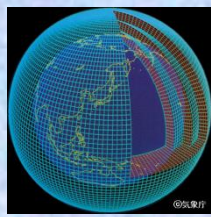
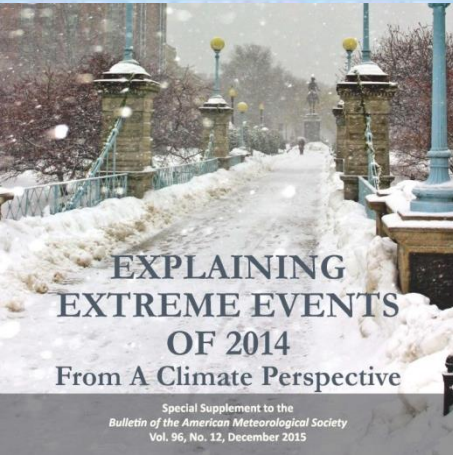
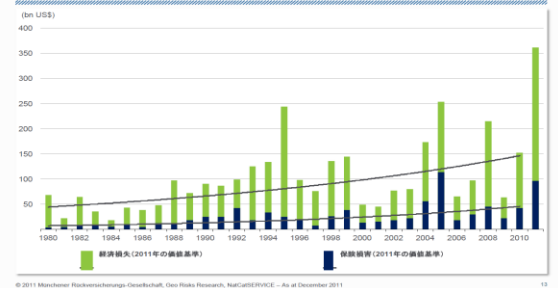
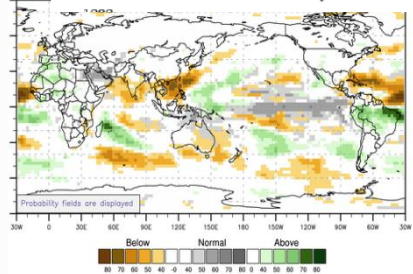
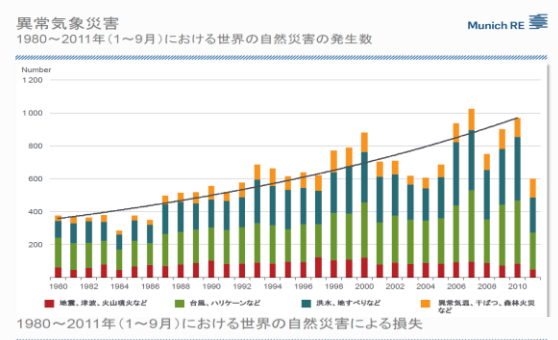
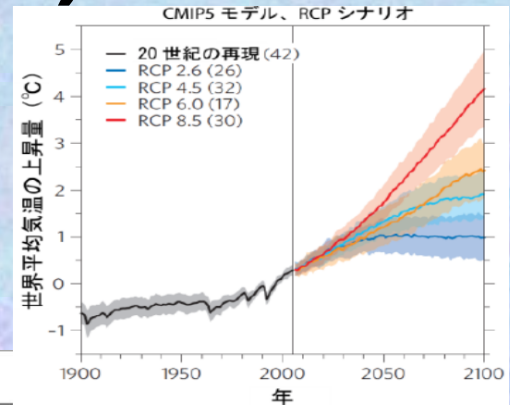


イベント・アトリビューション (EA) について



木本 昌秀
東京大学大気海洋研究所

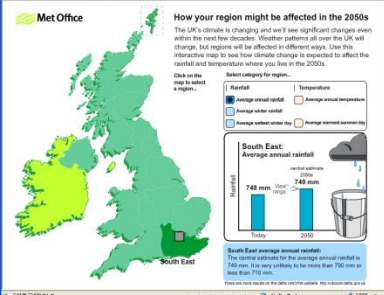
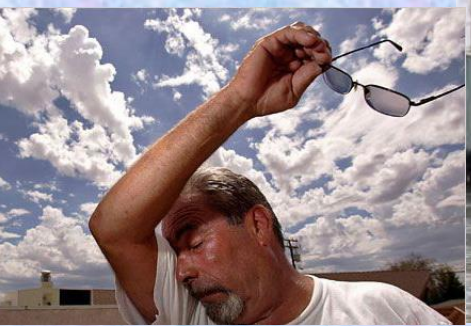


従来手法 実際の降水量 4 次元変分法

0~3 時間先の予報

3~6 時間先の予報

CTL: Cartridge Tape Library system
Magnetic Disk system
PN Cabinets (320)
IN Cabinets (45)
Electromagn
Double Floor f
Air Conditioning system
Power Supply sy



「異常気象の考え方」

© APEC Climate Center

0. 温暖化の基本事項確認

地球は温暖化している

Qori Kalis Glacier, Peru



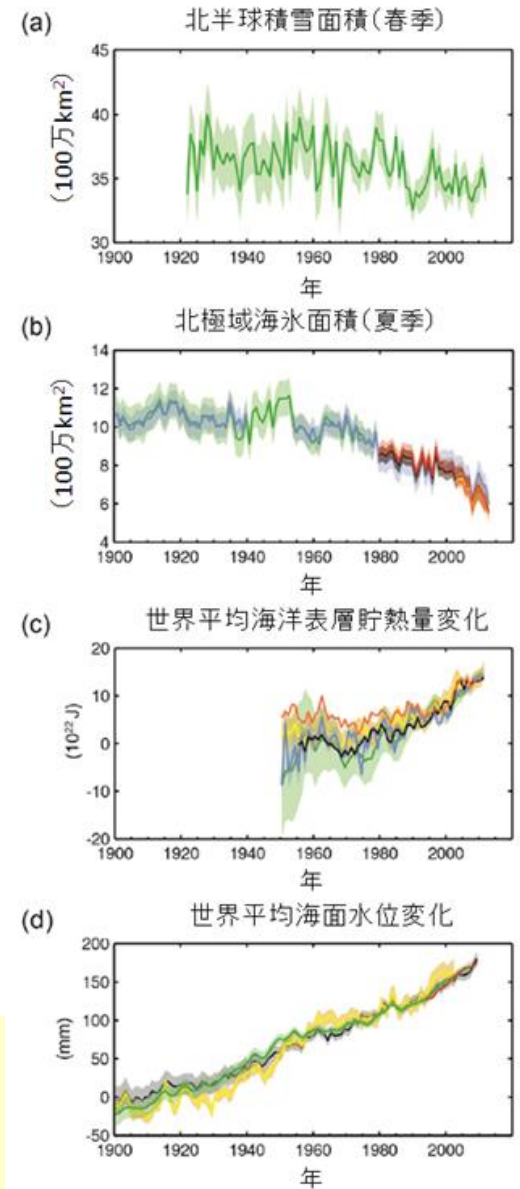
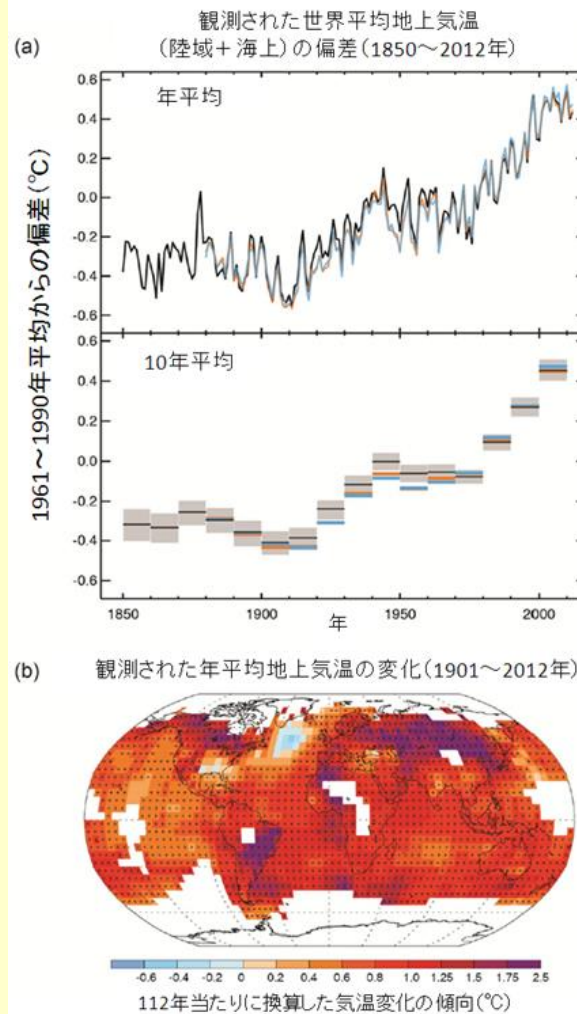
1978



2002

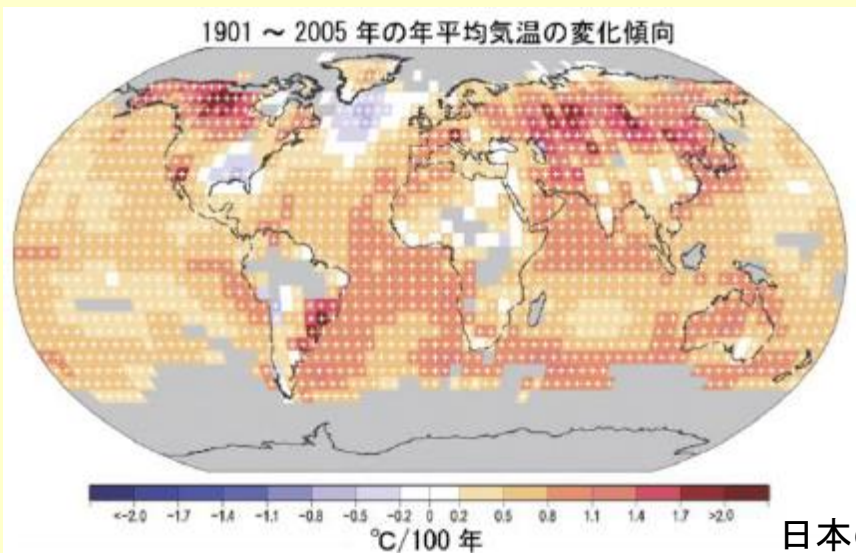
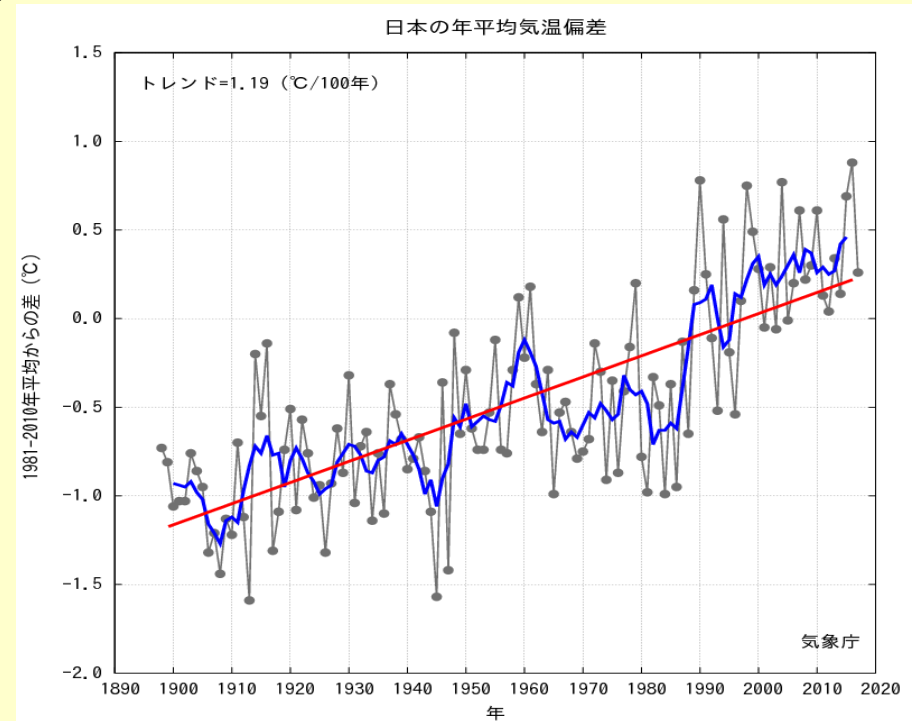
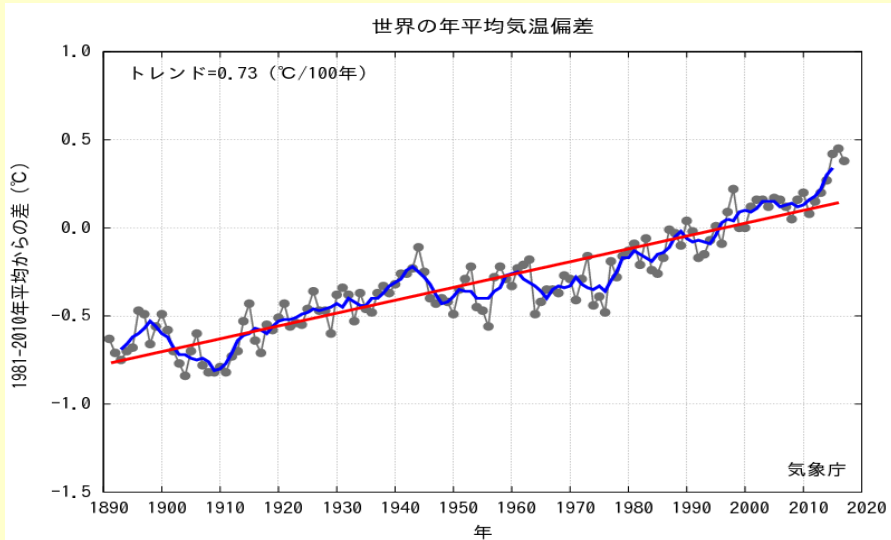
Photo credit: Professor L. Thompson

Source: [ScrippsNews](http://scrippsnews.com)



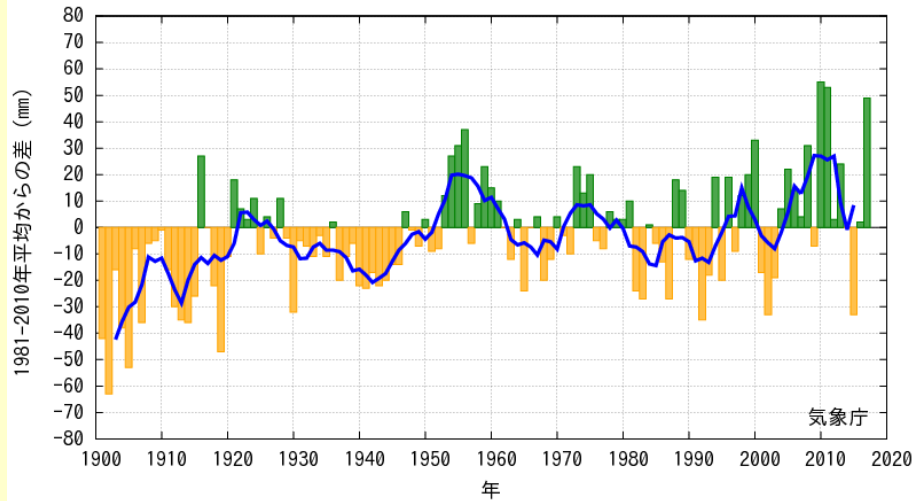
IPCC AR5 SPM (2013)

年平均気温1891-2017

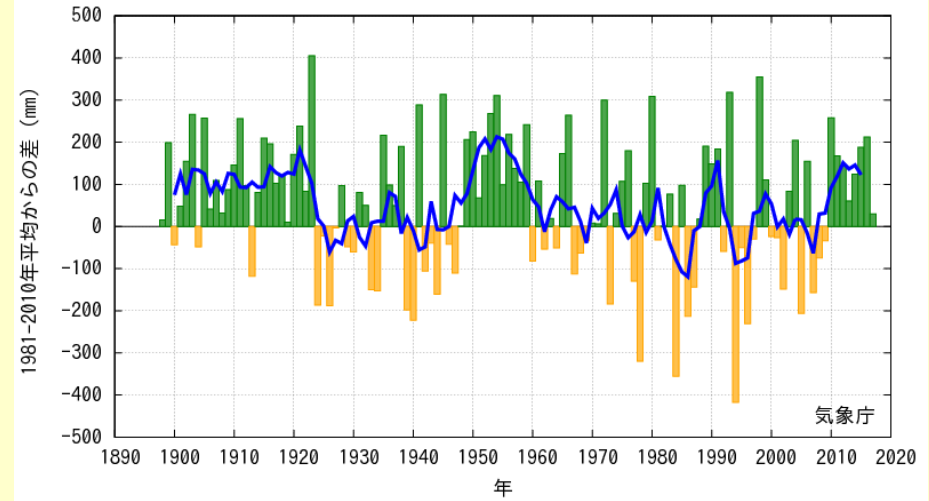


年降水量1901-2017

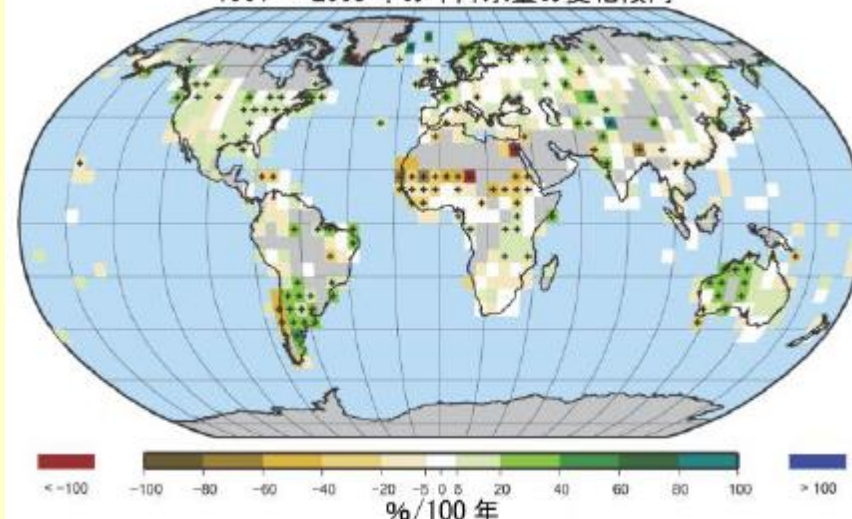
世界の年降水量偏差



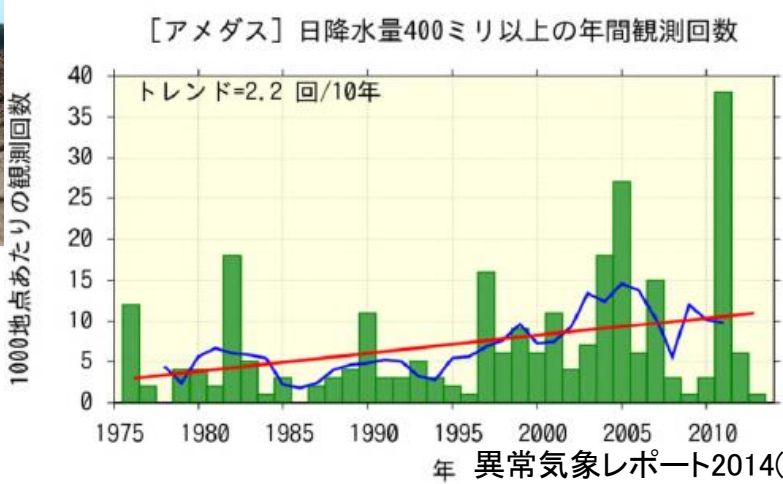
日本の年降水量偏差



1901 ~ 2005 年の年降水量の変化傾向



Some of the changes in extreme weather and climate events observed since about 1950 have been linked to human influence



