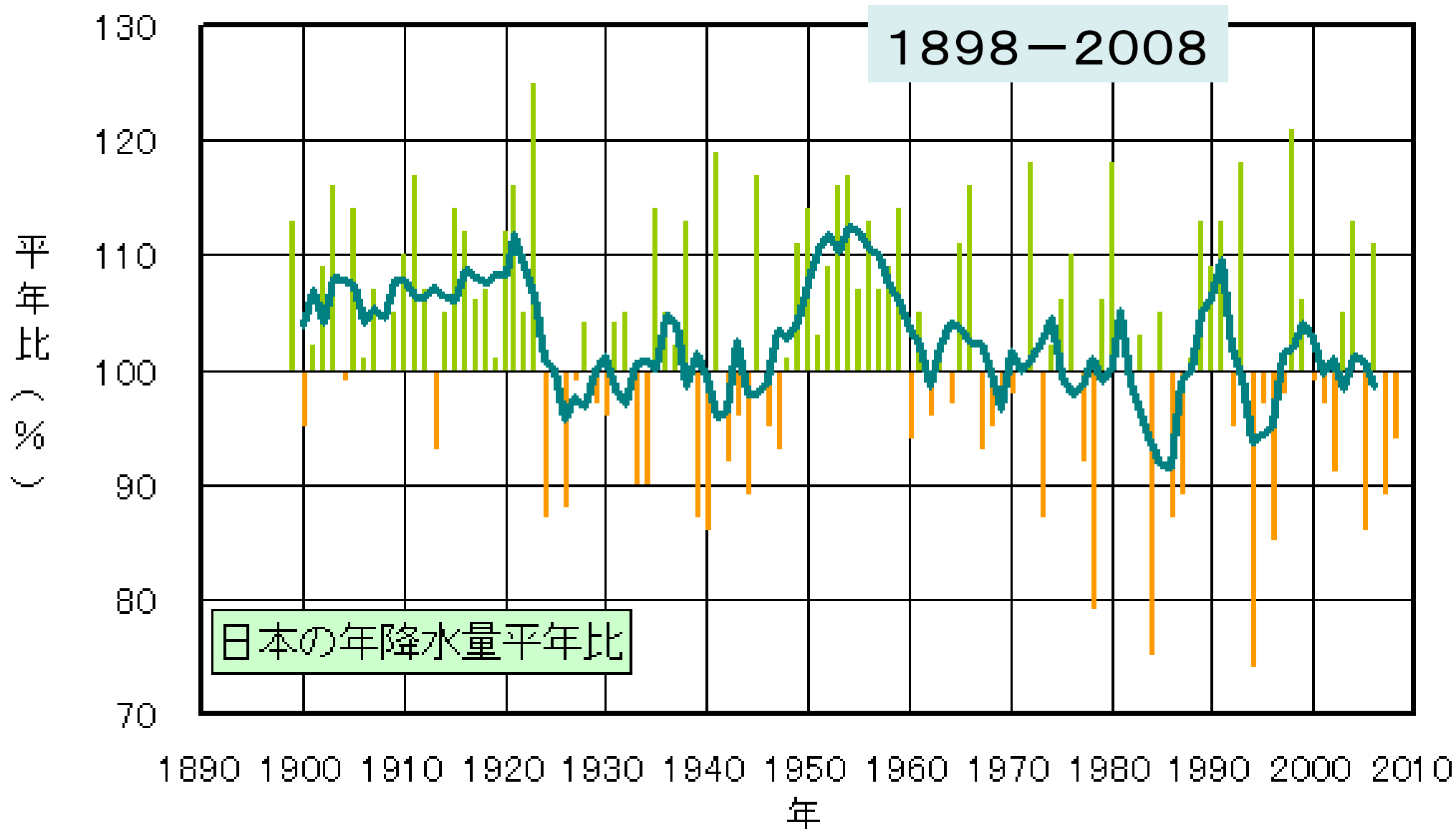


冬日(日最低気温0℃未満)の日数



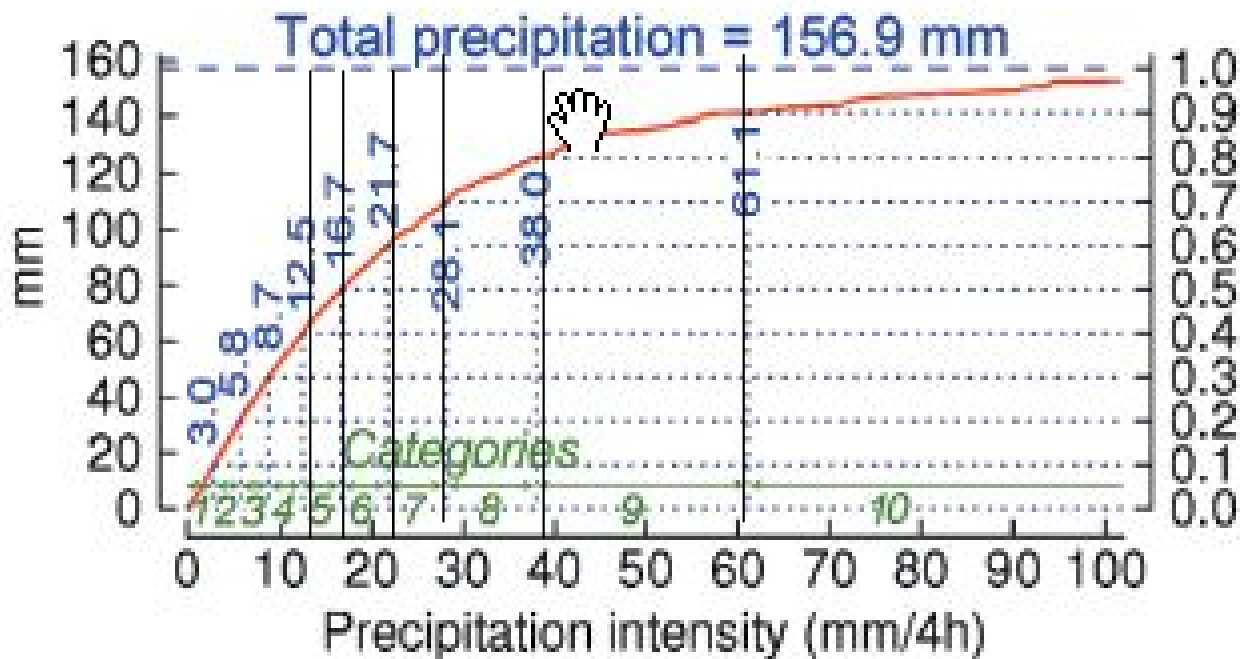
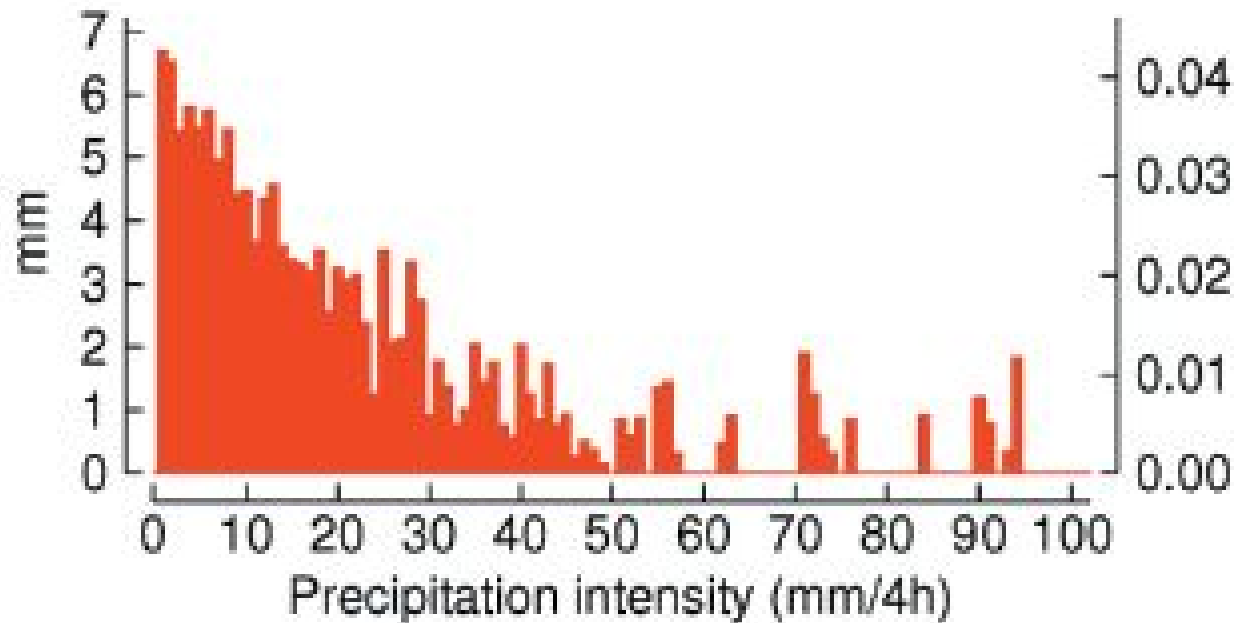
20世紀における日本の年降水量の変化

長期的にはやや減少傾向？ 年々の変動は大きくなっている？



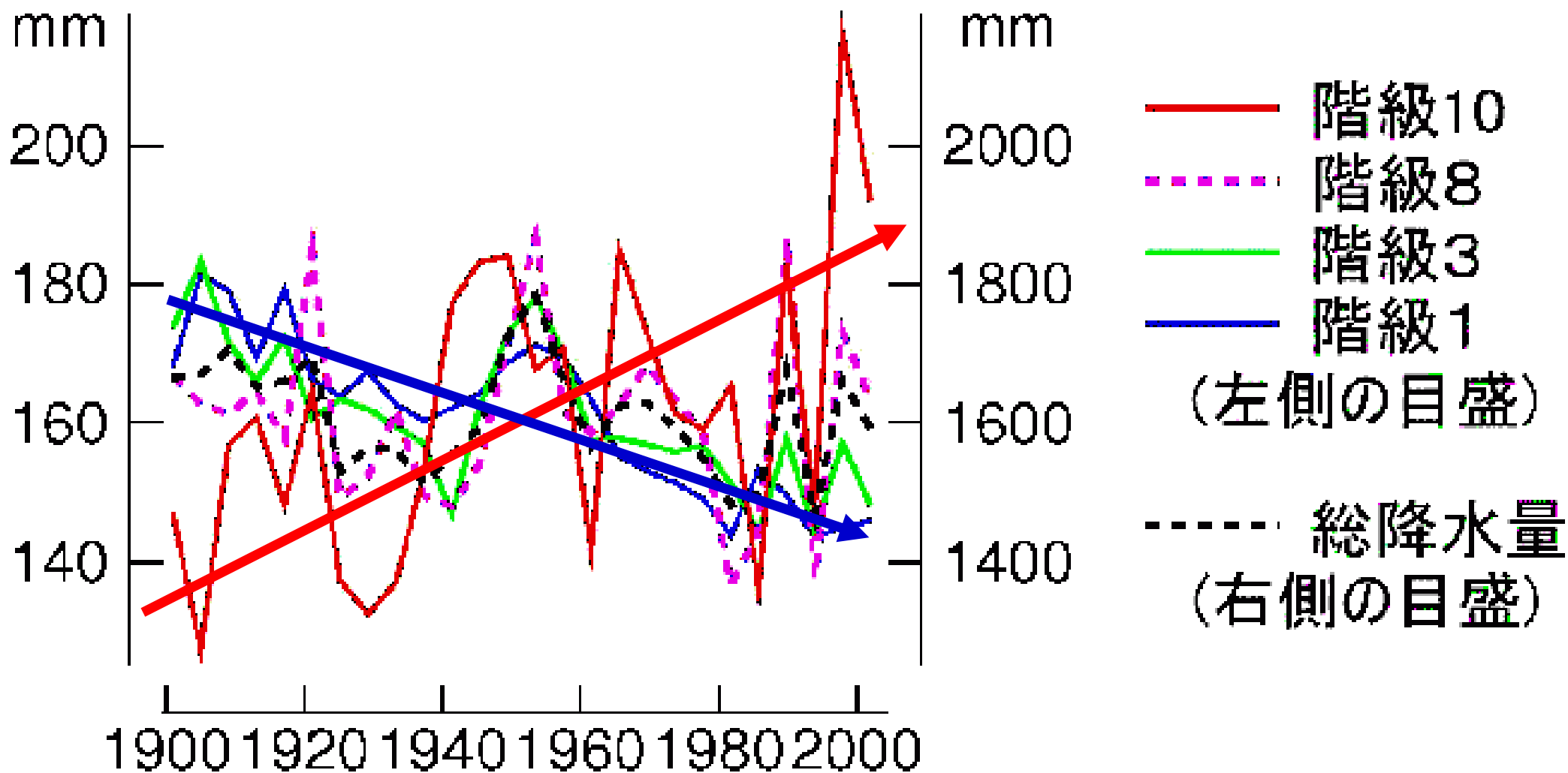
日本の降水強度の長期変化(1898→2003)