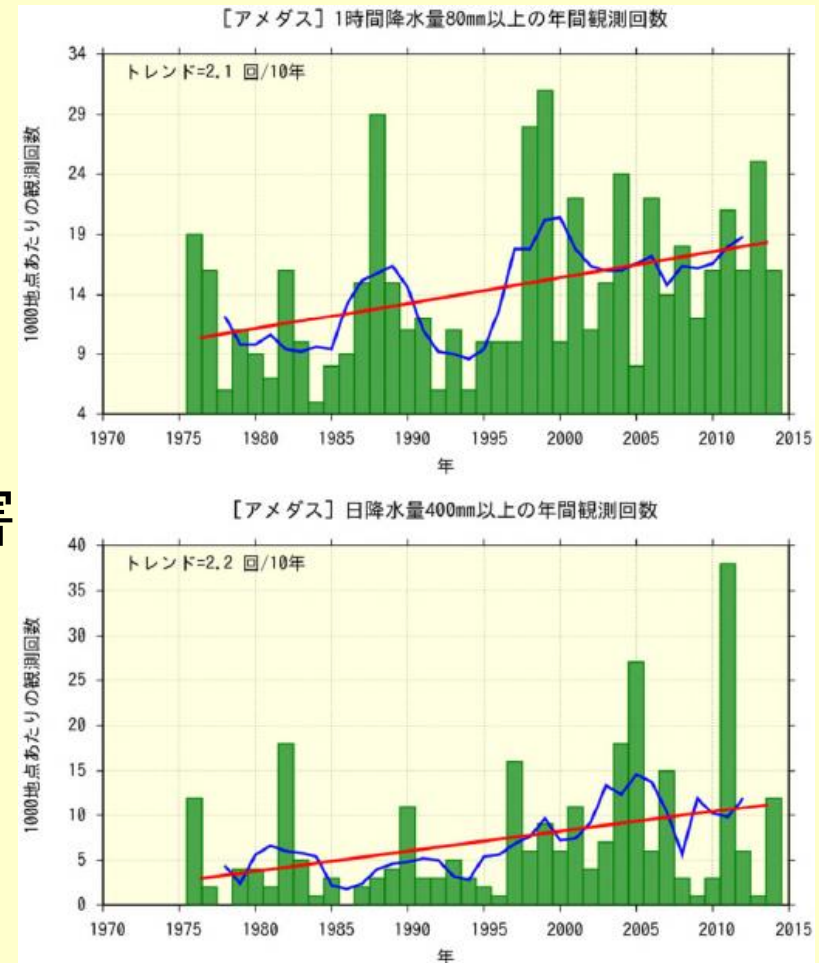
AR5 WGI SPM

温暖化に伴い、極端気象の増加が予測されている

実況もこれを裏付け：

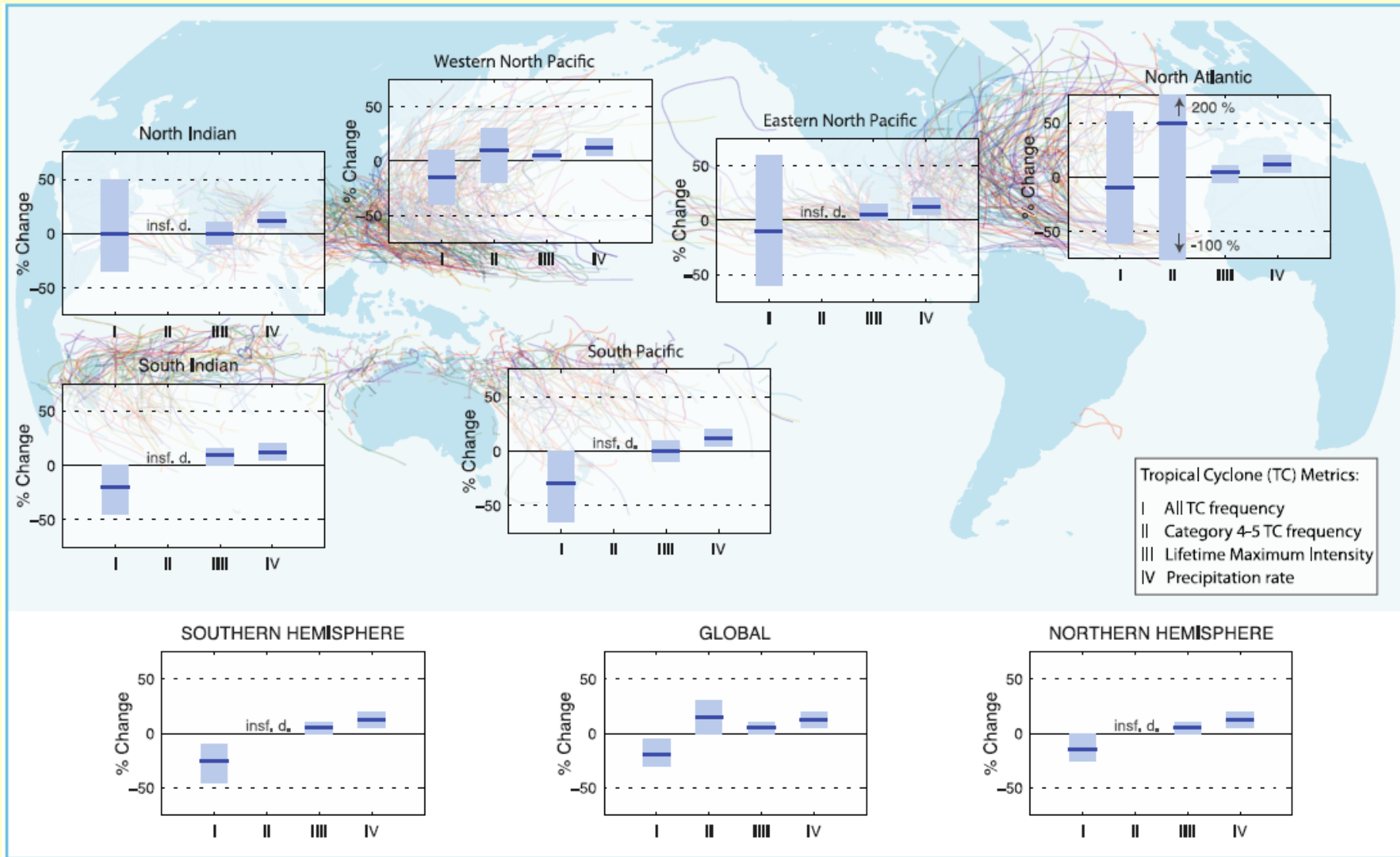
- 2008年7月都賀川鉄砲水、
- 同 8月豊島区下水増水
☆「ゲリラ豪雨」
- 2013年10月大島土砂災害
- 2013年7月、11月秋田土砂災害
- 2014年8月広島土砂災害
- 2015年9月鬼怒川決壊
等々々

cf. 温暖化適応計画閣議決定(H27.11.27)
国交省「水災害分野における気候変動
適応策のあり方について」(H27.8.28)
国連防災会議仙台宣言(H27.3.18)
気候変動適応法案閣議決定(H30.2.20)



気候変動監視レポート2014(気象庁)

熱帶低氣壓



イベント・アトリビューション (EA)

これは温暖化のせいですか？

- 現在の異常気象に対する温暖化の寄与を確率的に特定
- 世界的に活発化している新しいタイプの研究、近年の多数のイベントに適用済
- 大気GCMを用いて、「現実的な設定(過去再現)」と「人間活動による温暖化が無い設定(非温暖化実験)」で大量のアンサンブル実験を行う。
- 目の前の異常気象イベントの発生確率が、人間活動によって、どれだけ変わっていたか？



EXPLAINING
EXTREME EVENTS
OF 2013

From A Climate Perspective

Special Supplement to the

Bulletin of the American Meteorological Society

毎年イベントに対する成果を出版
(米気象学会特別レポート)



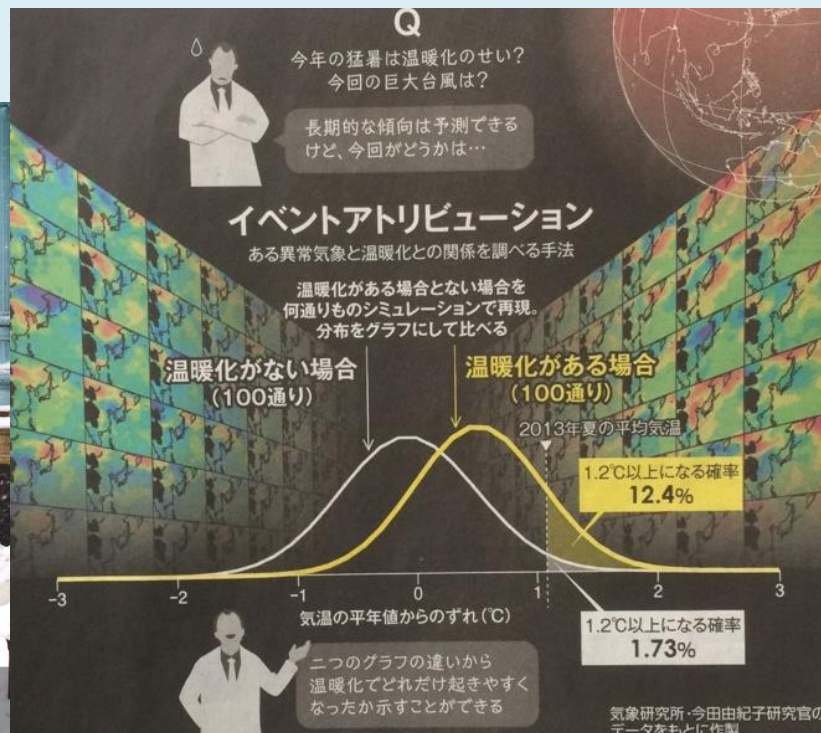
EXPLAINING
EXTREME EVENTS
OF 2014

From A Climate Perspective

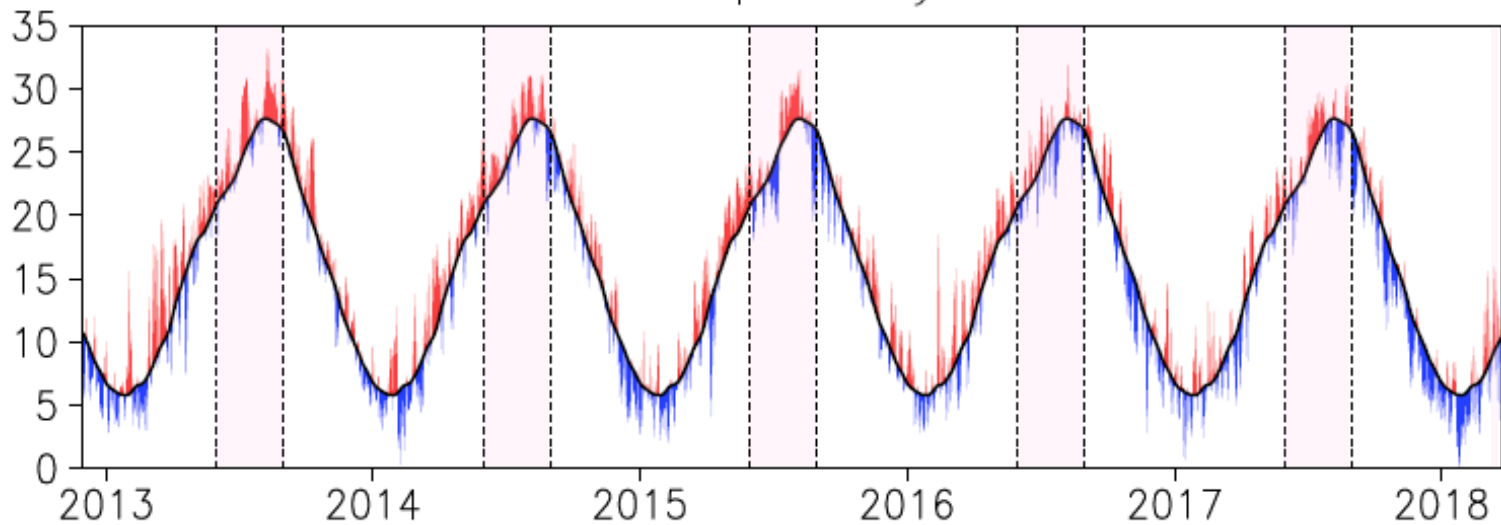
Special Supplement to the

Bulletin of the American Meteorological Society

Vol. 96, No. 12, December 2015



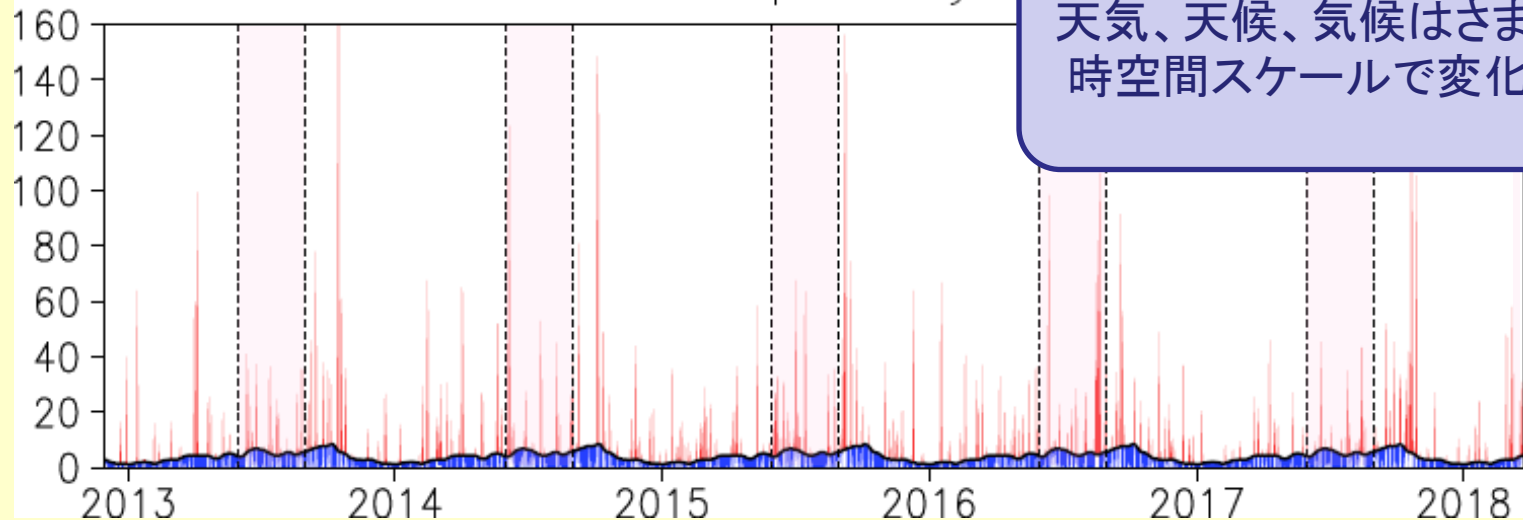
Temp Tokyo



6-8月

東京の日平均気温(上)、日降水量(下)
黒実線は平年値

Precip Tokyo



天気、天候、気候はさまざまな
時空間スケールで変化する。

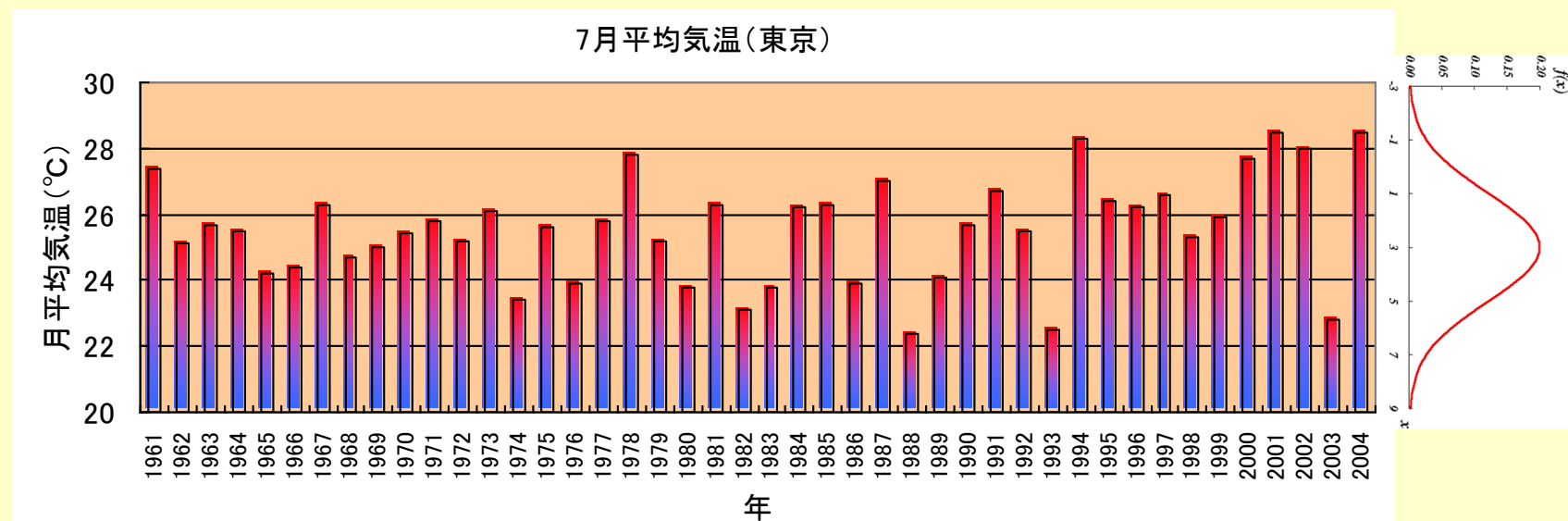
本日のキーワード

- 確率
- リスク
 - risk; 危険
 - ある行動に伴って(あるいは行動しないことによって)、危険に遭う可能性や損をする可能性を意味する概念(Wikipedia)
- 胴元必勝則

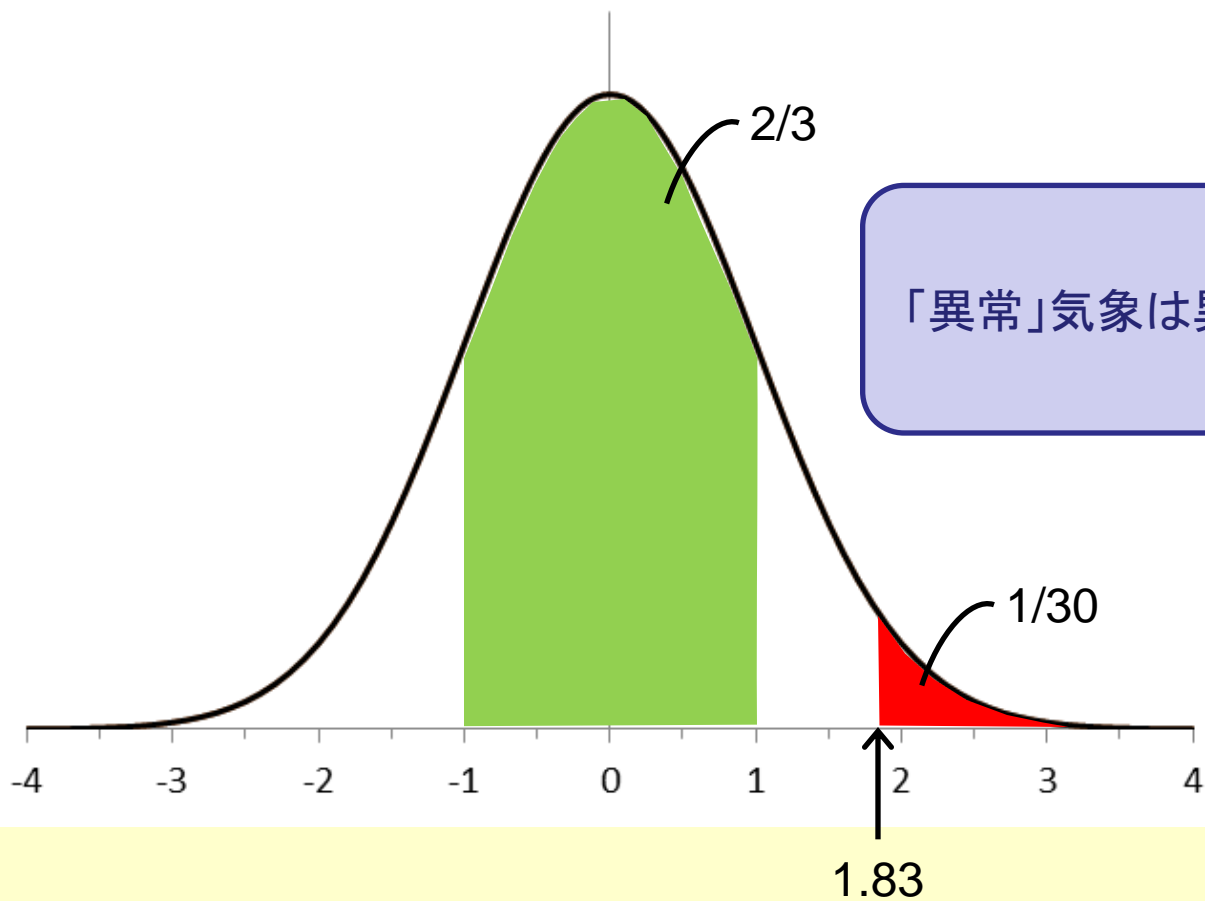
「異常気象」とは. . .

その地点、季節として出現度数が小さく平常的には現れない現象または状態。統計的には30年に1回以下の出現率の現象。

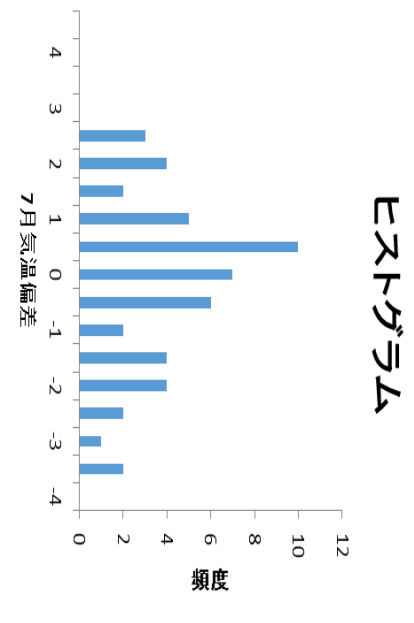
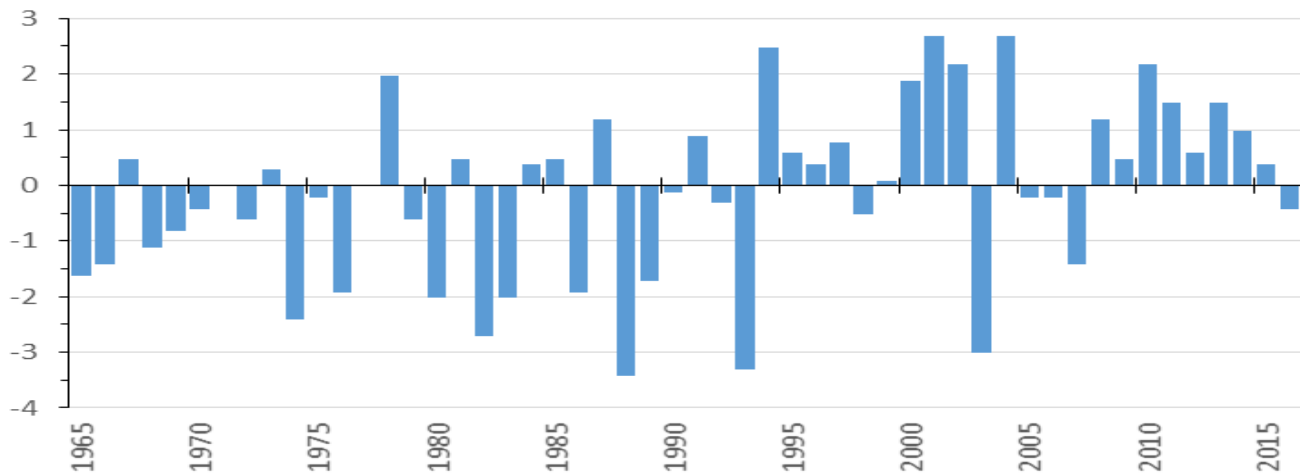
(気象庁)



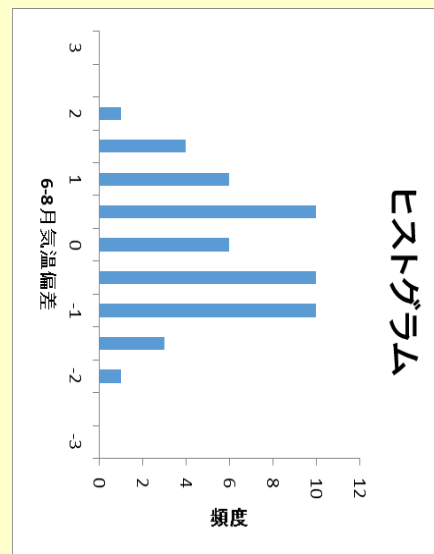
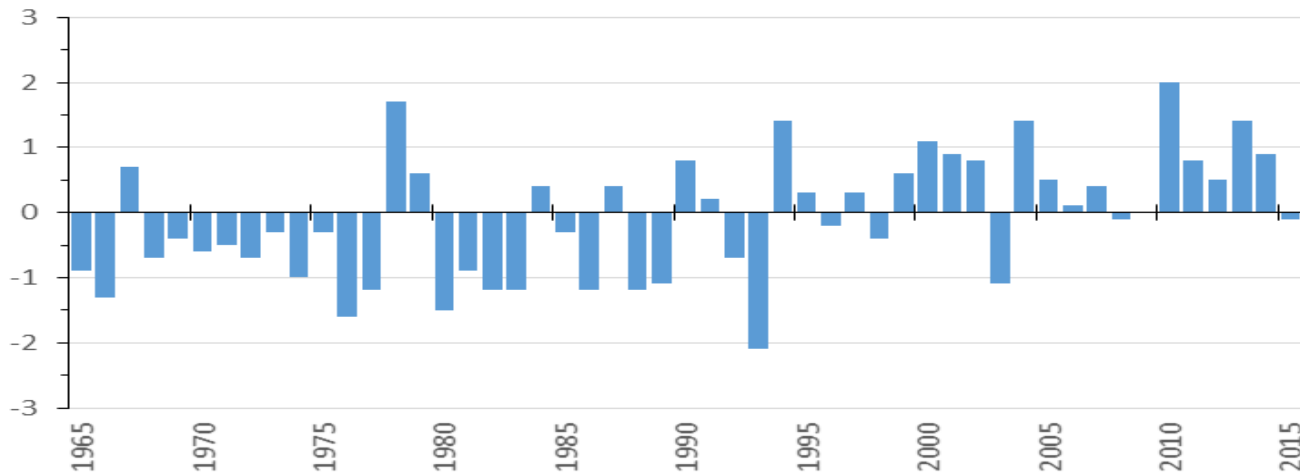
正規分布



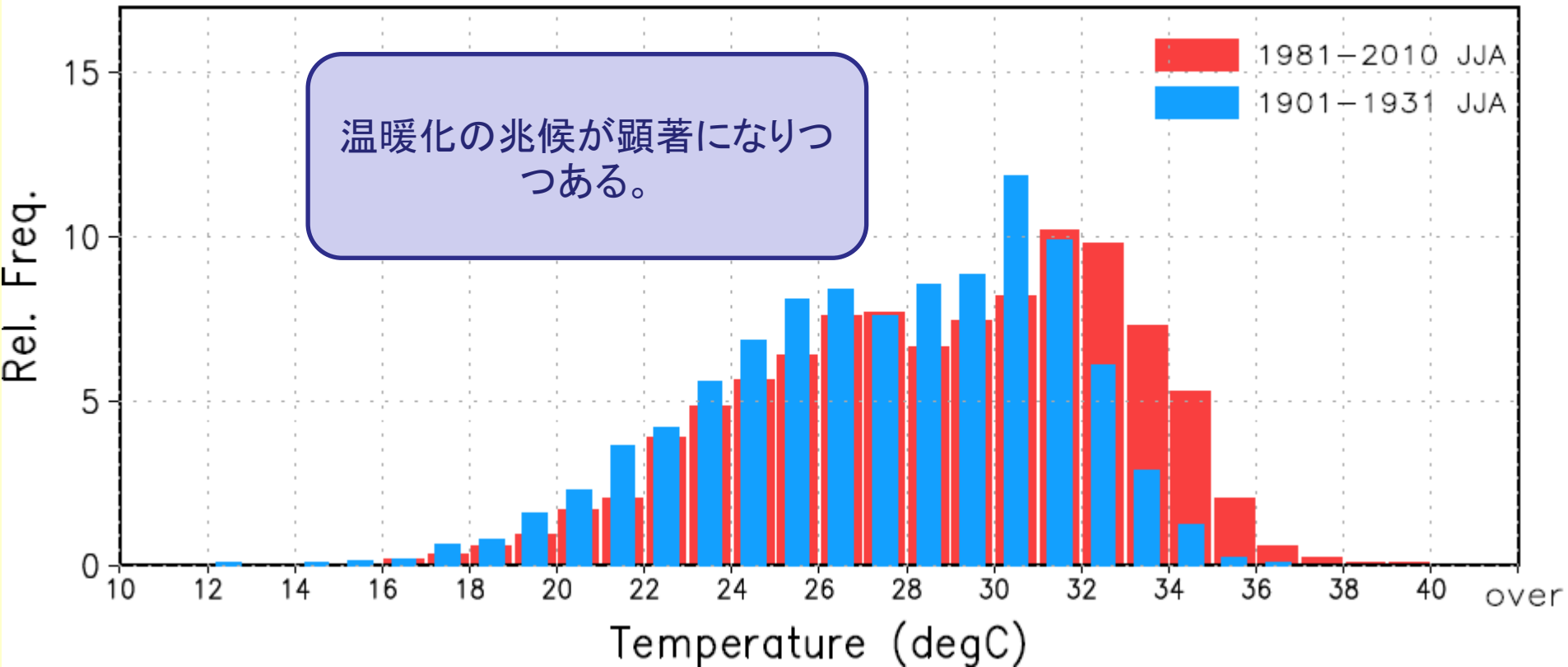
July Temp Tokyo



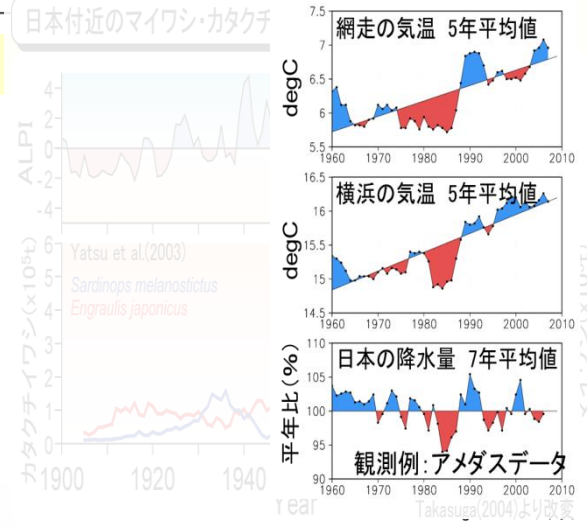
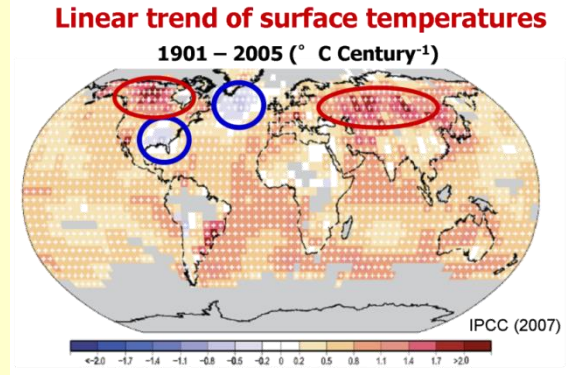
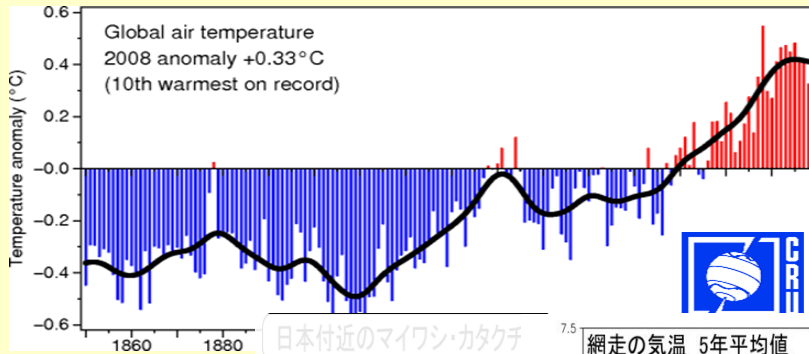
JJA Temp Tokyo