(時間降水量データにもとづく長期変化の解析)



降水階級1、3、8、10における年間降水量 (全国の4年ごとの平均値)の長期変化

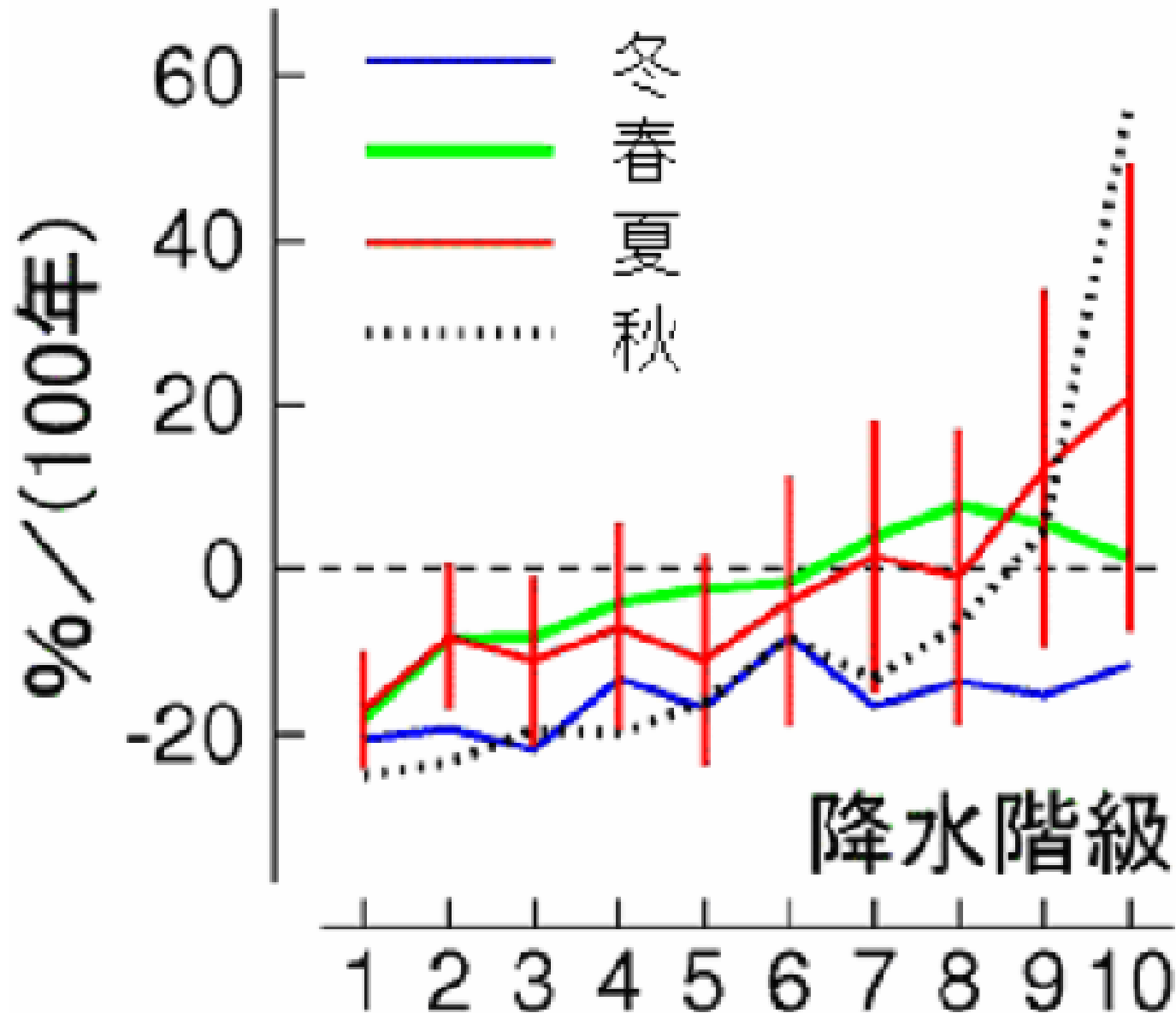
強い雨(階級10)ほど増加傾向、弱い雨(階級1)ほど減少傾向



季節別の各階級の降水量の経年変化率(全国51地点平均)

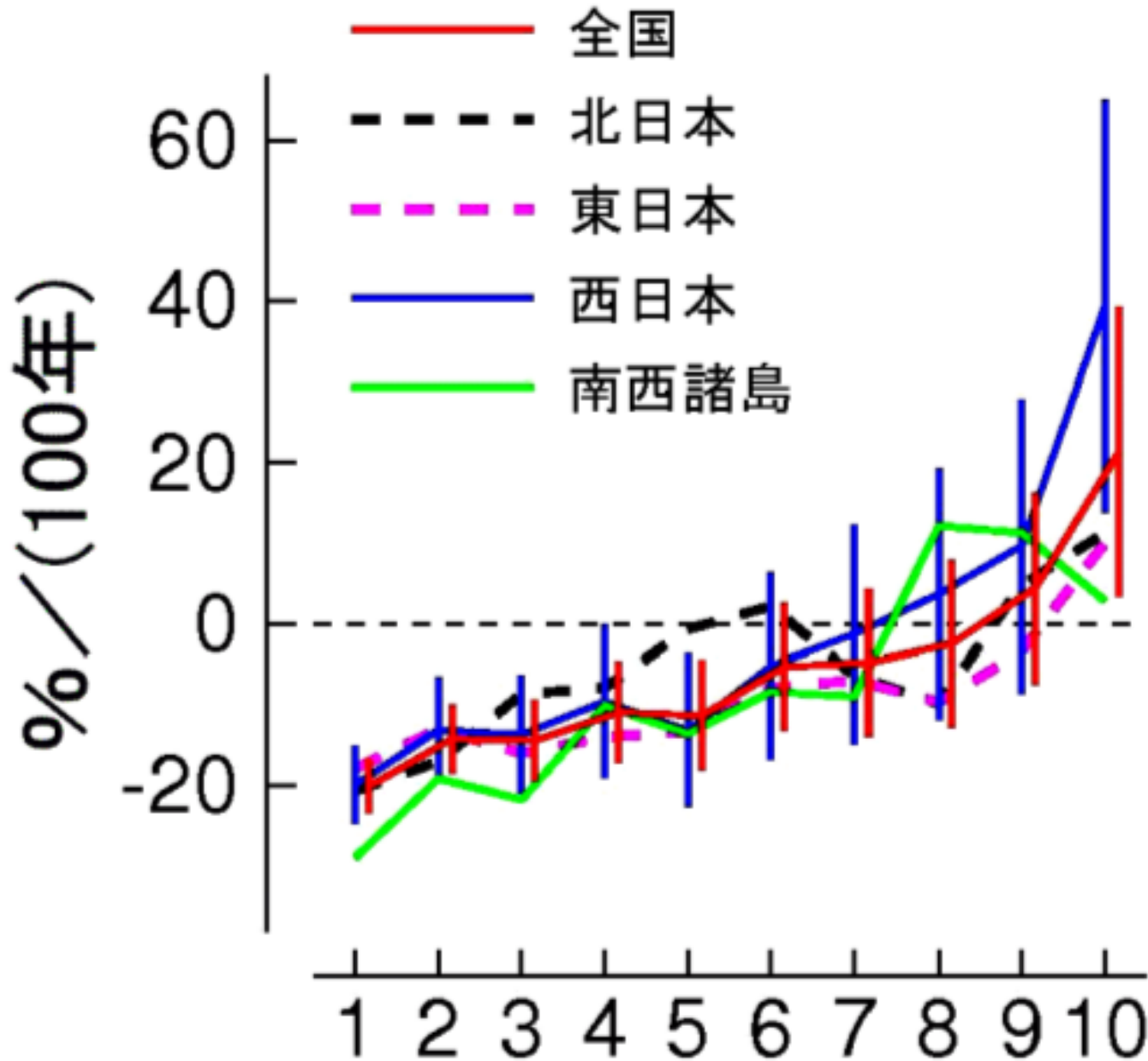
夏(6~8月)については95%信頼幅を縦棒で示す。

夏・秋を中心に豪雨の増加傾向が顕著



全国および地域別の各階級の降水量の経年変化率(年平均)

全国および西日本について95%信頼幅を縦棒で示す。



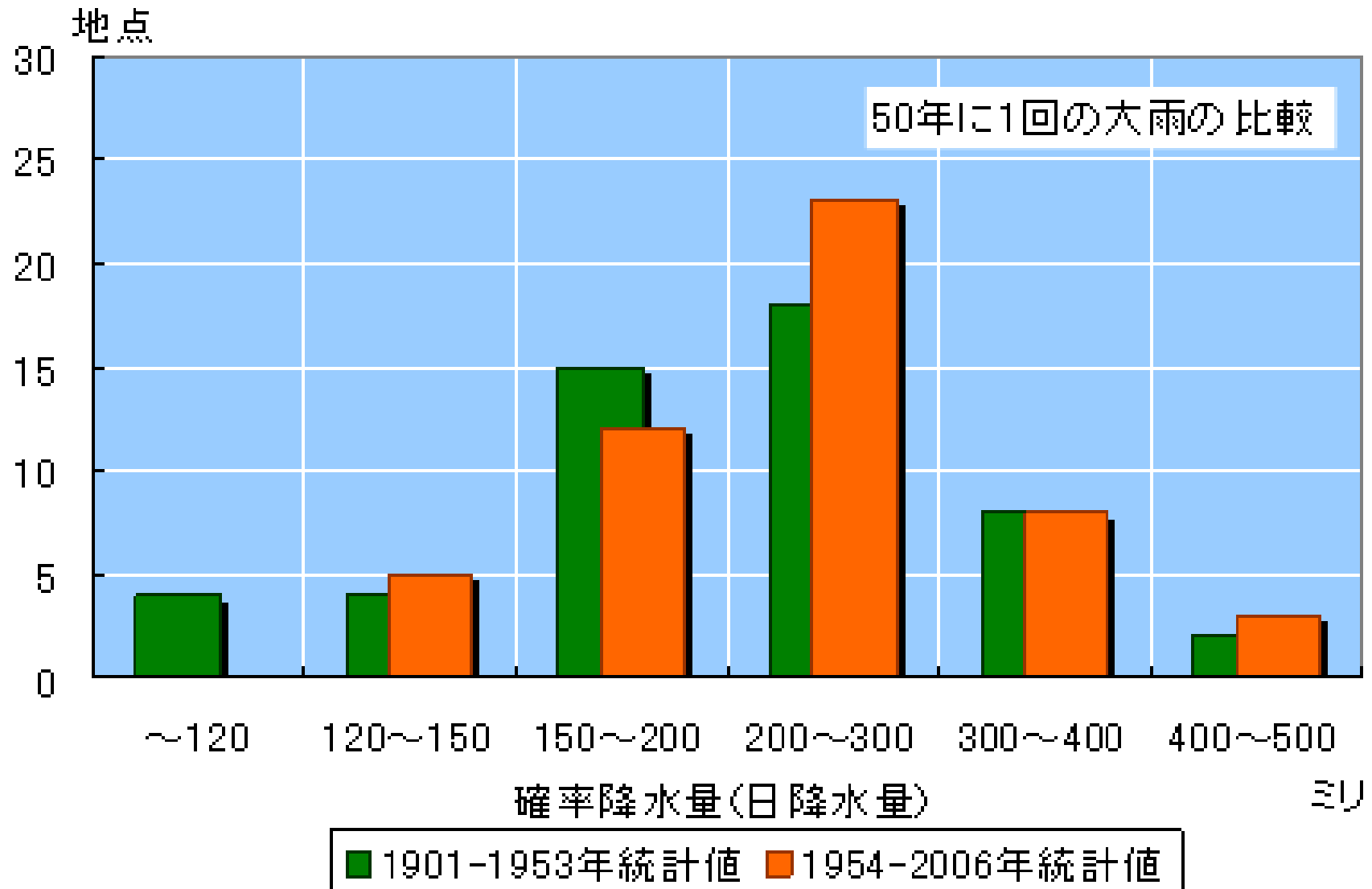
全国51 地点における50年に1回起こりうる日降水量頻度

緑色の棒グラフ: 1901~1953年のデータによる確率

降水量における50年に1回の日降水量

橙色の棒グラフ: 1954~2006年のデータによる確率

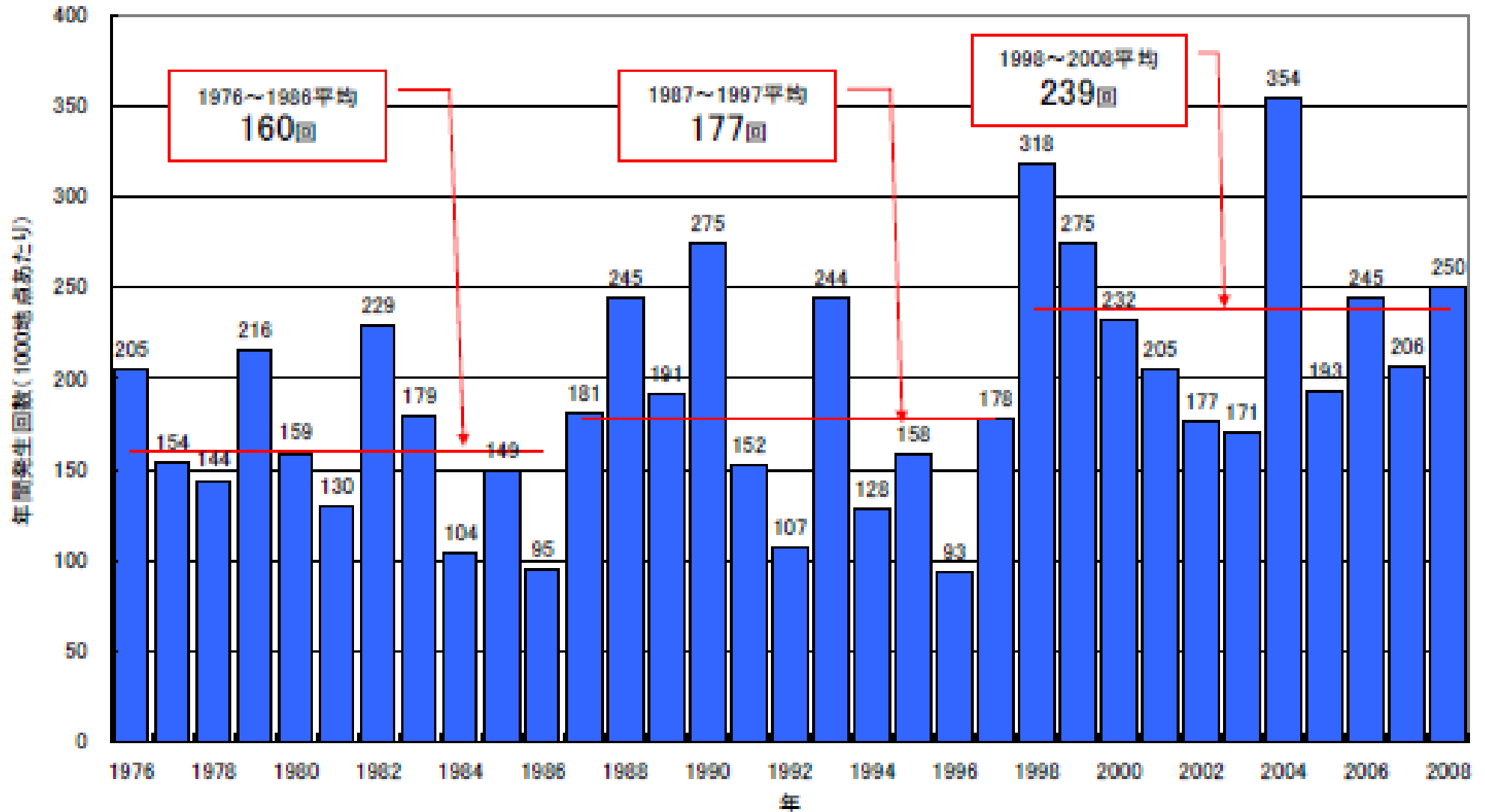
降水量における50年に1回の日降水量



全国のアメダス1300地点における 豪雨(50mm以上/時間)頻度の変動 (1976→2008)

1時間降水量50mm以上の年間発生回数(1000地点あたり)

- ・1時間降水量の年間発生回数
- ・全国的1300地点のアメダスより集計
- ・1000地点あたりの回数としている



アメダス1300地点における 豪雨(400mm以上/日)頻度の変動

日降水量400mm以上の年間発生回数(1000地点あたり)

- ・日降水量の年間発生回数
- ・全国約1300地点のアメダスより集計
- ・1000地点あたりの回数としている

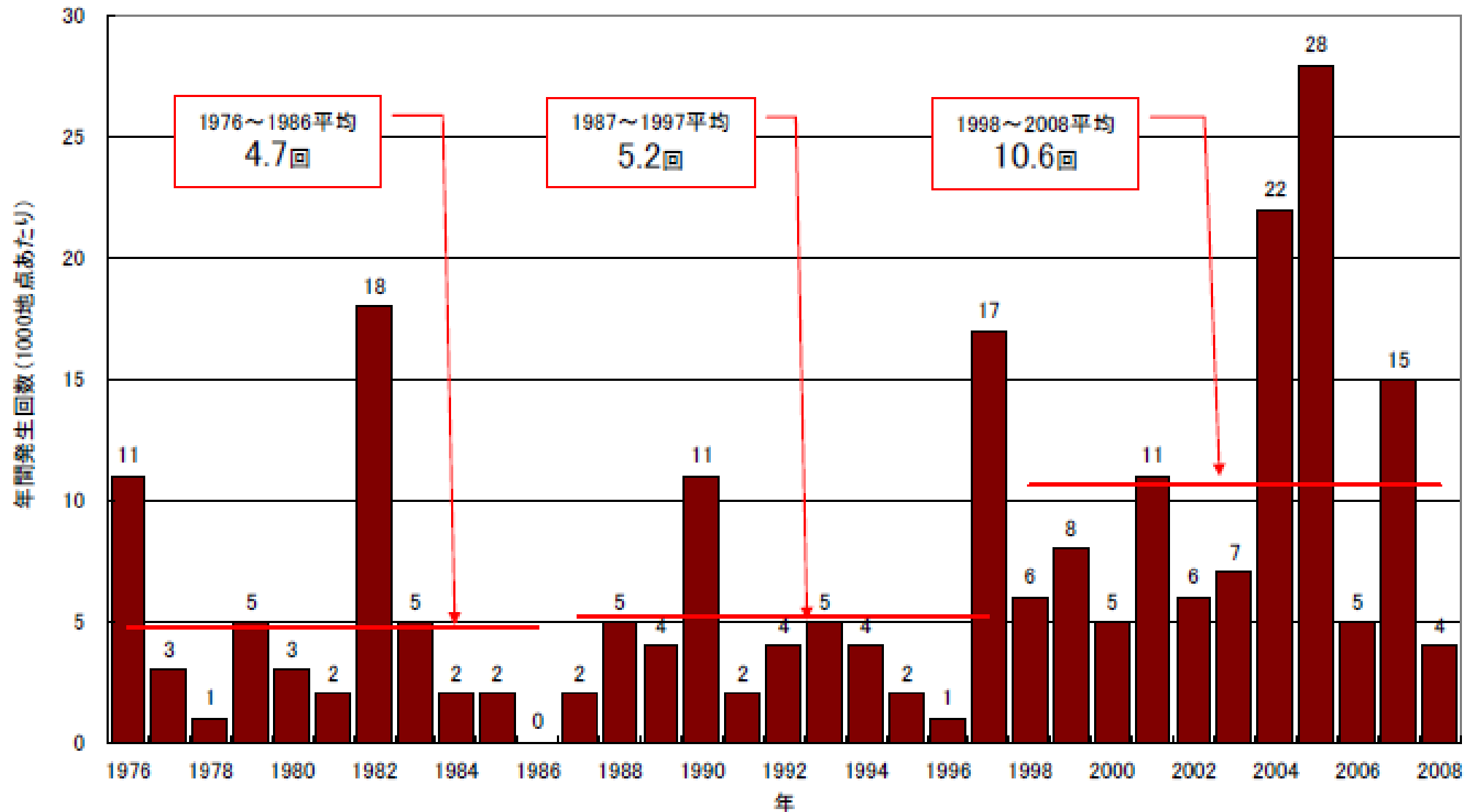
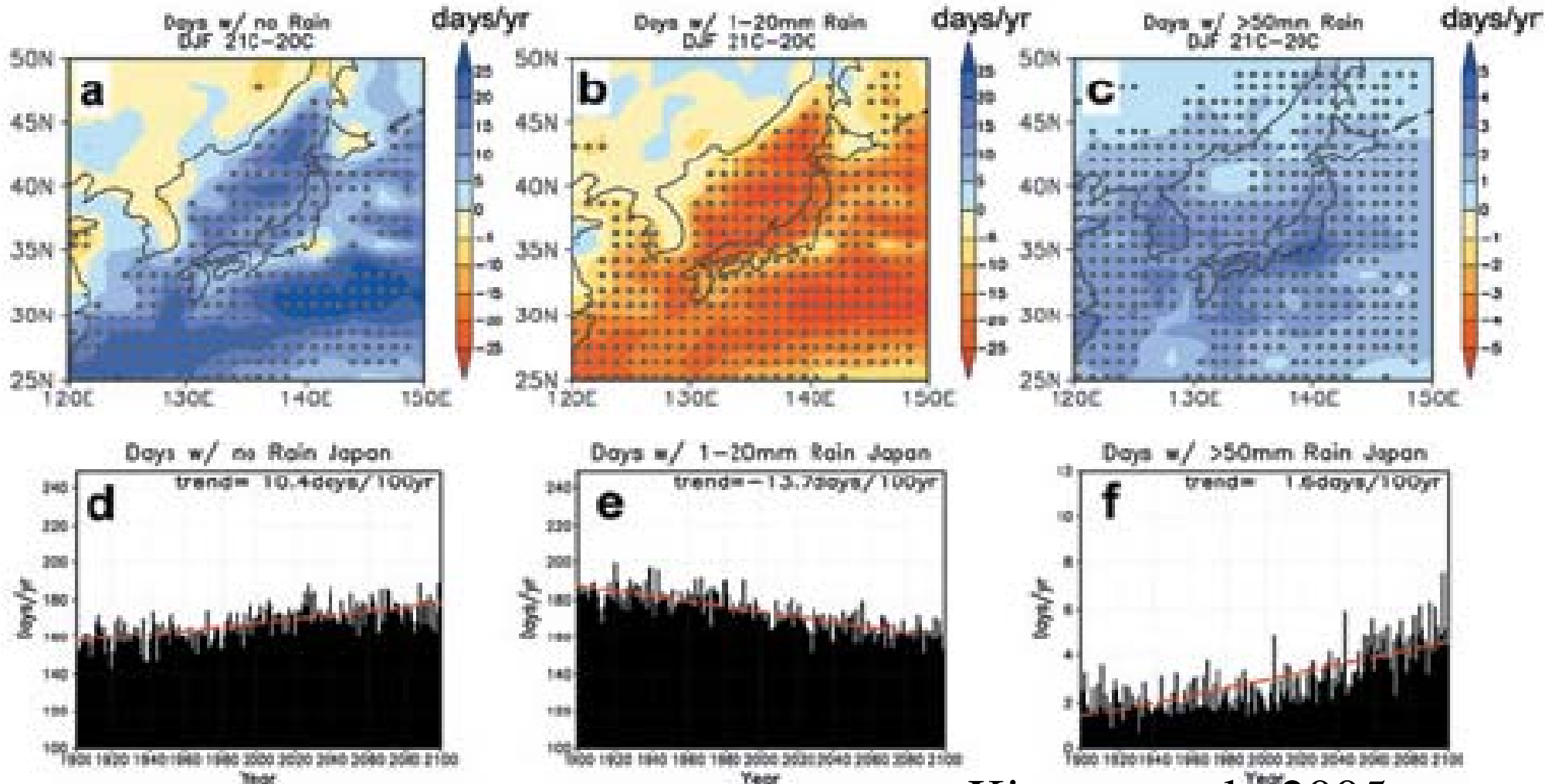