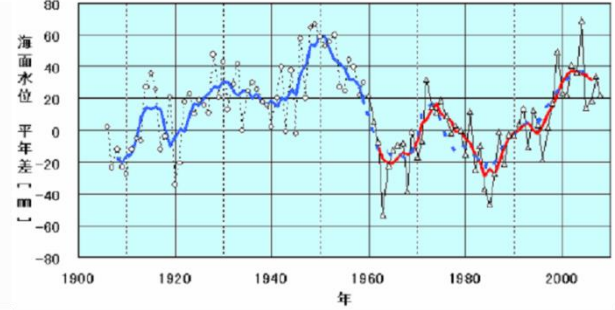
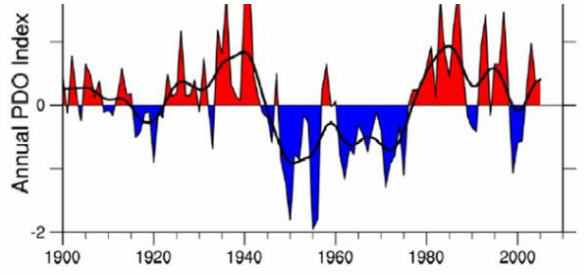
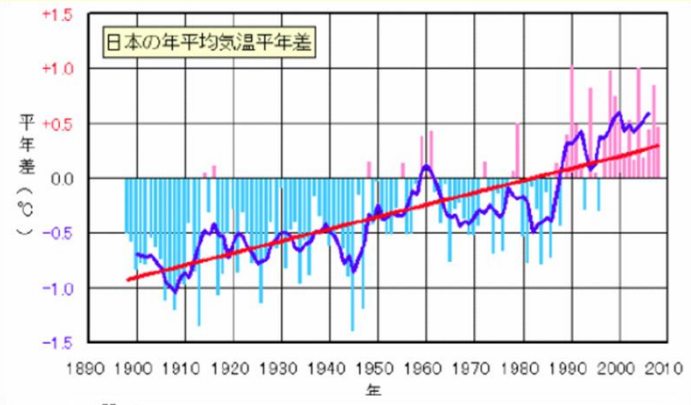
東京の夏季日最高気温ヒストグラム 近年(赤)と20世紀初頭(青)



気候変動＝強制＋自然変動



Mixture of internal variability and forced climate change



Pacific Decadal Oscillation (PDO) 気候の十年規模変動

長期予報



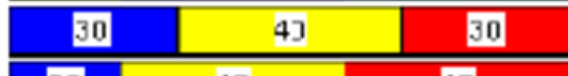
<向こう3か月の気温、降水量の各階級の確率(%)>

【気温】
[東日本]

3か月



6月



7月



8月



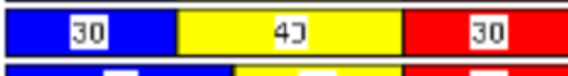
【降水量】

[東日本太平洋側]

3か月



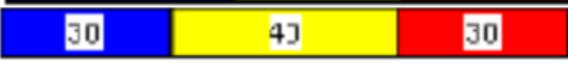
6月



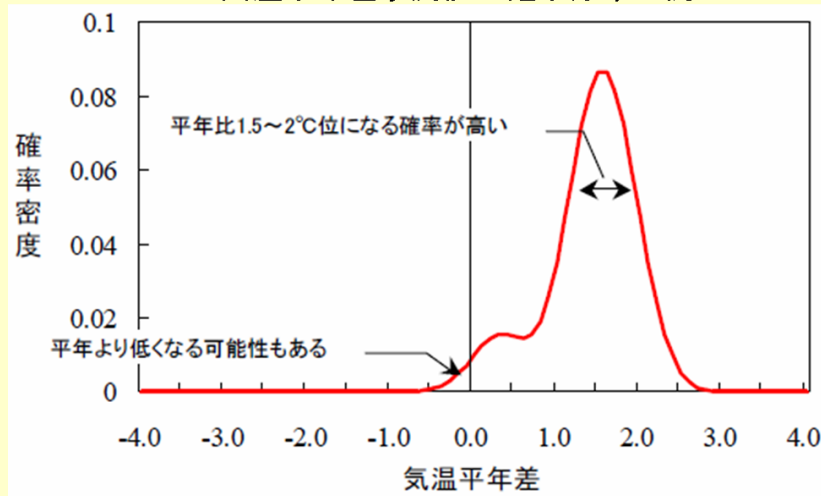
7月



8月

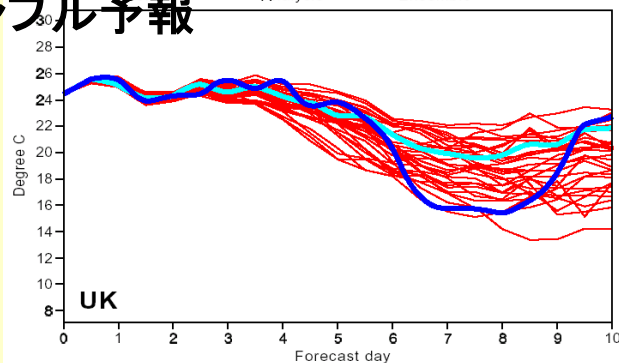


気温平年差予測値の確率分布の例

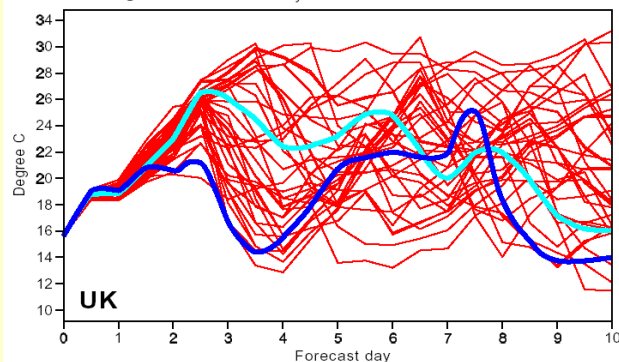


アンサンブル予報

ECMWF ensemble forecast - Air temperature
Date: 26/06/1995 London Lat: 51.5 Long: 0



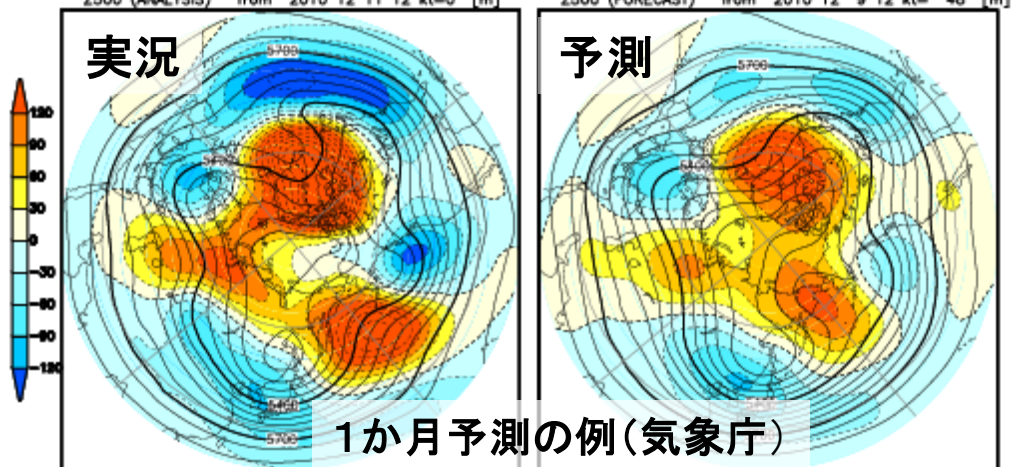
ECMWF ensemble forecast - Air temperature
Date: 26/06/1994 London Lat: 51.5 Long: 0



Z500 (ANALYSIS) from 2010 12 11 12 kt=0 [m] Z500 (FORECAST) from 2010 12 9 12 kt= 48 [m]

実況

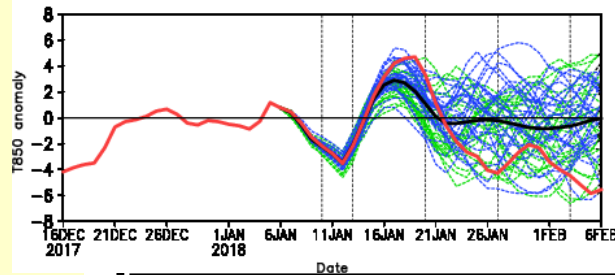
予測



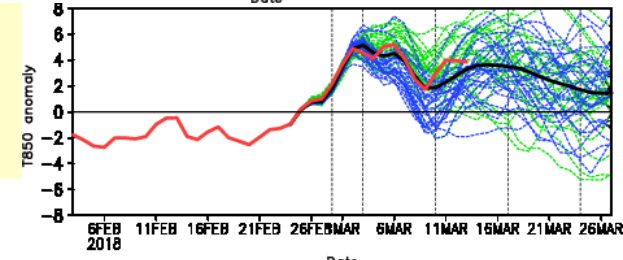
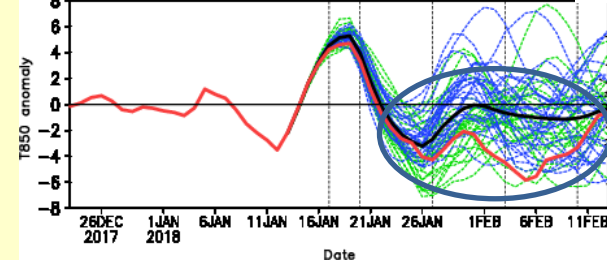
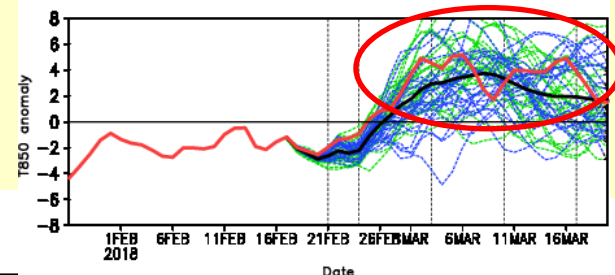
1か月予測の例(気象庁)

今冬の 一か月 予報

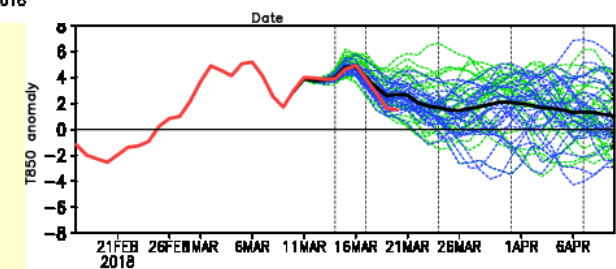
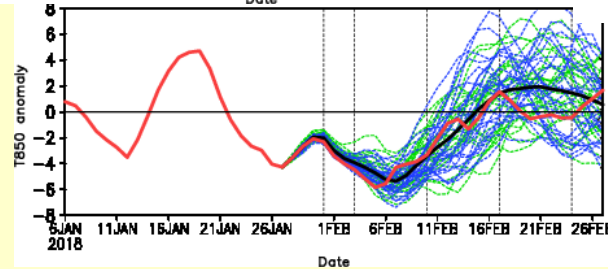
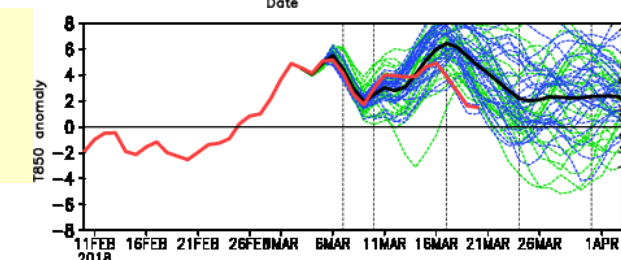
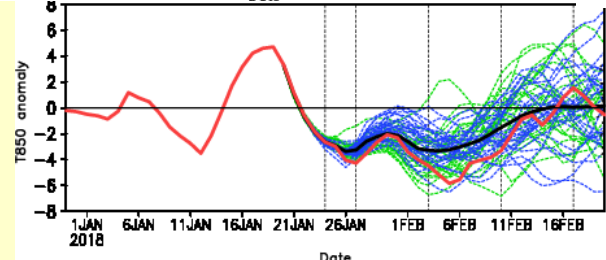
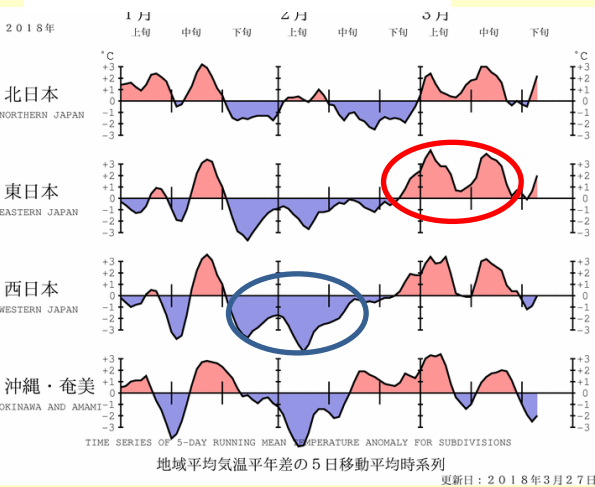
西日本1-2月



東日本2-3月

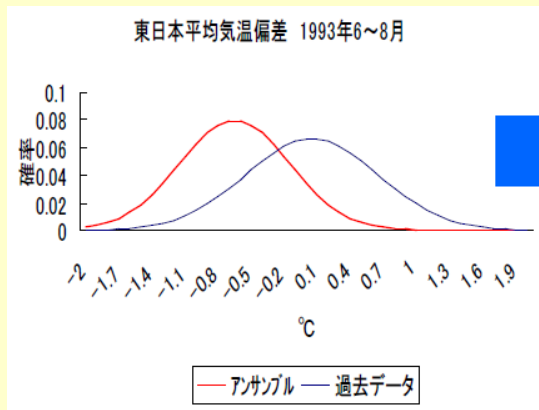


実況地表気温偏差

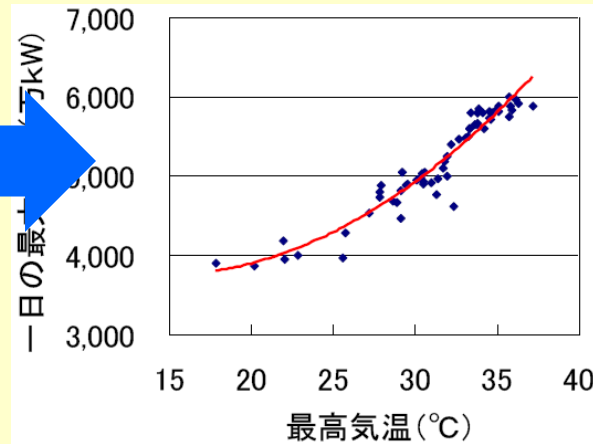


気候(天候)リスク管理

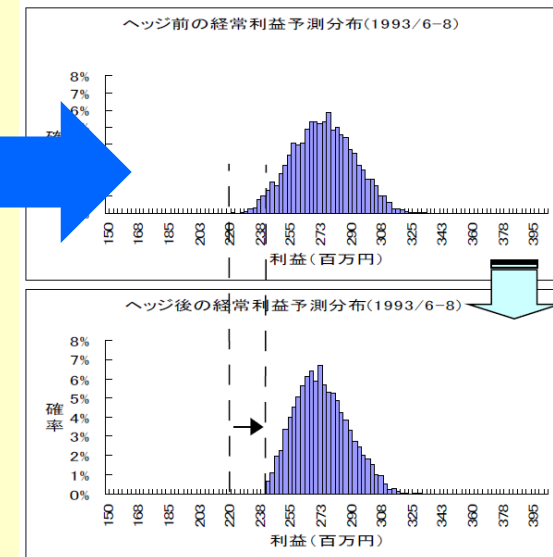
気象変数



ビジネス変数



リスク評価・対策



↑

気候影響の評価

* 概念図

Event Attributionとは？

2013年日本の猛暑

地球温暖化のせいかな？

いいえ、しかし、

温暖化の寄与もあったと考えられる

さらに、

温暖化によって、同様の、もしくは、より極端な現象の起こるリスクはYY%増加していると考えられる



個々のイベントの発生は自然のゆらぎ
→ たまたま暑い夏、寒い夏が起き得る

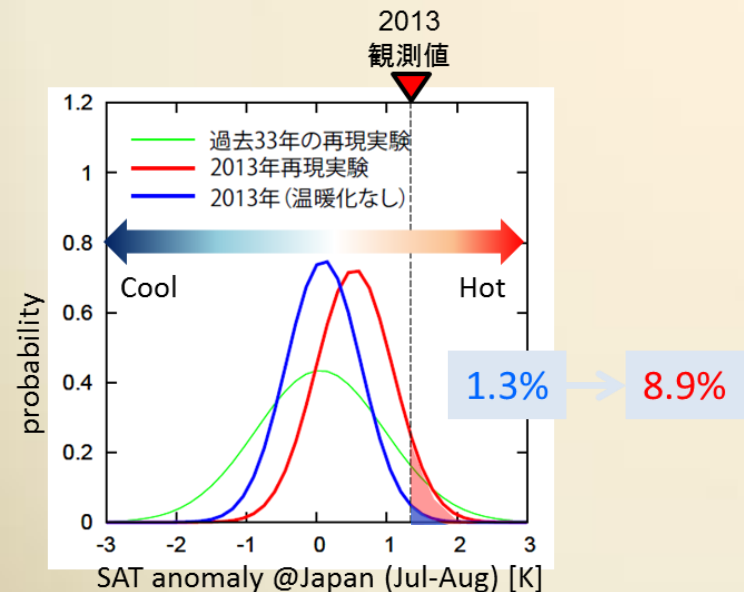
気候の変化はイベントの
「起こりやすさ」を変える

玉の数=起こりやすさ



森@東大
動画作成: NHK

玉の数=



Warming increases the risk of heat wave

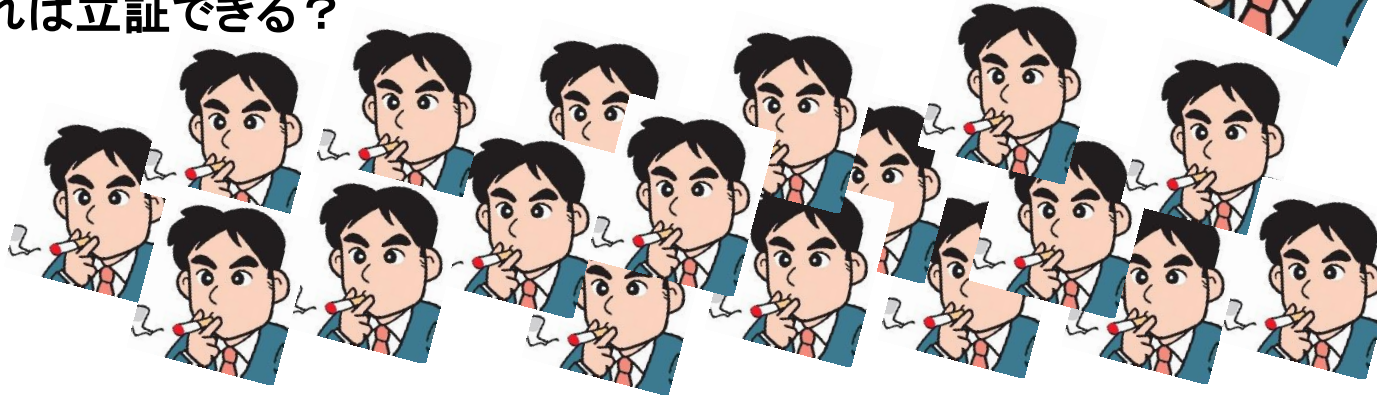
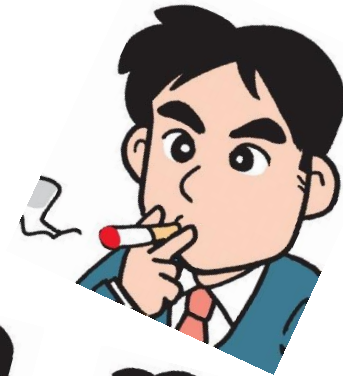
Imada et al. (2014)