図 1.2-14 アメダス地点で日降水量が 200mm、400mm 以上となった年間の回数(1,000 地点あたりの回数に換算)。

「地球温暖化」に伴う日本付近 の降水変化の予測は？



高解像GCMで予測された降水強度別 降水量・降水頻度の変化(20C末→21C末) 強雨(>50mm/day)の増加傾向、並雨(1-20mm/day)の微減、 無降水日の増加傾向 (CCSR/NIES)

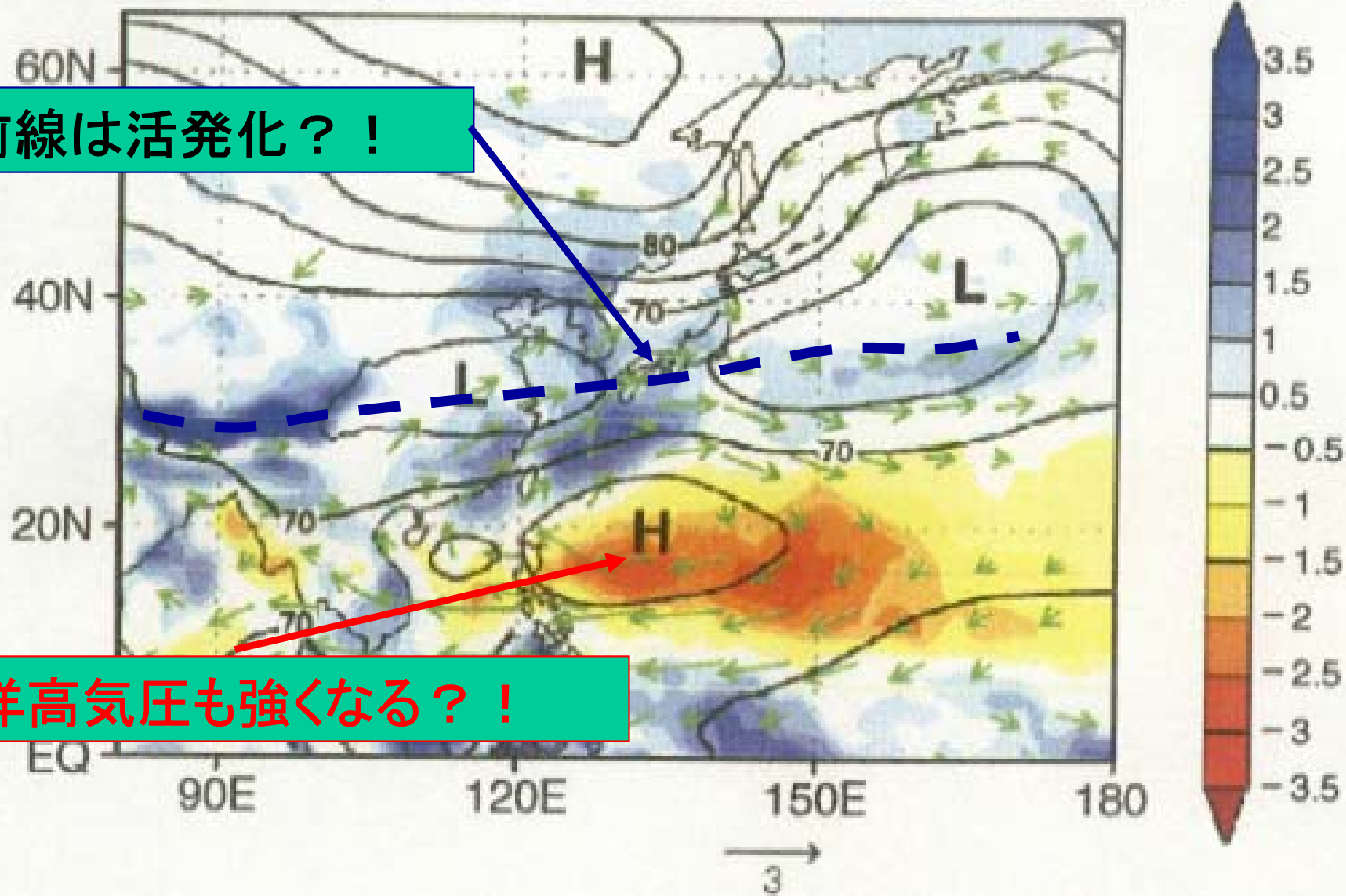


Kimoto et al., 2005

CO₂ 倍増した時の夏の東アジアの天候

気候モデルによる数値実験(木本, 2004)

Rain/Z500/V850 2xC02 - 1xC02 JJA



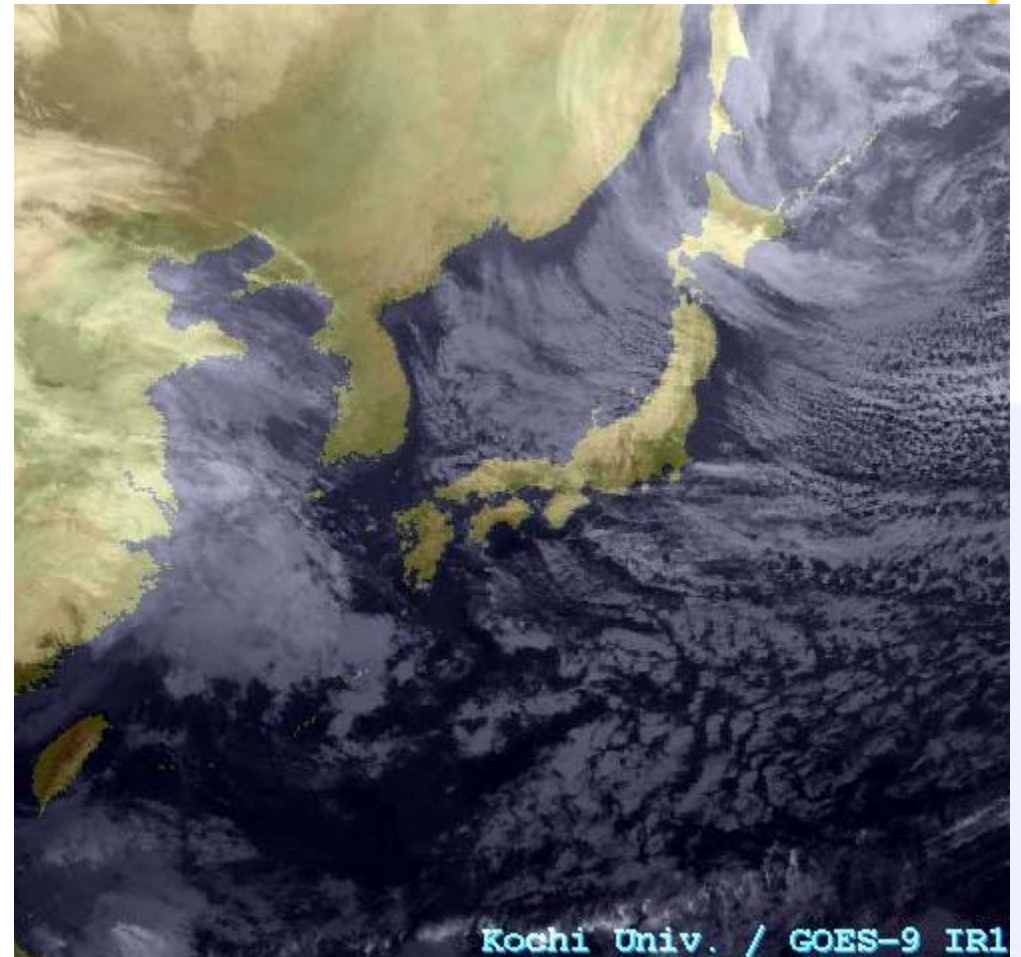
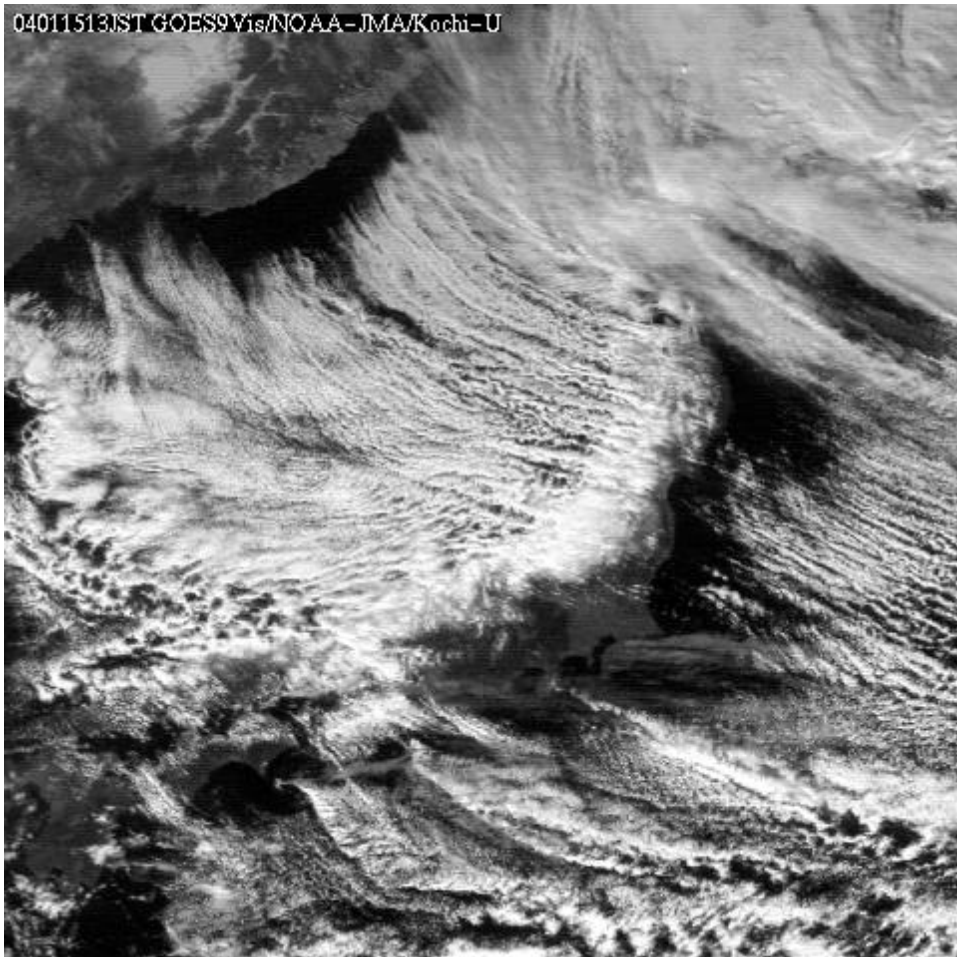
梅雨前線は活発化？！

太平洋高気圧も強くなる？！

日本の雪はどうなるだろうか？



冬の季節風による降雪量(降水量)は 「地球温暖化(?)」でどうなっているか?

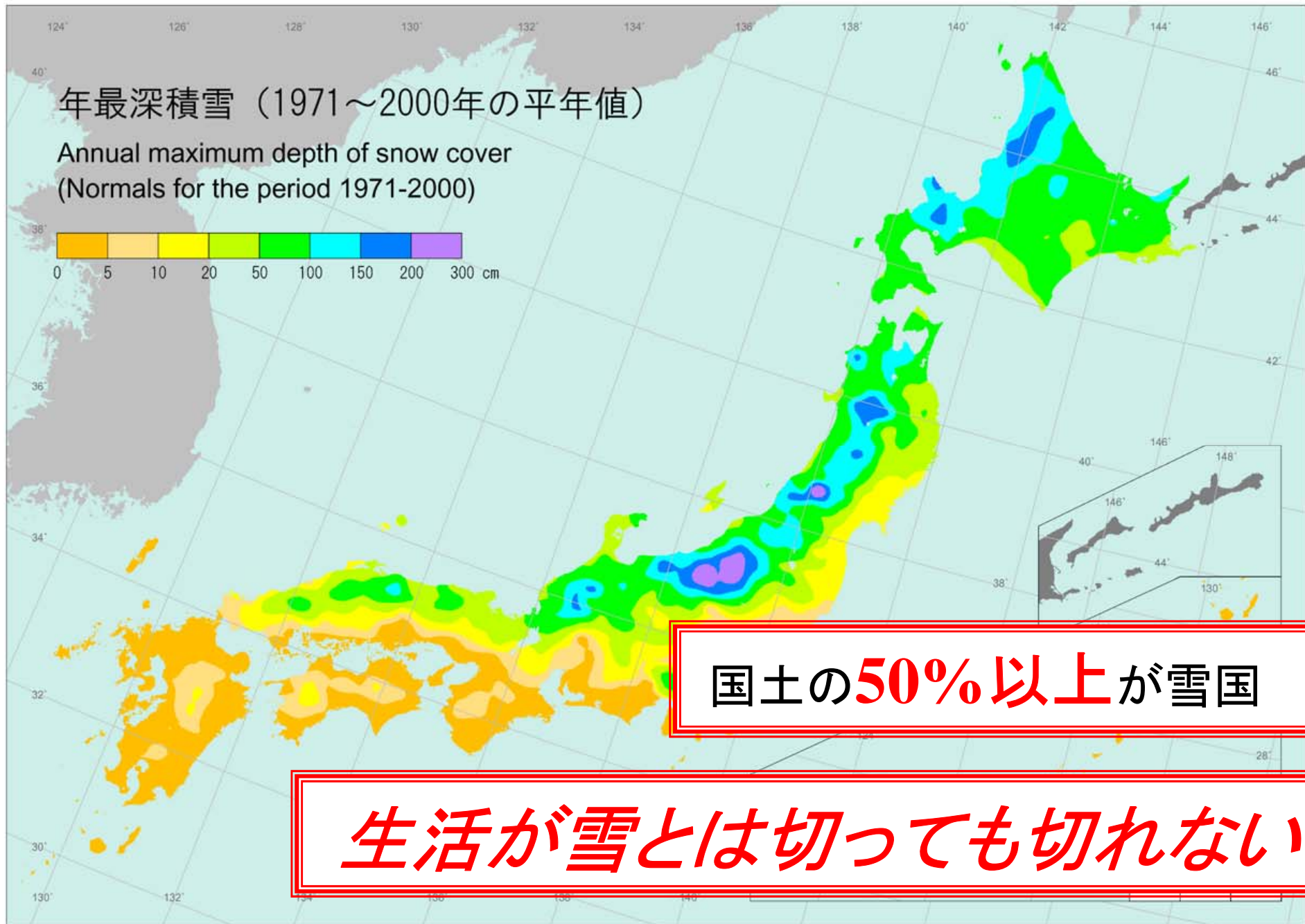


GOES-VIS, IR 2004. 1. 15 13JST

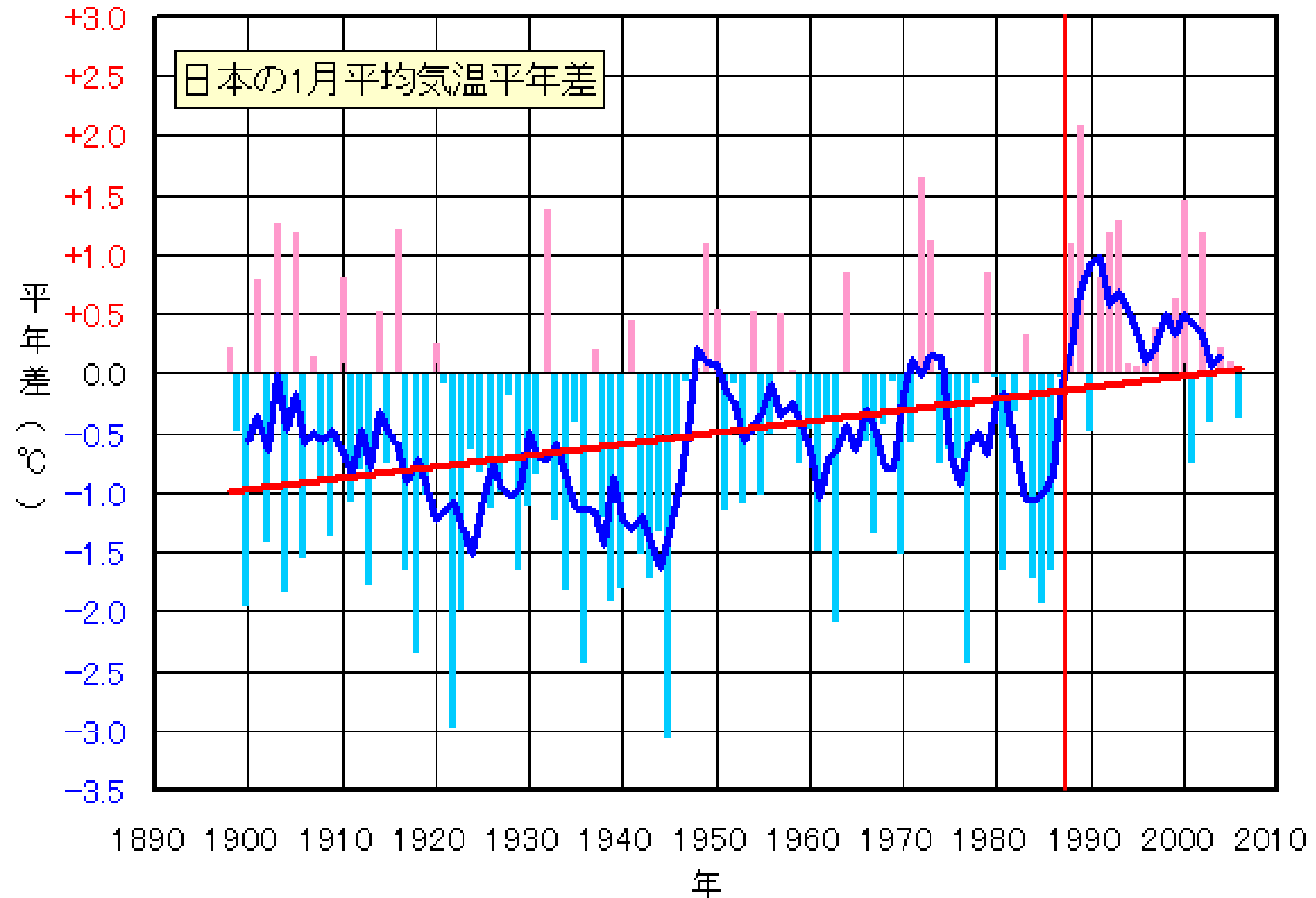
<http://weather.is.kochi-u.ac.jp/FE/00Latest.jpg>