たとえばなし



「喫煙は健康によくない。寿命を縮めることにもなる」とは言える。

ところが、
「喫煙者のWatanabeさんが肺がんで亡くなった。喫煙が彼の命を縮めたのである」と言うことは(可能性は高いと思うが)むつかしい。どうすれば立証できる？



沢山の”Watanabeさん(喫煙者)”を集めて、そのうち何人が肺がんで亡くなったかを調べて、喫煙の”リスク”を見積もりましょう。

異常気象と気候変化

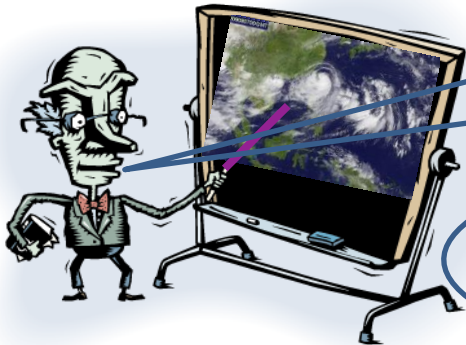
Q. (例えば)この夏の異常気象はどこまで温暖化のせい?

A.



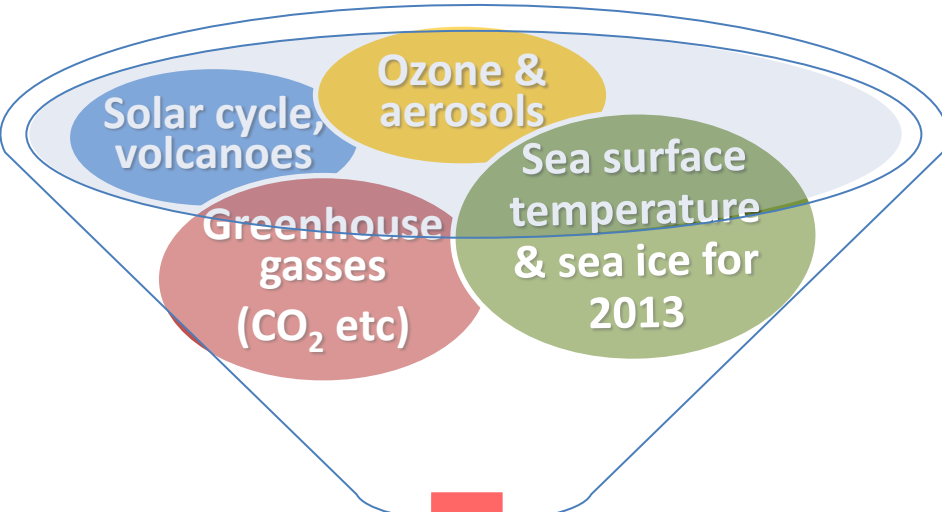
個々の異常気象「イベント」を温暖化のせいにするにはできない

でもイベントが起こりやすかったかどうかは部分的に気候変化のせいではないの?

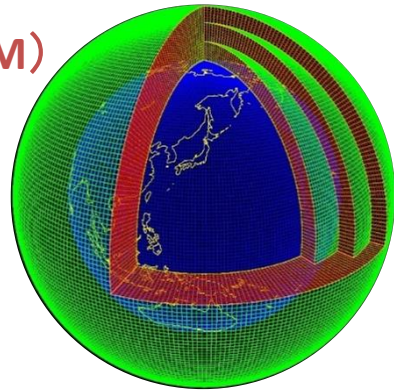


具体的にどうやるの？

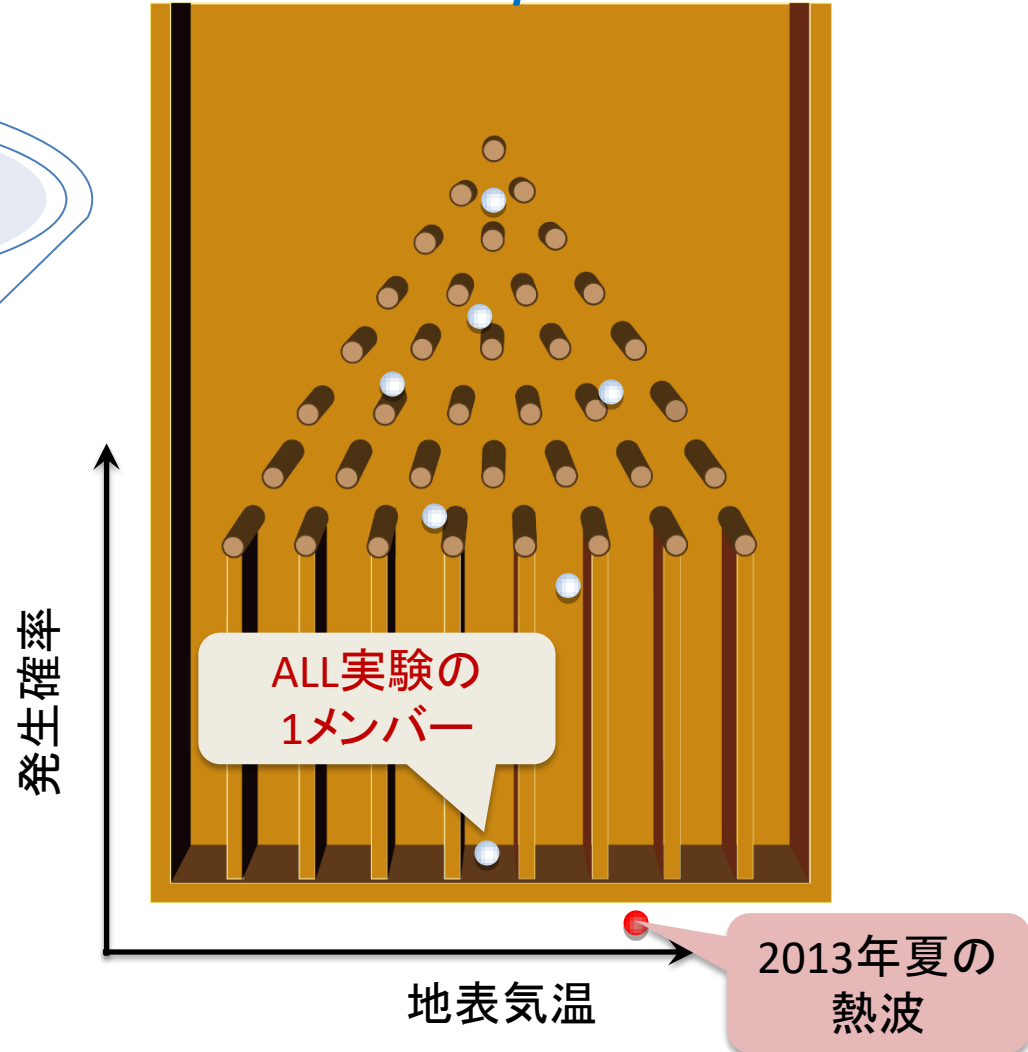
再現実験 (ALL)



大気大循環
モデル (AGCM)



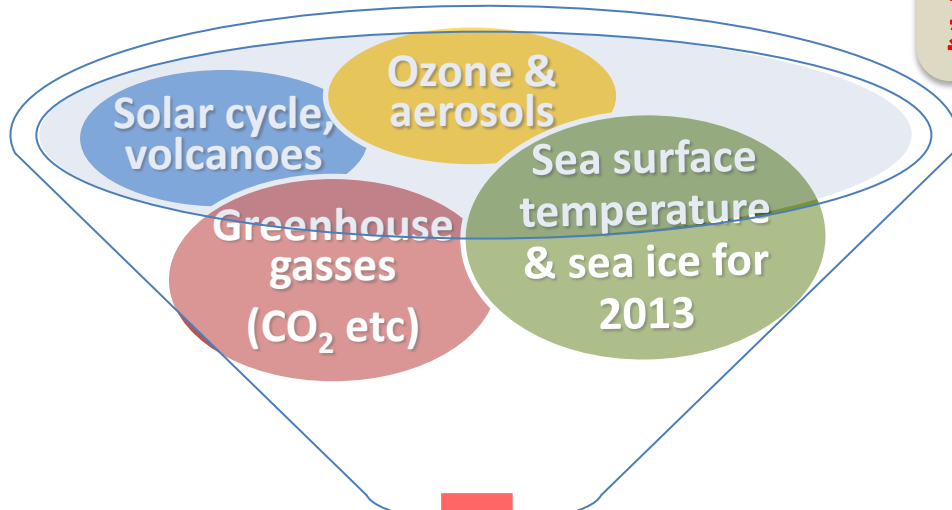
Weather pinball



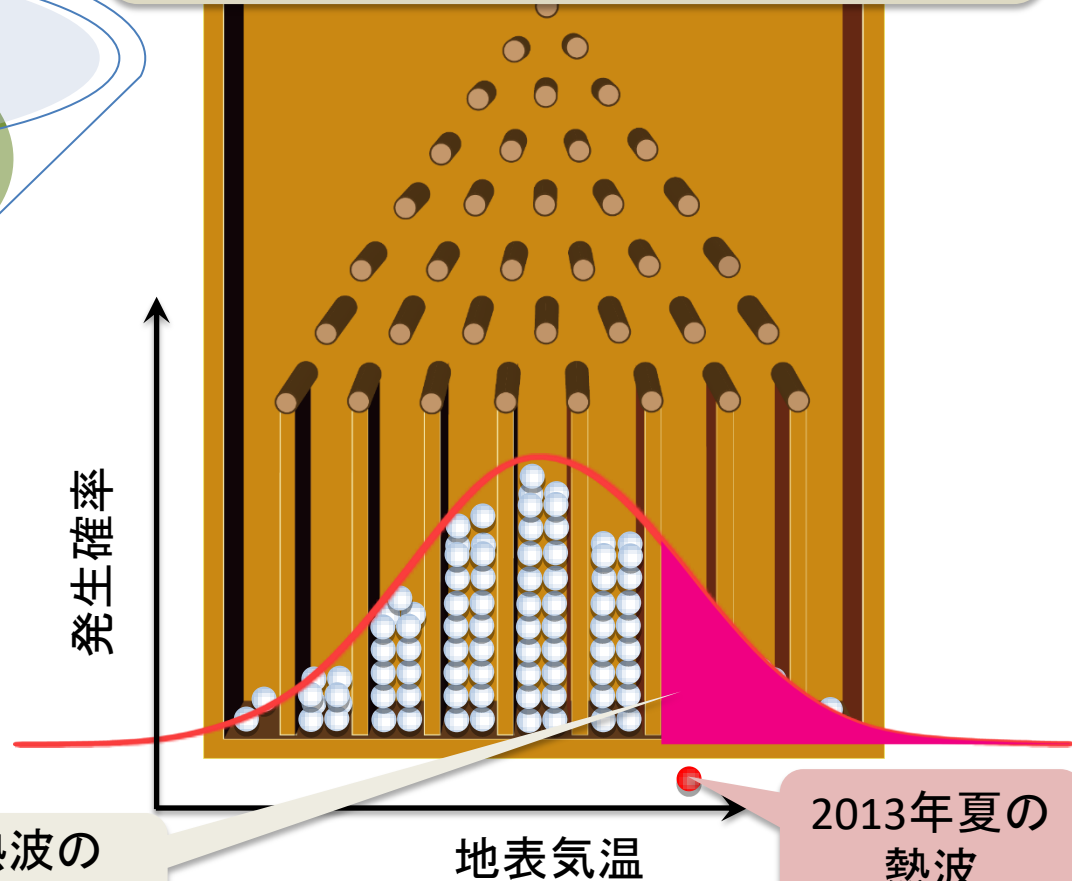
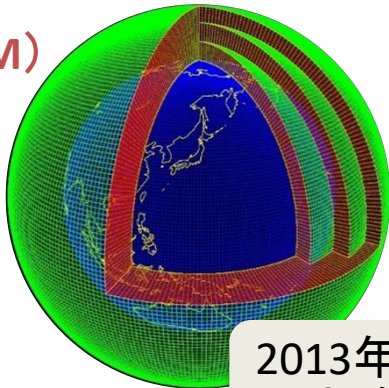
具体的にどうやるの？

再現実験 (ALL)

2013年夏季のシミュレーションを100回繰り返す(アンサンブル)ことで、熱波の発生確率を推定する



大気大循環
モデル (AGCM)



2013年夏の熱波の発生確率はXX%

具体的にどうやるの？

非温暖化実験 (NAT)

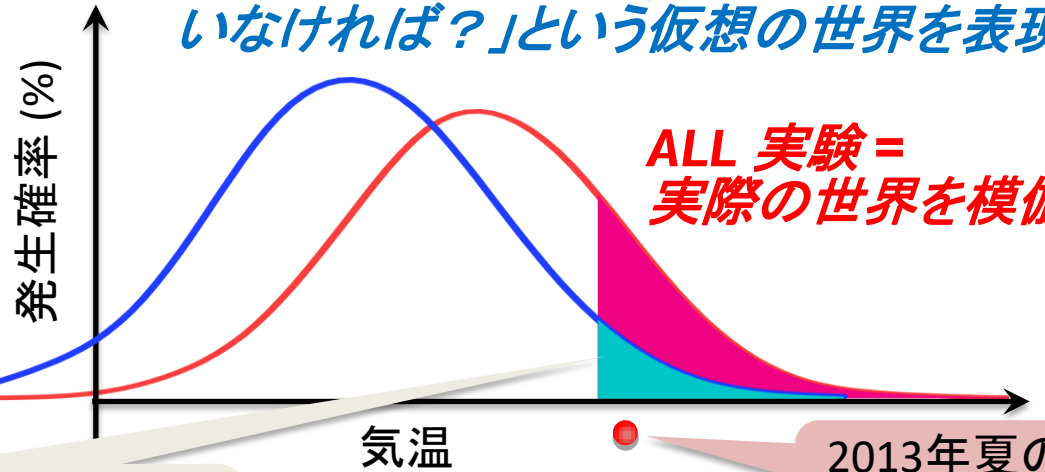
2013年夏季のシミュレーションを100回繰り返す(アンサンブル)ことで、熱波の発生確率を推定する

ただし、温室効果気体は1850年時点で固定、海面水温などから温暖化による長期変化成分を取り除く

NAT 実験 = 「もし温暖化が起きていなければ？」という仮想の世界を表現

ALL 実験 = 実際の世界を模倣

2013年夏の熱波



人為起源温暖化はこのイベントの発生リスクを XX-YY% 増加させた

大気大循環モデル (AGCM)

Solar cycle, volcanoes

Ozone & aerosols

~~Greenhouse gases (CO₂ etc)~~

Sea surface temperature & sea ice for 2013
修正!