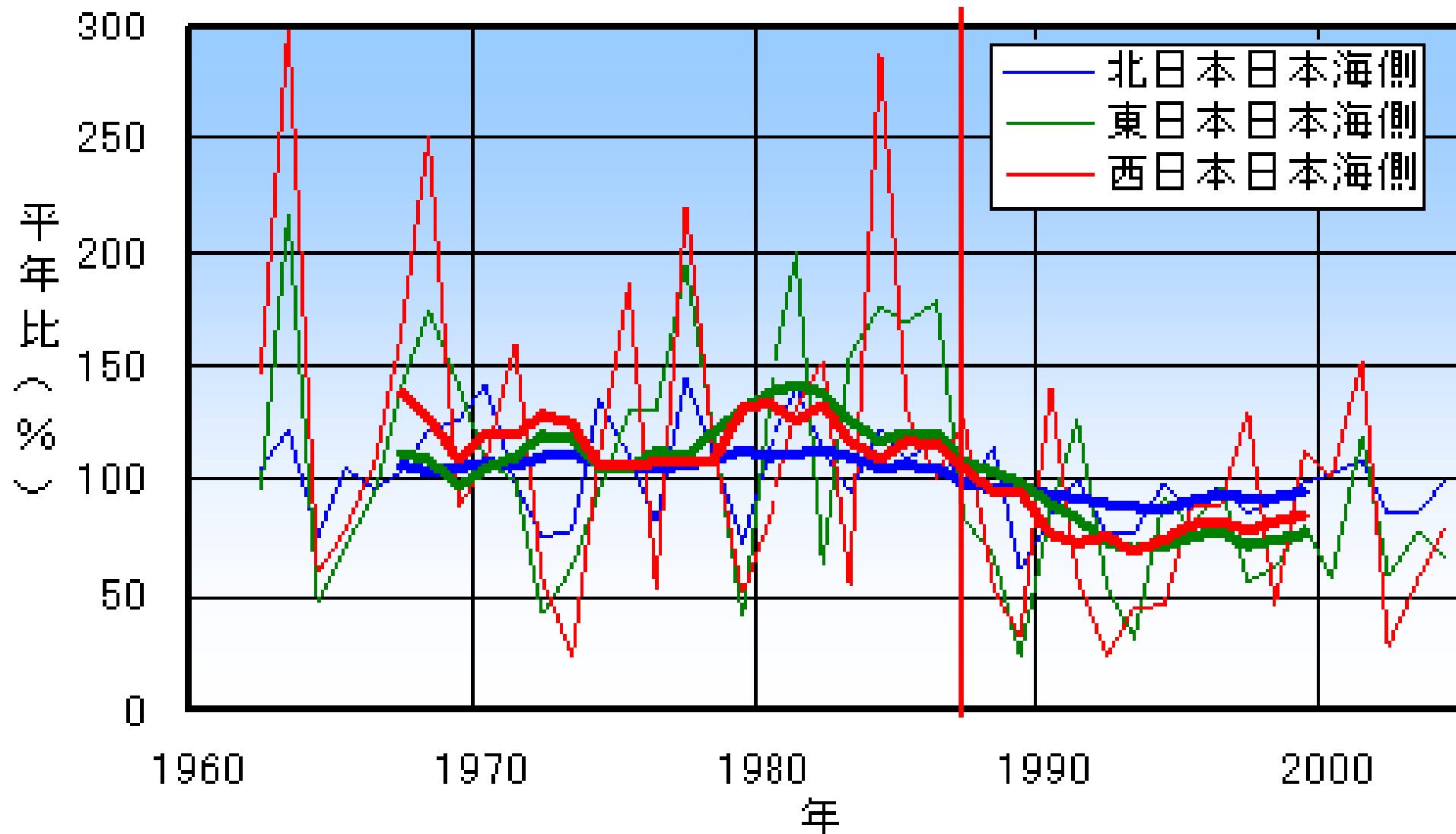
生活と雪との関わり



1890年から2006年における日本全体の1月平均気温の変化傾向



日本海側の最深積雪平年比の経年変化 1960→2005



過去80年のシベリア高気圧の変動

1980年代後半から、ユーラシア大陸の温暖化によりシベリア高気圧が弱まり、日本海側の冬の雪が急激に減少！

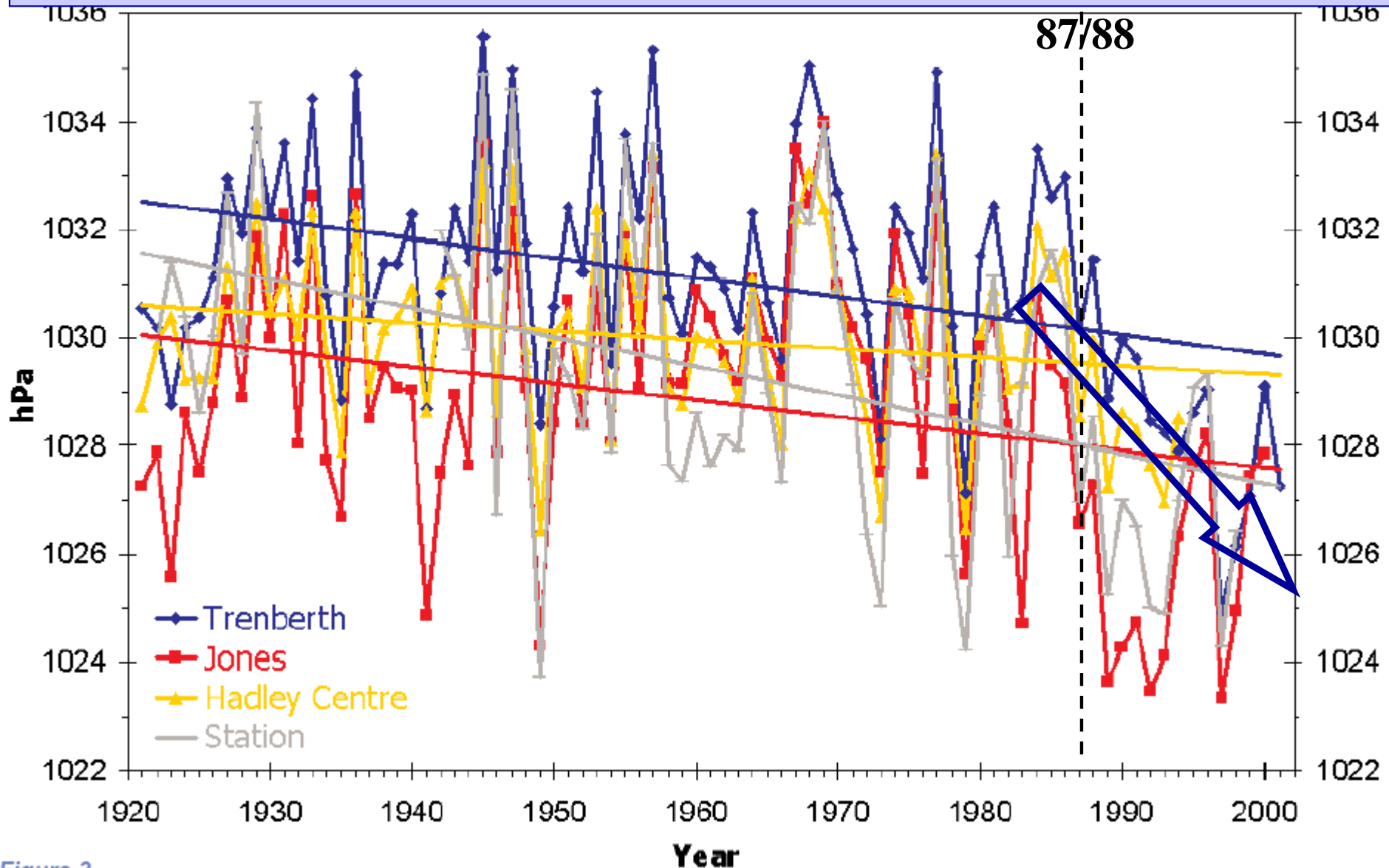


Figure 3



世界各地の冬季気温と積雪(降水)量の関係

•北陸地域はぎりぎりの気温条件で降水が雪となっている世界でも珍しい地域である。

•北陸地域の冬季降水量(積雪水量)変動は気温が低い(高い)ほど多い(少ない)という世界でも特異な特性を示している。

⇒
「温暖化」により、冬季季節風も弱まると、積雪も降水も同時に減少する！。

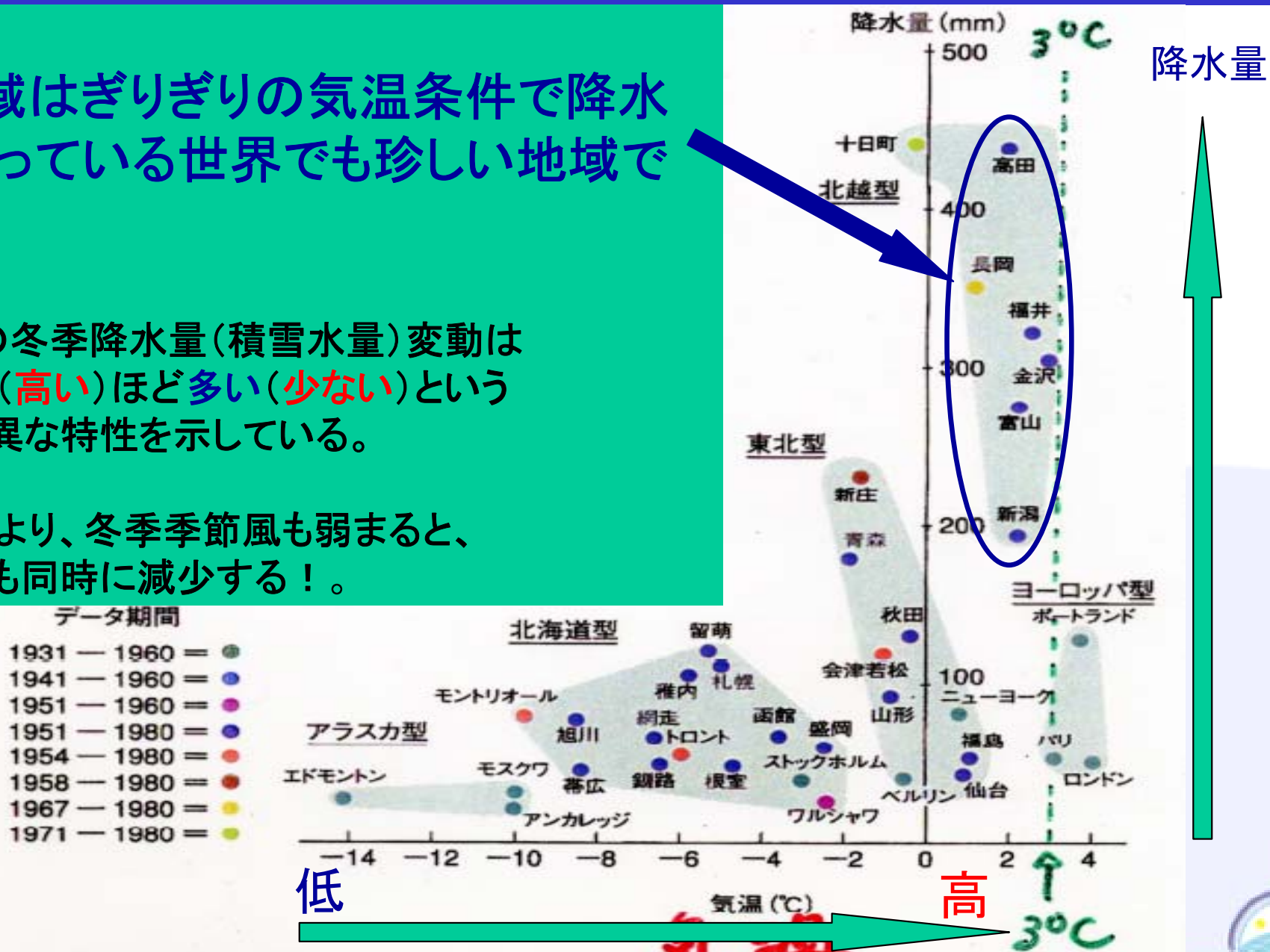
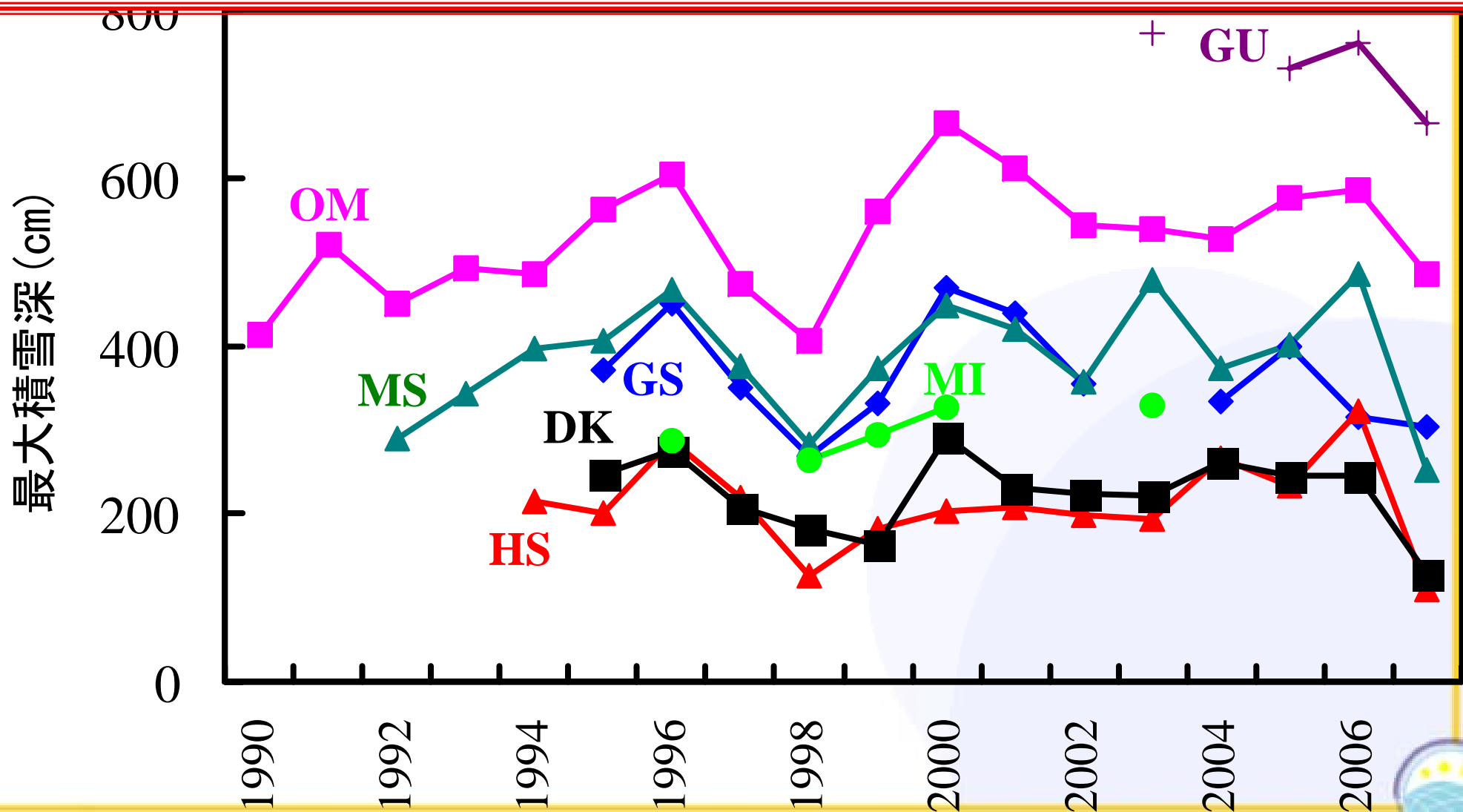


図 I 世界各地の1月の平均気温と降水量(原田ほか、1988)



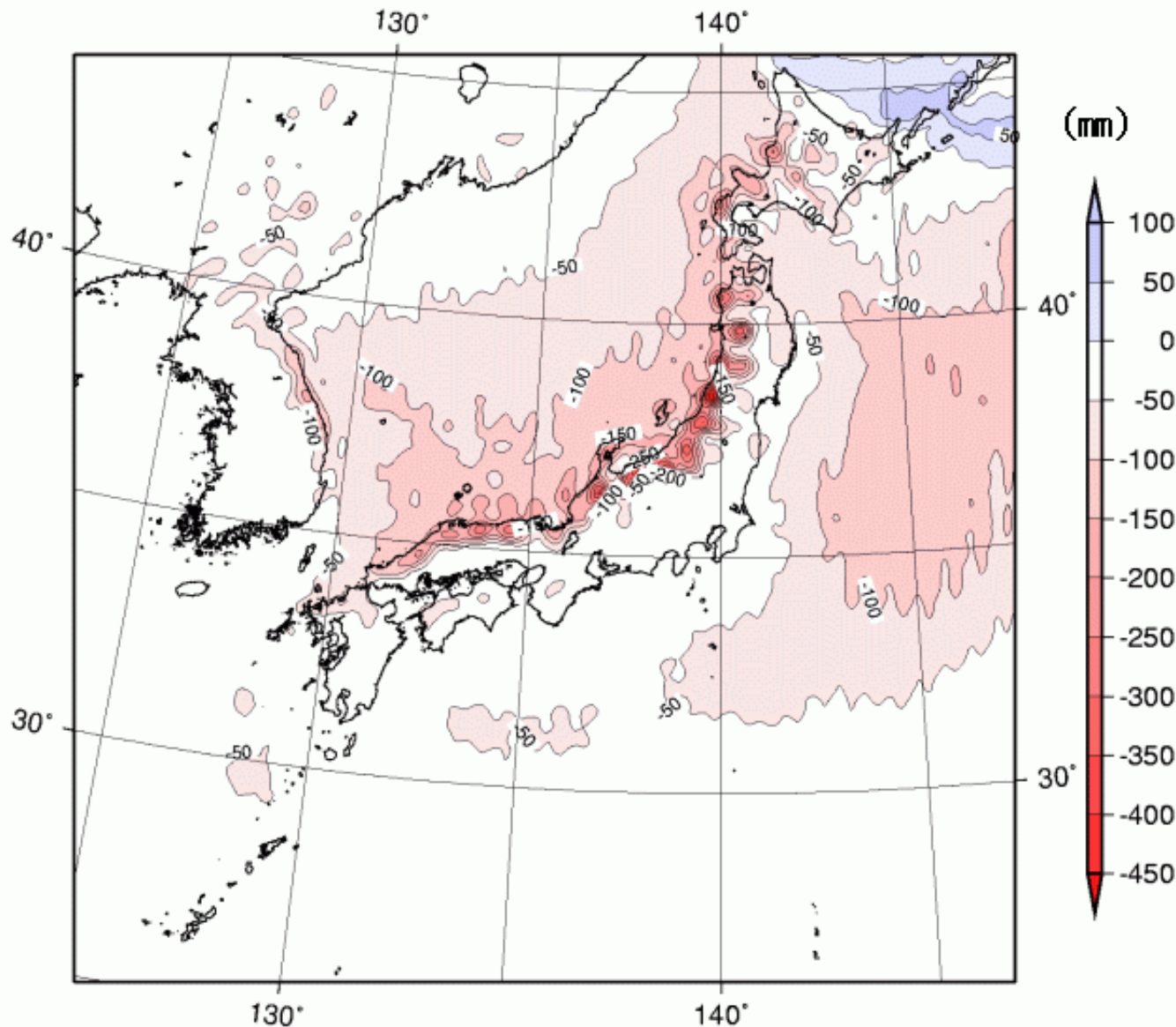
では、山の雪は減っているのか？

現在のところ、それほど大きな減少傾向はみられないが、.....



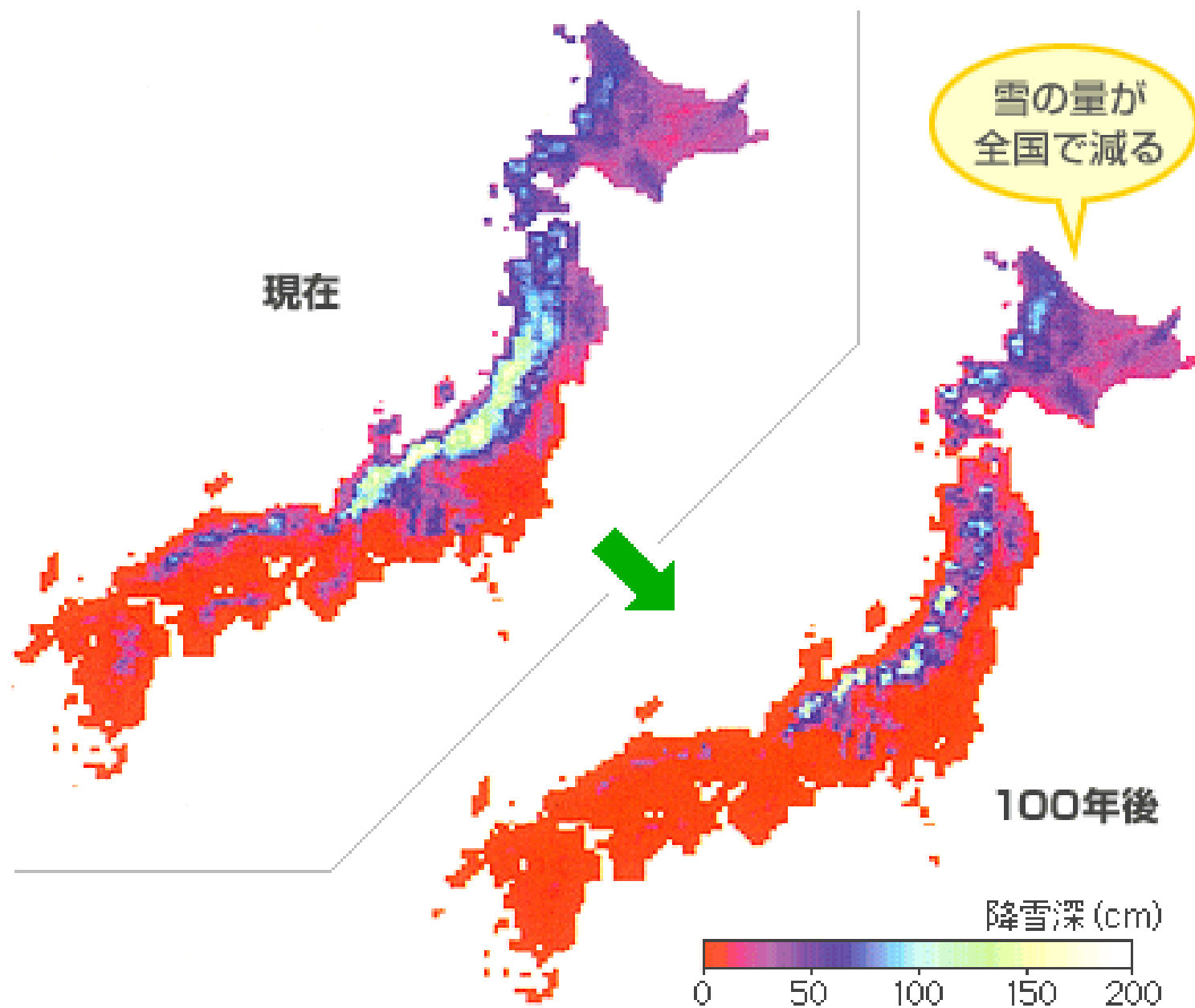
約100年後の年降雪(水)量の変化量予測(mm) (A2シナリオ)の予測結果。(2081~2100)-(1981~2000)