- MIROC5によるE/A(文科省 創生プログラム)
- 全球大気気候モデル(AGCM)で、たくさん(100メンバー)のアンサンブル実験を行う。

MIROC5 AGCM (T85L40)

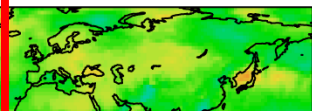
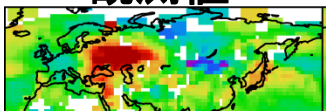
		境界条件		メンバー数	期間
		外部強制	SST・海氷		
ALL 全強制実験		人為起源 + 自然起源	HadISST	100	2009年以降
NAT0	自然強制実験	自然起源のみ (人為起源は産業化前)	MIROC3の20世紀再現実験の変化パターンを除去	100	2009年以降
NAT1			HadISSTの線形トレンド(1870-2012)を除去(Christidis and Stott 2014)		
NAT2			CMIP5 historical実験の変化パターンを除去(Daithi 2013)		
ALL-LNG		20C+RCP4.5	HadISST	10	1946—2011

For validation

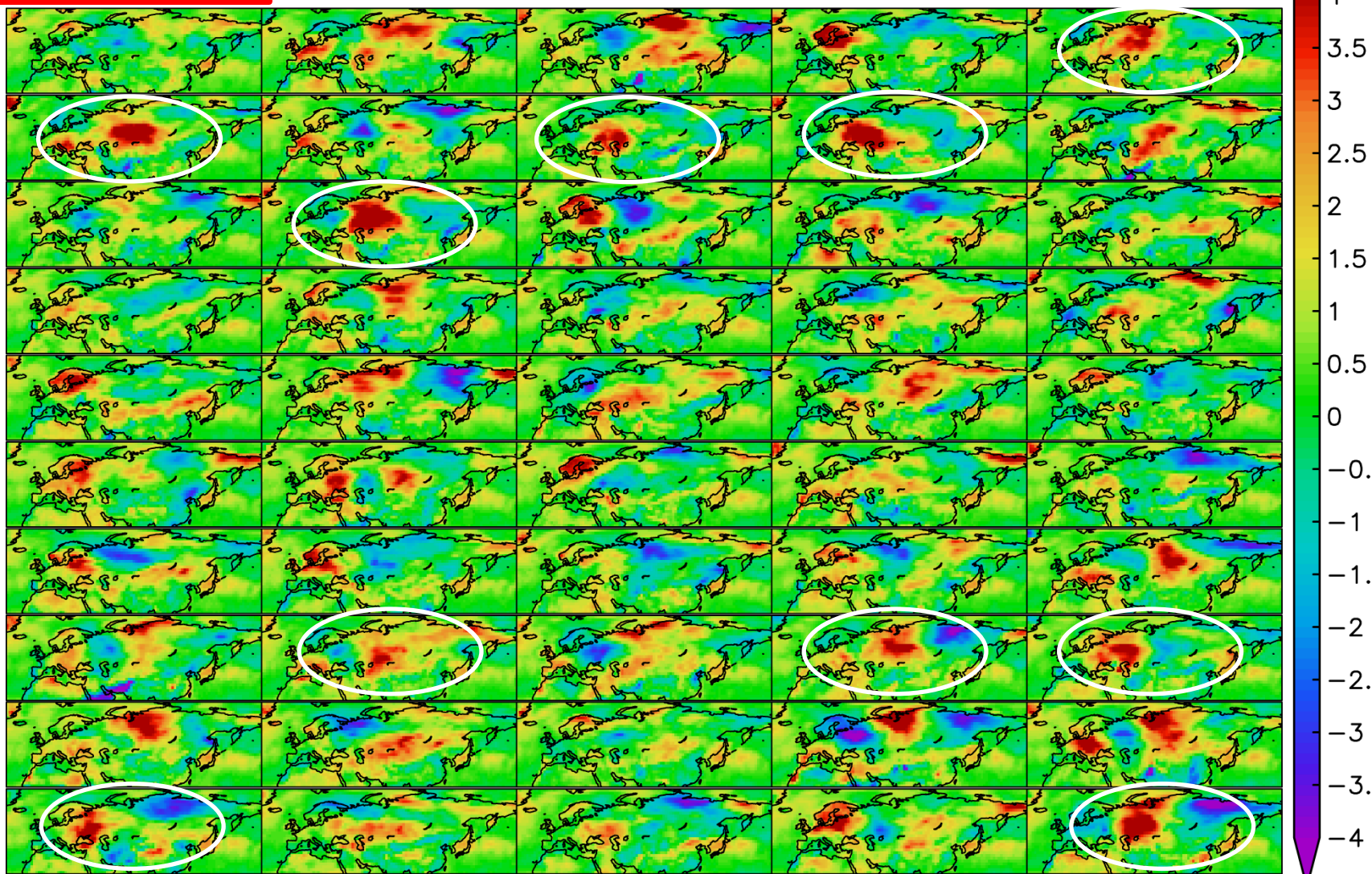
異常気象「曼荼羅」

観測値

モデル平均



MIROC5 AGCMがシミュレートした2010年
8月の地表気温偏差



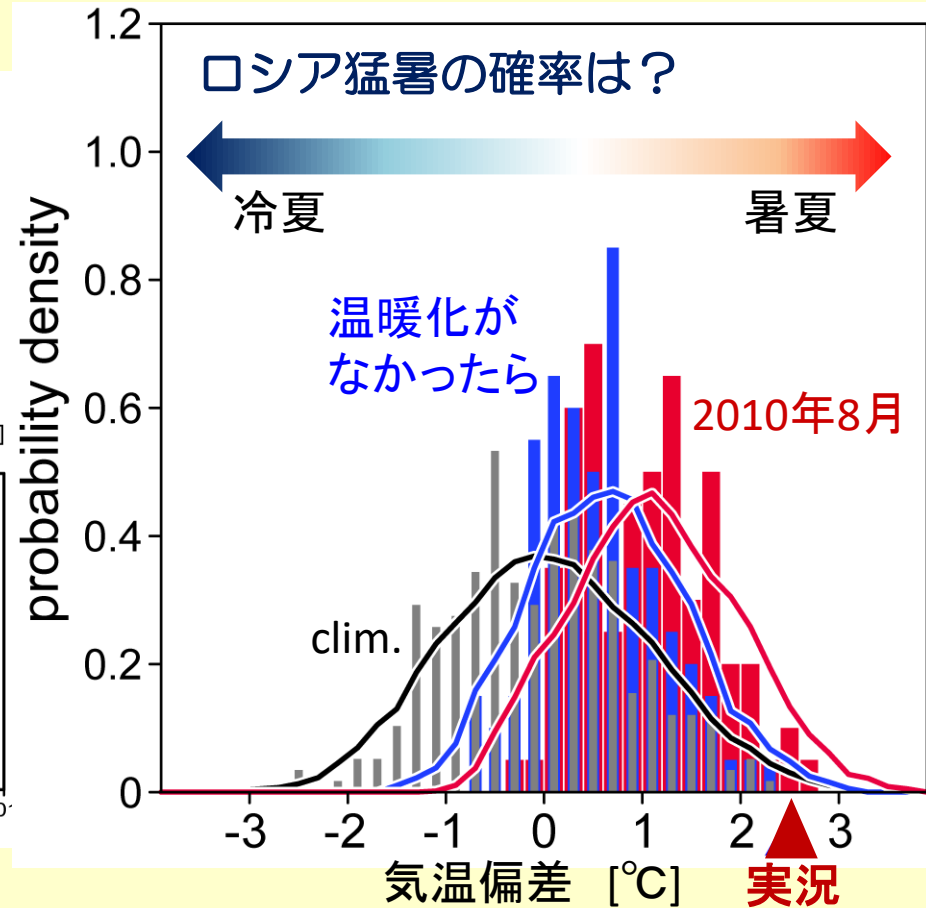
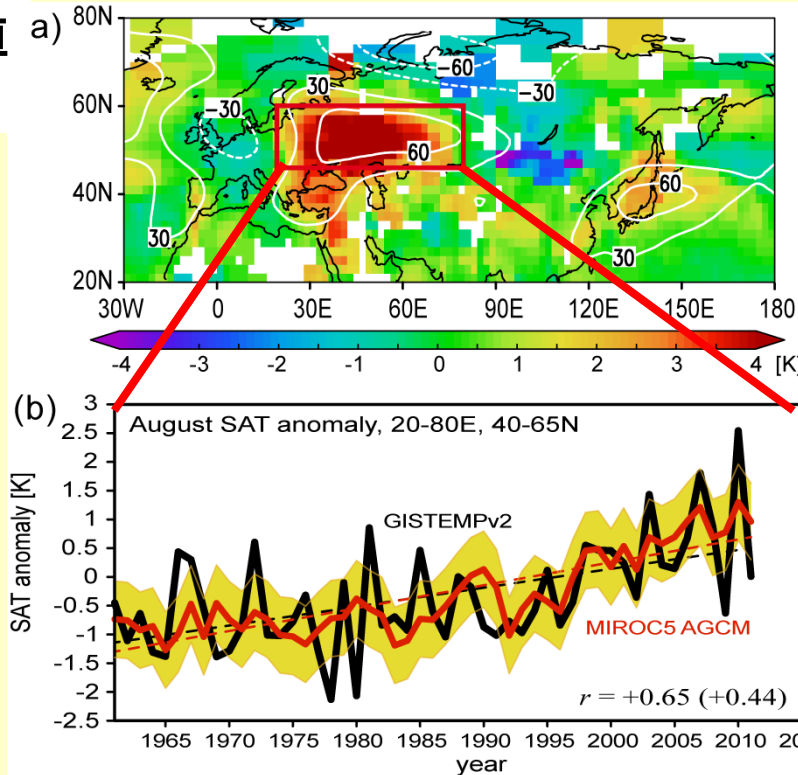
EAの例

2010年猛暑のEA

8月ロシア西部の地表気温偏差

観測値
(2010)

モデル

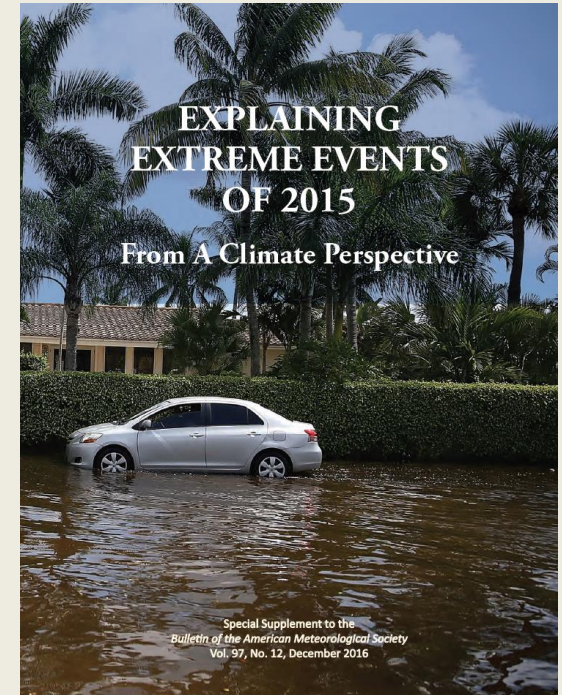
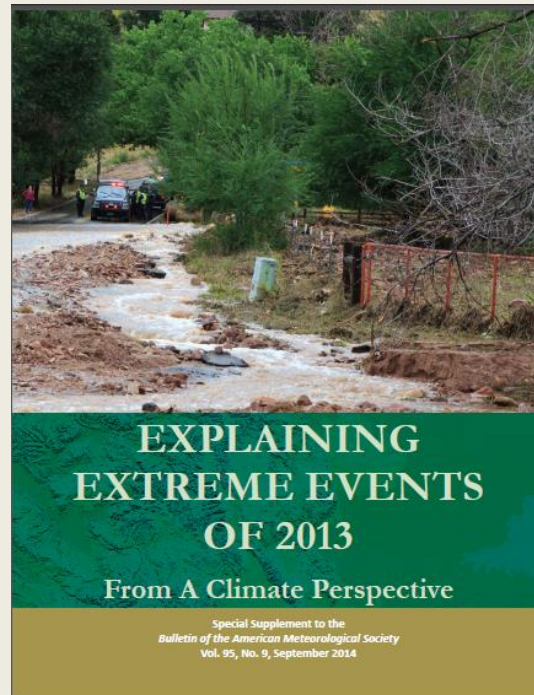
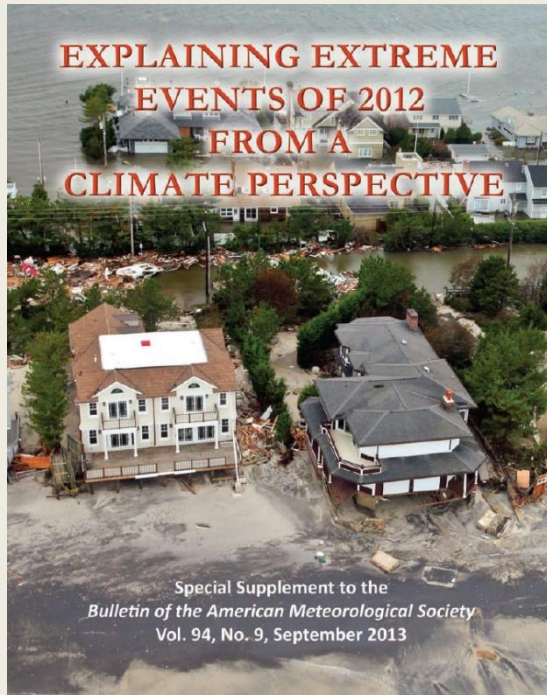


観測された猛暑は—

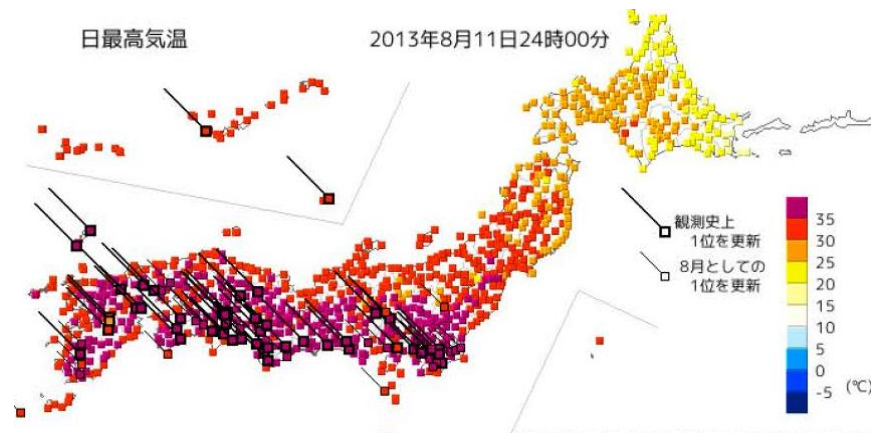
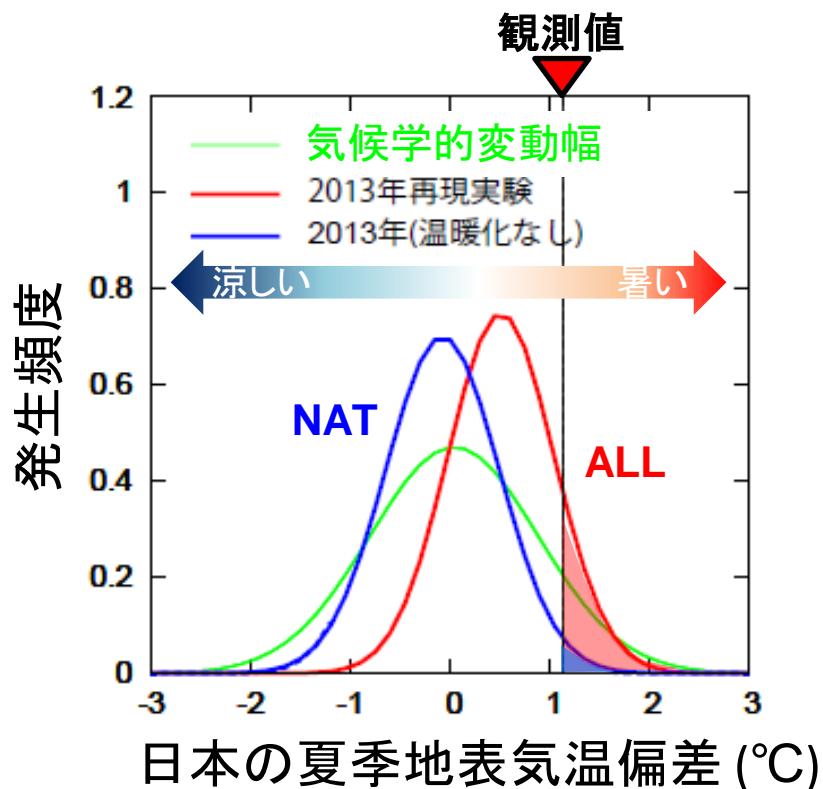
- ほとんどは自然の変動
- しかし、確率的には、温暖化していなければほとんど発生しなかった (発生確率 3.3% \Rightarrow 0.6%)

日本域を対象としたE/Aの例

- 平成24年7月九州北部豪雨 (Imada et al., 2013 BAMS)
- 平成25年夏季の日本の猛暑 (Imada et al. 2014 BAMS)
- 平成27年8月上旬の日本の持続的猛暑(Takahashi et al. 2016 BAMS)
- 平成28年アジア域の高温事例の多発(Imada et al. 2018 BAMS)
- 平成29年8月上旬の日本の冷夏(Takahashi et al. 準備中)



2013年日本の猛暑に対するEA



観測と同程度以上の猛暑の発生確率 (P)

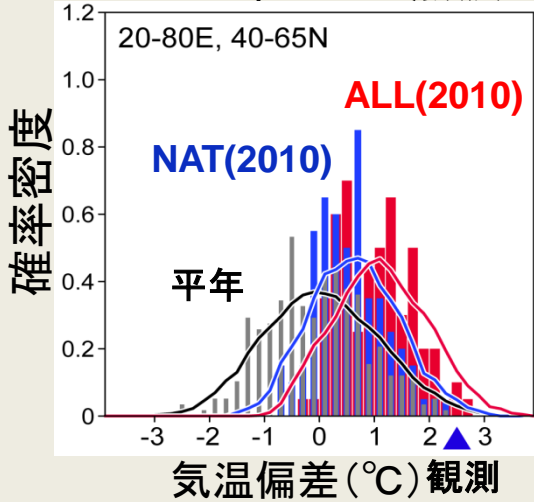
ALL (P_0)	NAT (P_1)	FAR ($1-P_1/P_0$)
12.4%	0.5–1.73%	0.86–0.96

Imada et al. (2014, BAMS)

Fractional Attributable Risk (FAR): 人間活動の寄与の目安
 (~1: 人為起源温暖化の寄与が明らか、~0: 温暖化の寄与はなし)

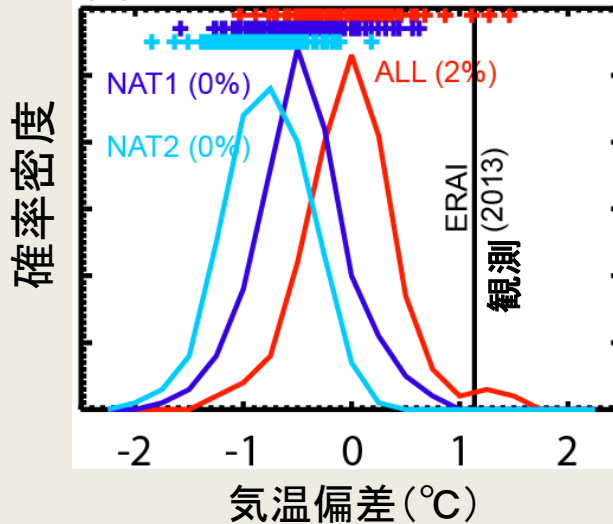
人間活動が発生確率を高めていた例

2010年ロシア熱波



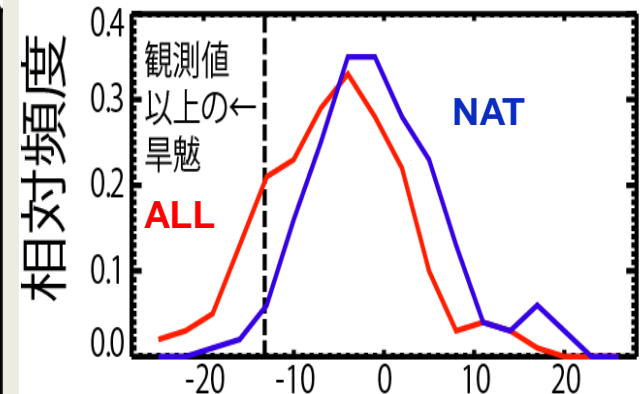
(Watanabe et al. 2013, SOLA)

2013年6-7月米国南西部熱波



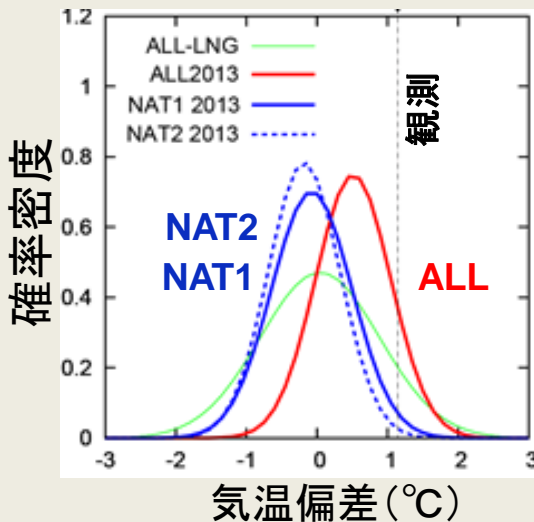
(Shiogama et al. in prep)

2010年南アマゾン旱魃



(Shiogama et al. 2013, ASL)

2013年6-7月南日本熱波



(Imada et al. submitted to BAMS)

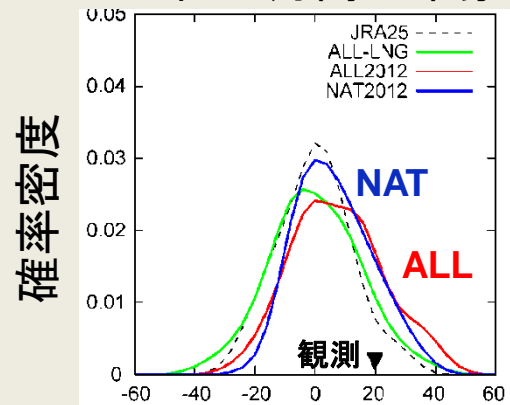
その他...

- 2010年パキスタン豪雨
- 2011/2012年冬季の海氷減少とユーラシアの寒波
- 2015年8月上旬の日本の持続的猛暑

Slide courtesy of Y. Imada

人間活動の寄与が検出できなかった例

2012年6-7月南日本豪雨



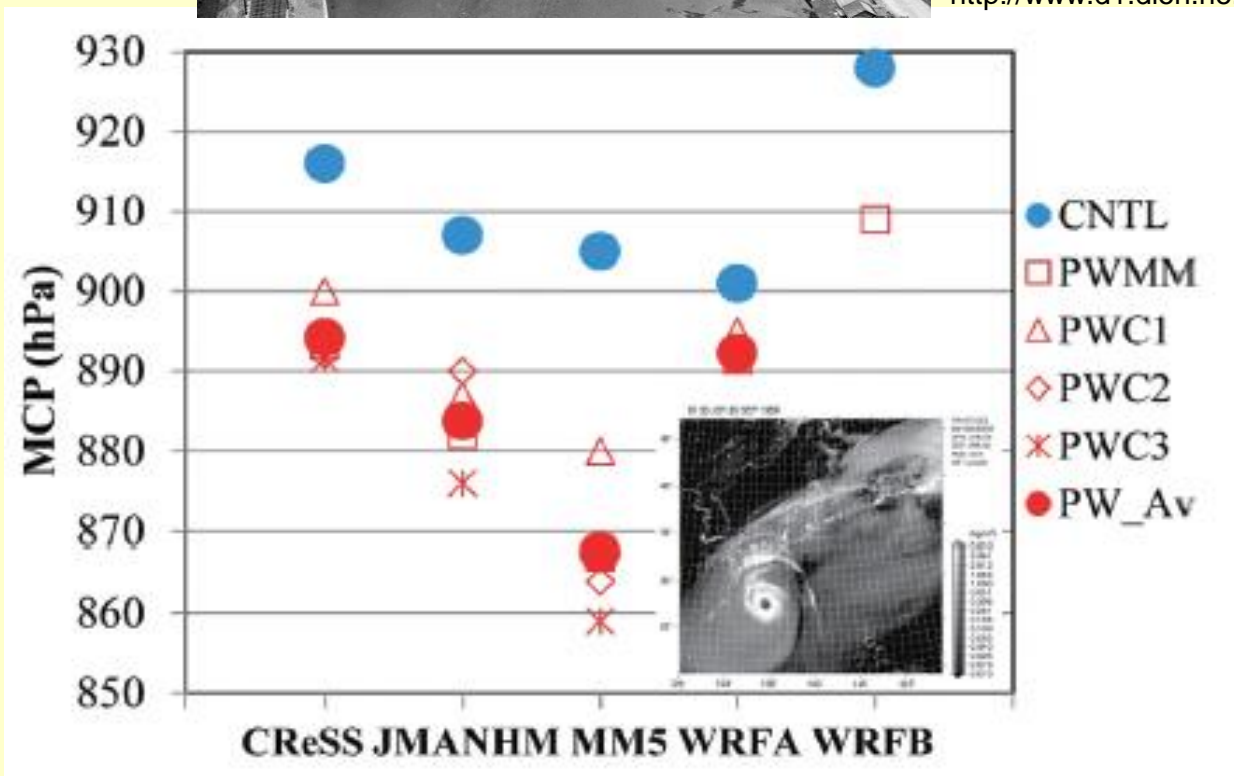
豪雨をもたらした気圧配置パターンの強さ³²

(Imada et al. 2013, BAMS)



伊勢湾台風

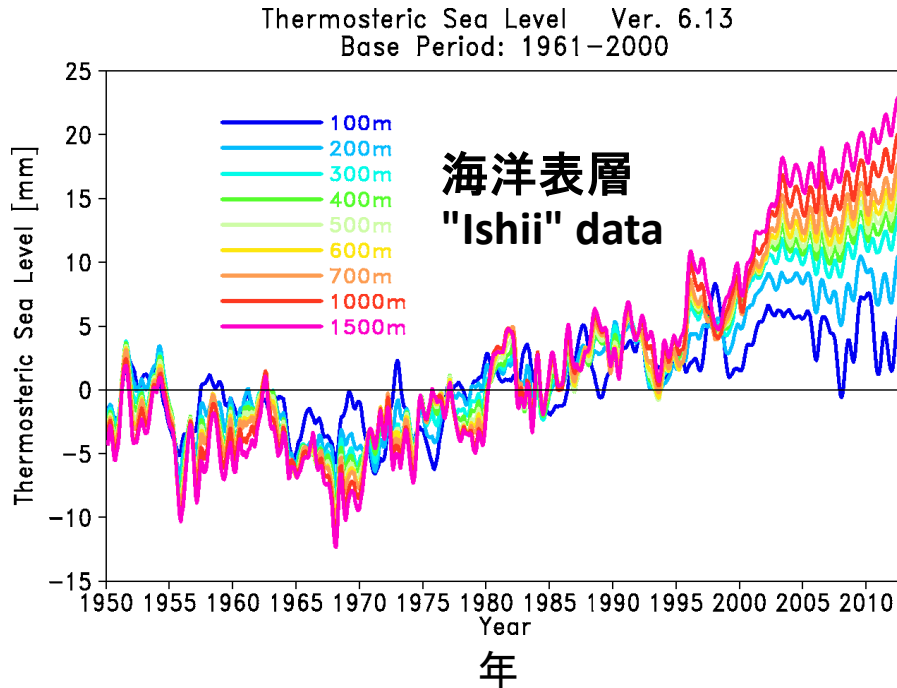
<http://www.d1.dion.ne.jp/~kwx/isewan.htm>



長期イベントの要因分析例

地球温暖化の「停滞」(いわゆるハイエイタス)

- 2000年以降に温暖化傾向が鈍っている原因がわからなかった
- IPCC AR5以降に社会の関心が高まった
- 気候変動メカニズム、人為起源温暖化の議論が再燃

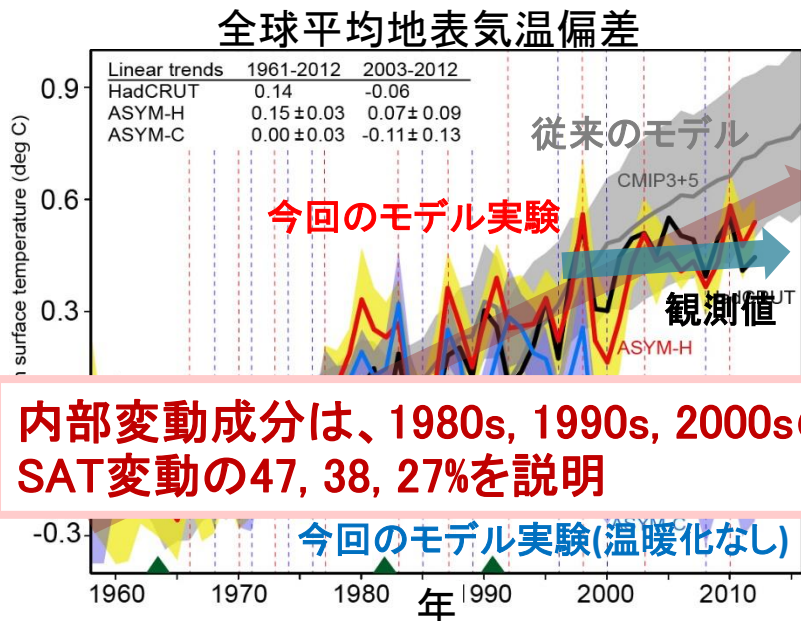


人為起源の温室効果ガス排出は21世紀に入っても増加し続けているが、気温は予想されるように上昇していない

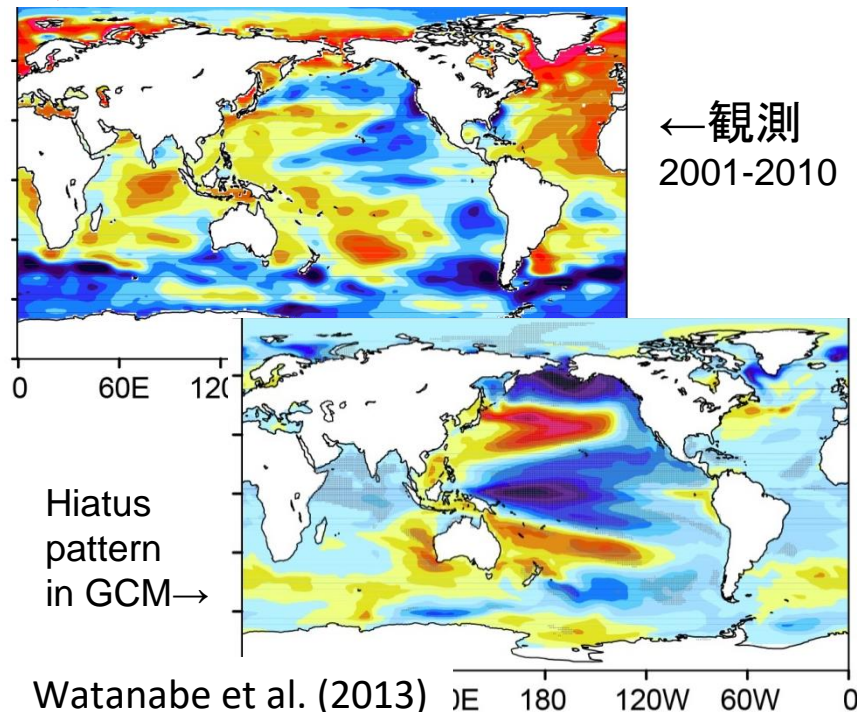
外部強制に対する応答? (成層圏エアロゾル、太陽活動、火山噴火など)
気候の内部変動? (負の太平洋数十年規模変動(IPO))

地球温暖化の「停滞」(いわゆるハイエイタス)

- ❑ 2000年以降に温暖化傾向が鈍っている原因がわからなかった
- ❑ IPCC AR5以降に社会の関心が高まった
- ❑ 気候変動メカニズム、人為起源温暖化の議論が再燃
- ✓ 気候モデルでハイエイタスを再現
- ✓ 気候の内部変動(太平洋数十年変動、IPO)がハイエイタスの主要因と特定
- ✓ 現在は温暖化停滞期から加速期への転換期？



Watanabe et al. (2014 Nature CC)



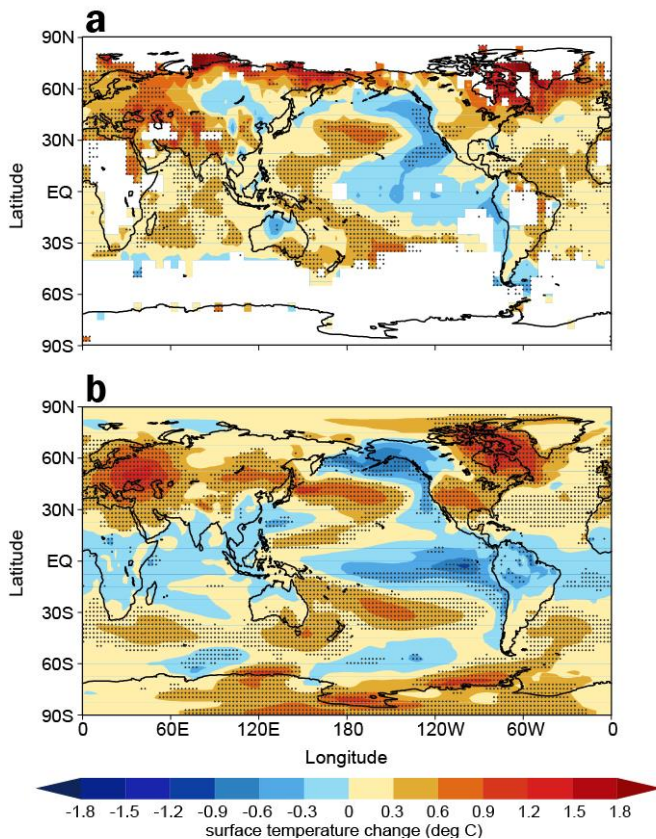
ハイエイタスの再現と要因分析

2000年代のSAT偏差分布に対する気候内部変動と強制応答の寄与

地表気温変化

1990-1999 ⇒ 2001-2012

観測値

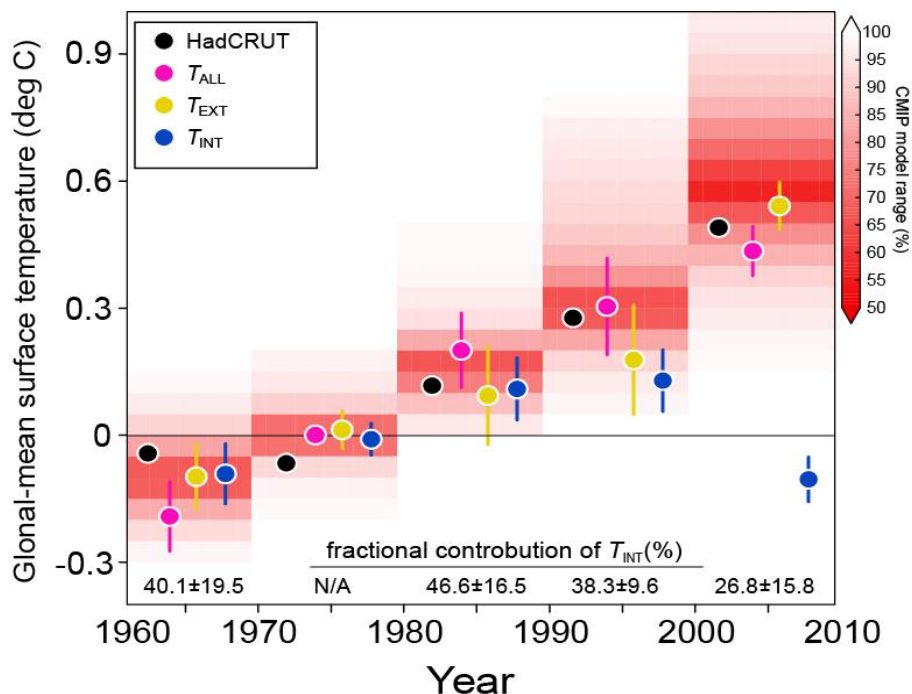


同化実験
(a + b)
=ASYM-H

(a) 内部変動
= ASYM-C

(b) 強制応答
= diff

10年平均SAT偏差への各成分の寄与



内部変動成分は、1980s, 1990s, 2000sのSAT変動の47, 38, 27%を説明

Watanabe et al. (2014)
2014年8月28日報道発表

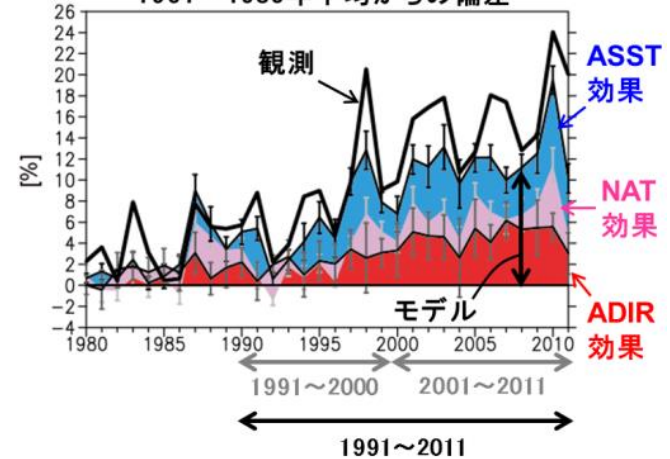
温暖化のはずなのに 最近は寒冬続き... ?