寒気団の弱まりで、山間部の降雪量も減少！



「温暖化」に伴う2100年における日本の冬の積雪深の予測

http://www.erca.go.jp/ondanka/stop/images/d_02.gif



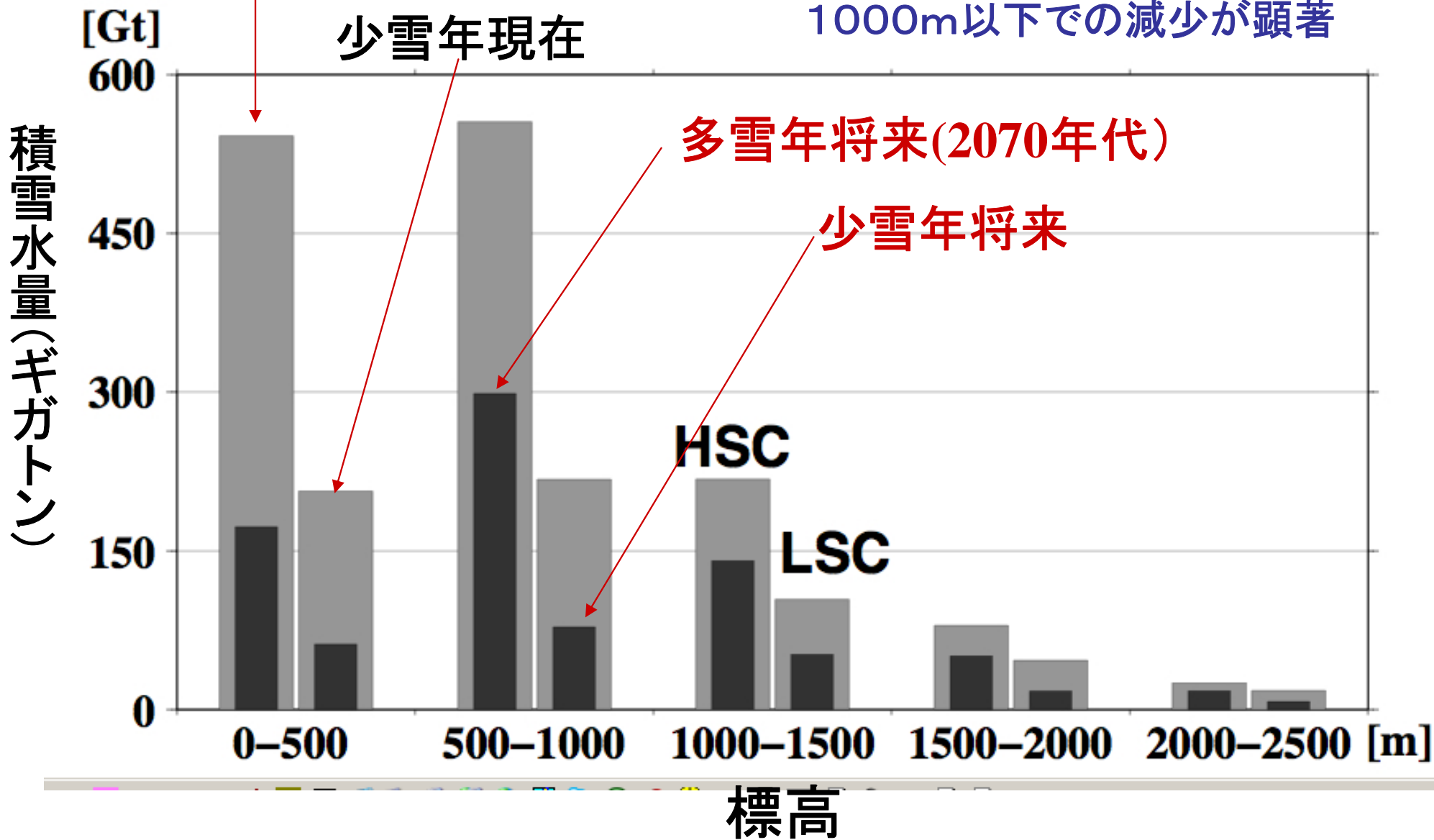
「地球温暖化」の気温変化予測をもとに、領域気候モデルを用いた日本列島の標高別の総積雪水量の将来予測

Yoshikane et al., 2008

多雪年現在

少雪年現在

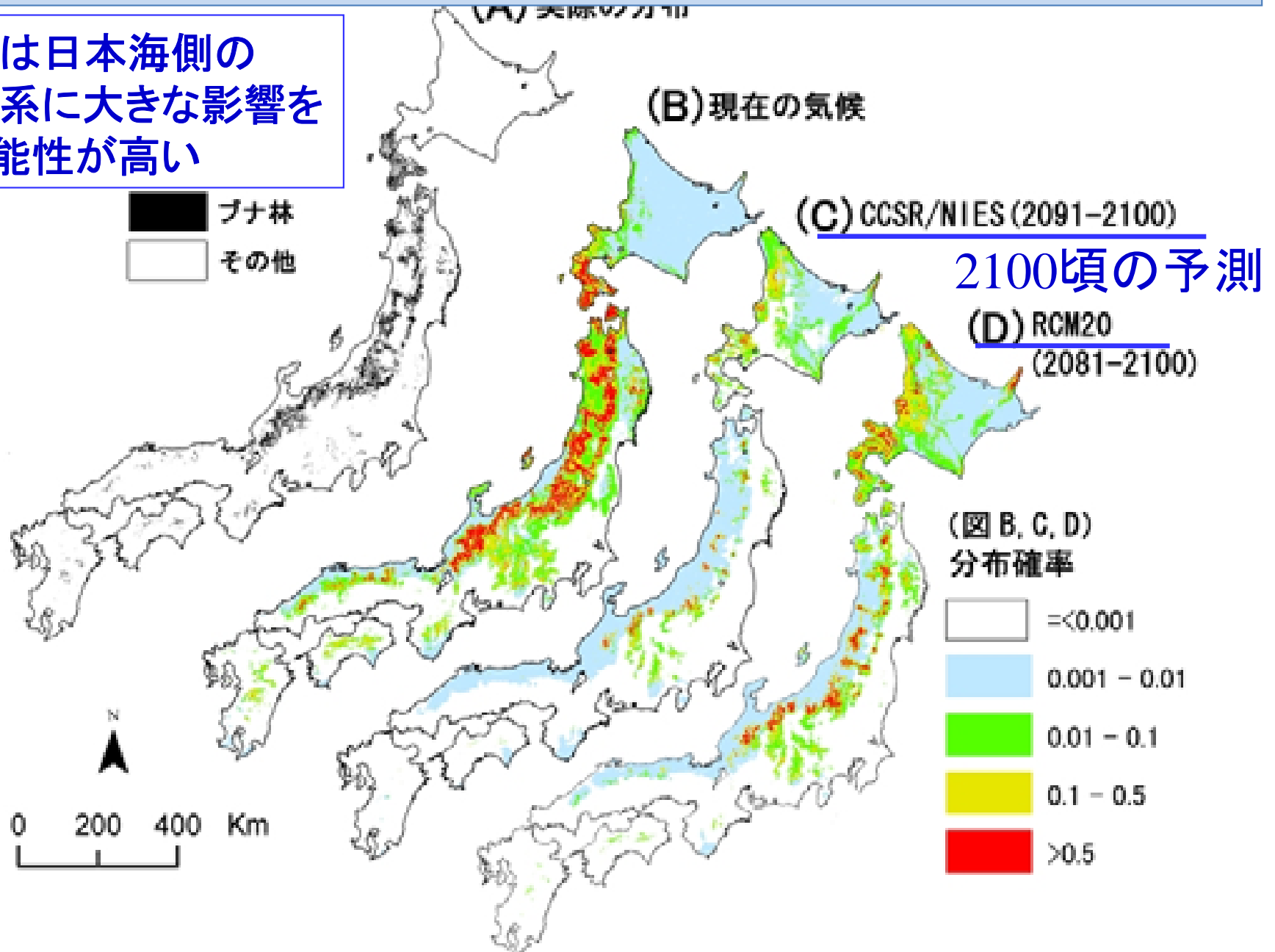
1000m以下での減少が顕著



温暖化による日本のブナ林の変化の予測

(松井・田中他、2006、森林総研報告)

積雪減少は日本海側の森林生態系に大きな影響を与える可能性が高い



まとめ 1: 「地球温暖化」に伴うアジアの降水量変化の予測と過去数十年の傾向

- ◎「地球温暖化」により全球的降水量増加やアジアモンスーン降水量増加の傾向。しかし、全球的な観測データの不足もあり、まだ観測からは検出されていない。
- ◎熱帯と中緯度・高緯度では増加傾向
- ◎亜熱帯と内陸の乾燥地域はさらに乾燥傾向
⇒雨の多いところはさらに多く、少ないところはさらに少なくなる？
- ◎強い雨が増加し、弱い雨は減少⇒過去の観測でもその傾向
- ◎中国・インドでは過去数十年、無降水日が増加する一方、強雨・豪雨の日度が増加している。
- ◎ヒマラヤ・チベット地域の気温・降水量は増加傾向？ 過去30—40年は増加地域と減少地域が対照的に分布
- ◎チベット・ヒマラヤの氷河は、大半が縮小傾向。氷河湖は増大傾向（気候変化との関連はまだ明らかでない）
(気温変化予測に比較し、降水量変化予測はモデルの不確定性が大きい)

まとめ II: 日本の過去100年の降水の変化と、 「地球温暖化」に伴う変化予測

- ◎日本では1960年頃から総降水量は減少傾向を示すが、年々の変動度も増大している。)「地球温暖化」に伴う予測で、同様の傾向をしているモデルもあるが、モデル間のばらつきも大きい。。
- ◎過去100年間、強い雨が増加し、弱い雨は減少。近年(1980年～)ほどその傾向は強くなっている。夏(梅雨)の降水量増加傾向は地域によりかなり異なる?「地球温暖化」に伴う予測でも、同様な変化を示している。
 - ⇒梅雨前線がどう変化するかに関強く依存する
- ◎冬季の季節風・寒気団の南下は、1980年代以降、急激に弱まり、暖冬傾向が続き、日本海側の降・積雪は大幅に減少している。
 - 「地球温暖化」に伴う予測でも、同様の予測を示している。
 - ⇒日本の水資源や生態系・農業にとって重大な影響を与える可能性あり
- 地球水循環変化の予測には、現象のさらなる理解と、高精度高解像の気候モデルが必要



水資源確保・水災害防止の視点からみた 21世紀の降水変化の特性と課題

降水の気候予測はまだまだ不確定性が大きく、さらに研究が理解が必要。しかし、人間活動に与える影響は、気温変化よりも大きく、降水量変化のメカニズムと予測の研究は重要である。

- 梅雨期は増加の可能性もあるが、年降水量は減少か増加か微妙？
- 干ばつと洪水(豪雨)の頻度が共に大きくなる可能性
⇒夏季降水量変化の予測は非常に難しい
(梅雨前線のわずかな位置のちがいで大きく傾向は変わる)
- 冬季の積雪による水資源の激減の可能性
⇒山岳地域での変化の量的予測・推定が重要？