2000年代は猛暑が多いが、 理由は？

a 北半球の猛暑発生頻度

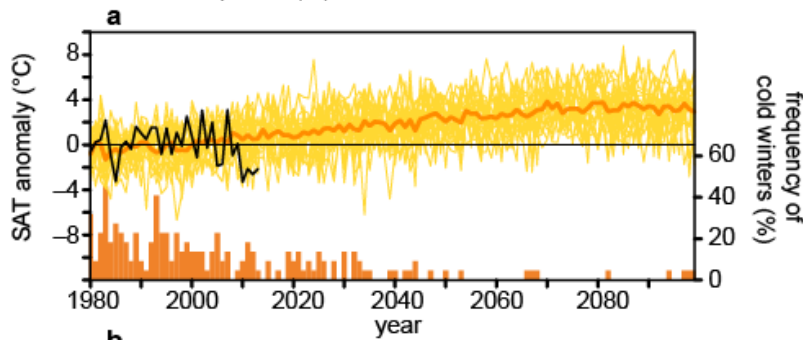
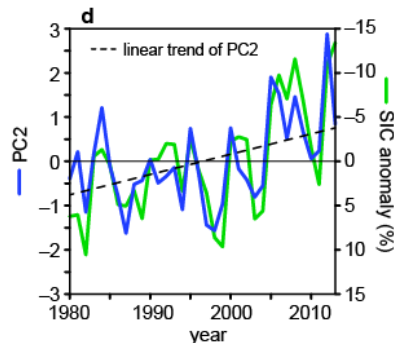
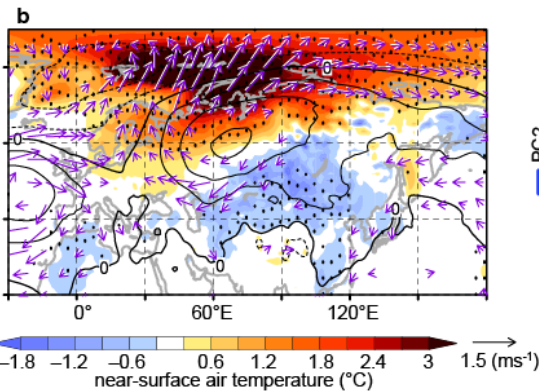
1951~1980年平均からの偏差



ASST: 海の温暖化を通じた人間活動の影響
NAT: 自然起源の強制と自然変動の影響
ADIR: 海の温暖化以外の人間活動の影響
 (直接的な陸面の昇温)

- ✓ シミュレーションは過去の熱波頻度の増大をよく再現
- ✓ 短期的な変化(10年程度)には温暖化(CO2による陸面加熱)とSST自然変動が重要

Kamae et al. (2014; GRL)
 2014年7月28日報道発表



Mori et al. (2014; Nature Geosci)
 2014年10月27日報道発表

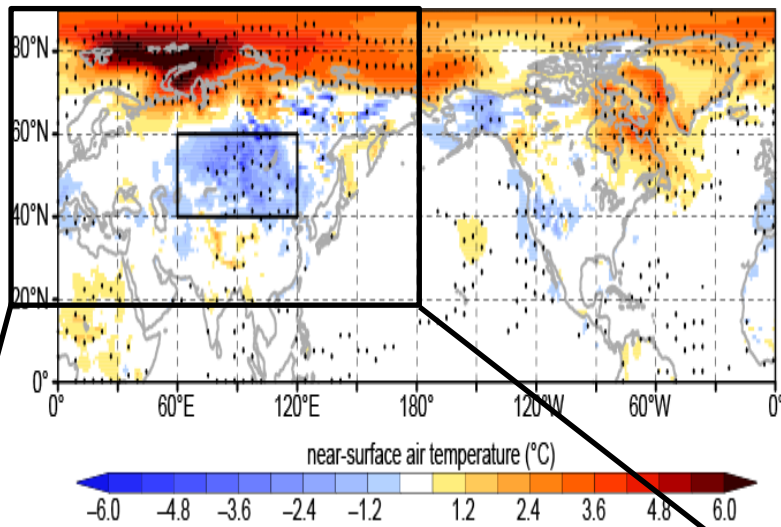
近年の寒冬の要因分析

Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in the past decades

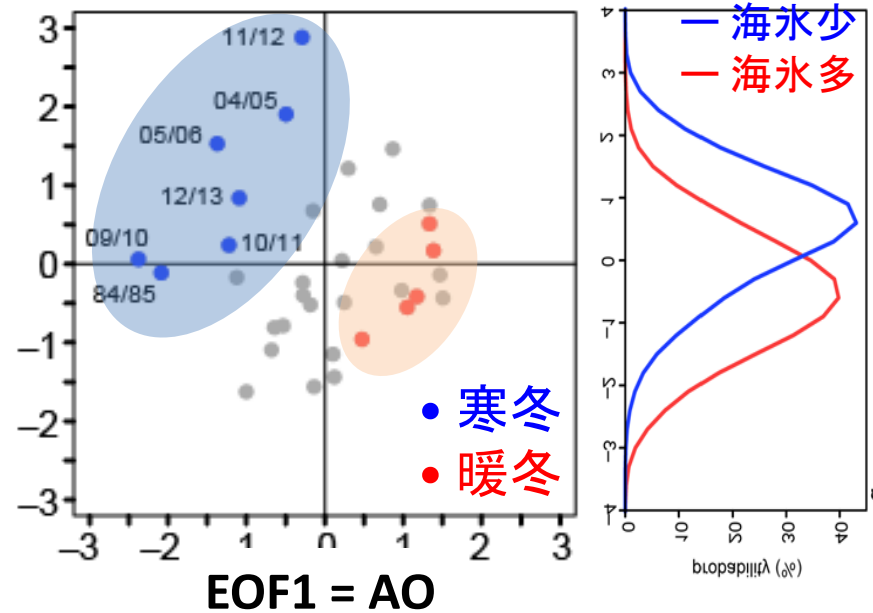
Masato Mori^{1*}, Masahiro Watanabe¹, Hideo Shiogama², Jun Inoue³ and Masahide Kimoto¹

MIROC4 AGCM 100メンバーアンサンブルによるバレンツ・カラ海水感度実験

観測された近年の冬季気温偏差
(1994-2003 ⇒ 2004-2013)

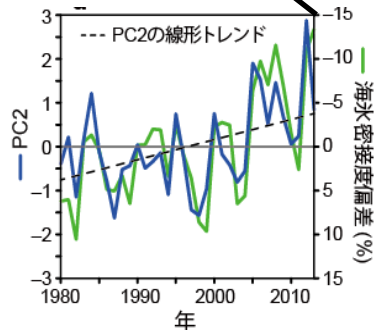
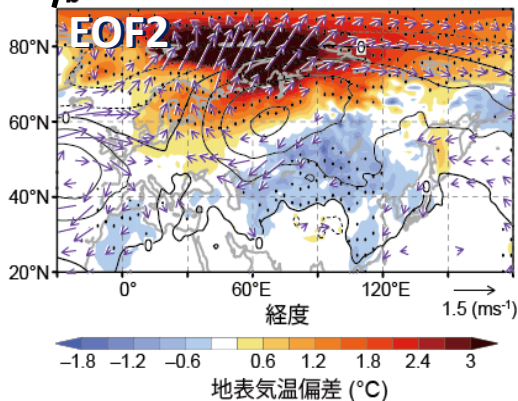


EOF2 = WACE



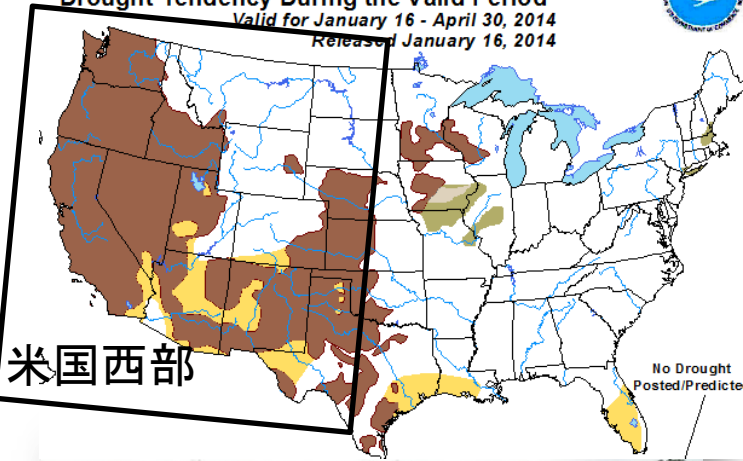
Mori et al. (2014 Nature Geo)

- EOF2=Warm Arctic and Cold Eurasia (WACE)
- ユーラシアの冬季気温偏差はAOとWACE (バレンツ・カラ海の海水変動が駆動)で説明可



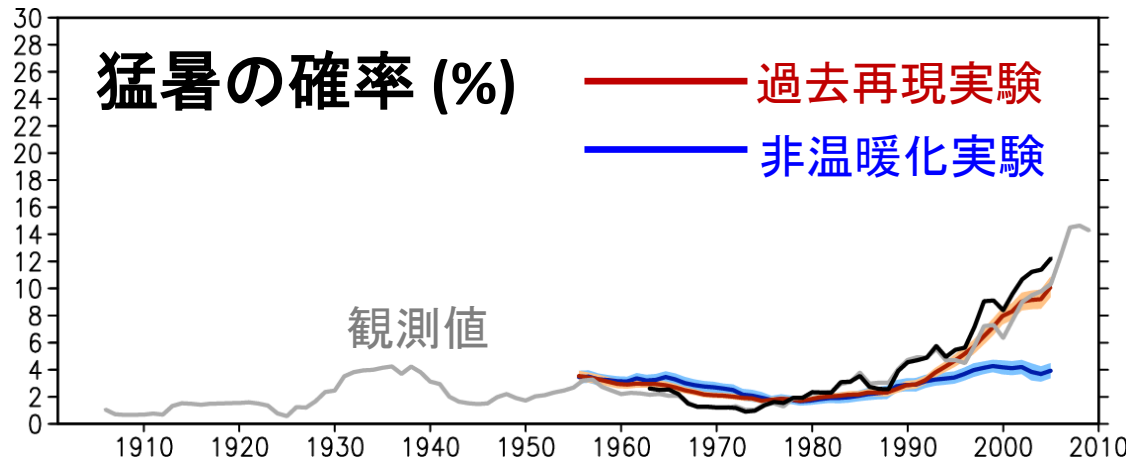
カリフォルニアの高温・干ばつリスクに対する温暖化と十年規模自然変動の寄与

U.S. Seasonal Drought Outlook
Drought Tendency During the Valid Period
Valid for January 16 - April 30, 2014
Released January 16, 2014



米国西部

No Drought Posted/Predicted

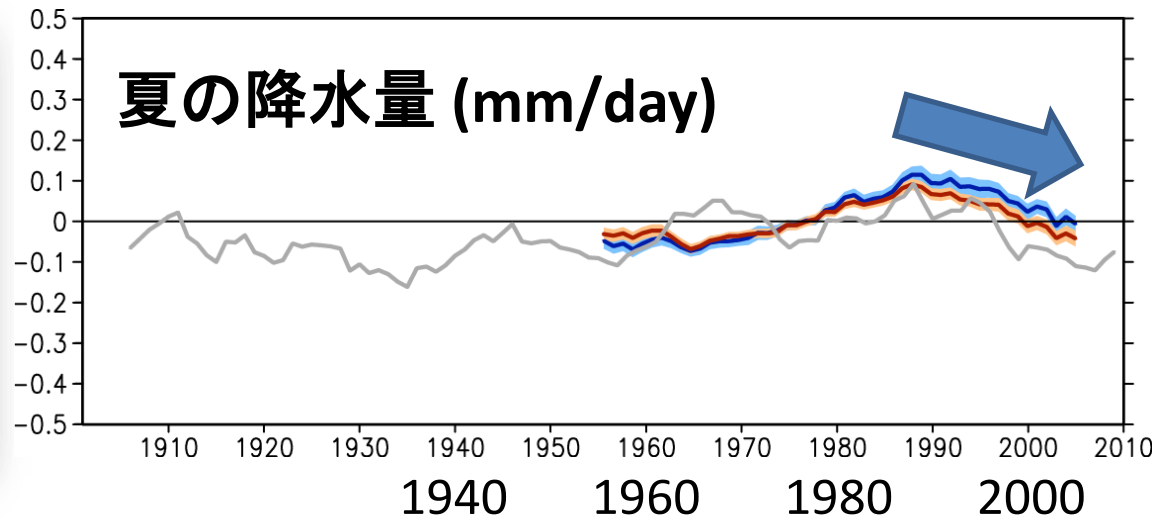


猛暑の確率 (%)

過去再現実験

非温暖化実験

観測値



夏の降水量 (mm/day)

猛暑の増加は温暖化によるが、降水の減少には自然の十年規模気候変動が最も重要

地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測実験データベース (d4PDF)



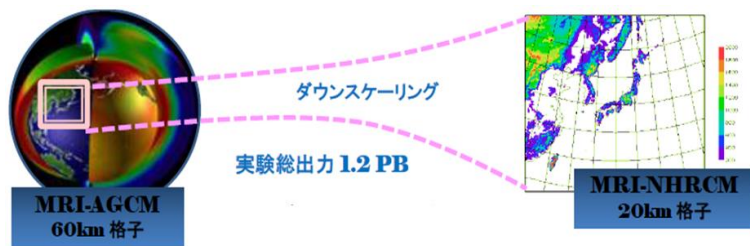
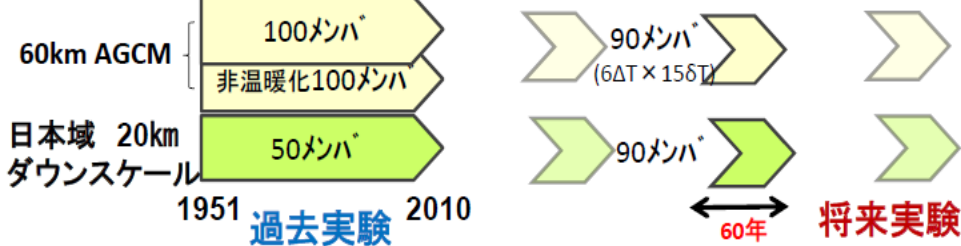
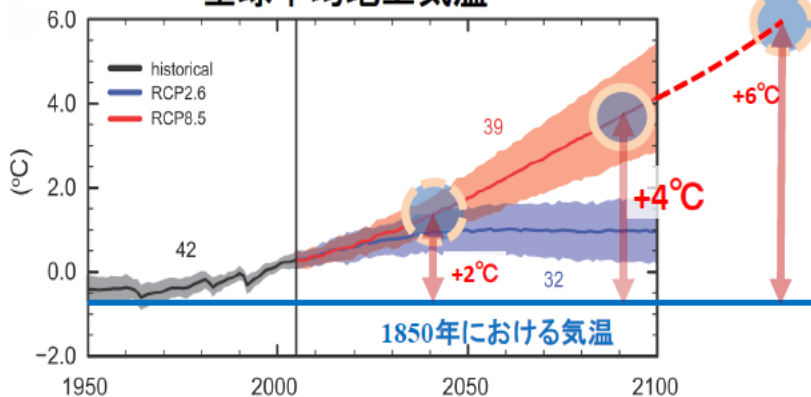
文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム主導

気象研究所・東京大学大気海洋研究所・京都大学防災研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構・筑波大学

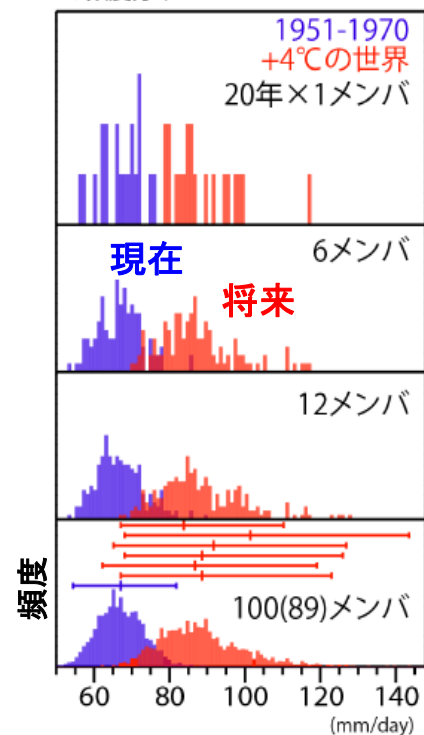
実験デザイン

過去 15,000 年分、将来 10,800 年分 (+4°Cのみ) を積分
 総出力データ 2PB
 作業日数 180 日、ES最新機 12% の計算資利用

全球平均地上気温



中国南部で平均した「年最大日降水量」の頻度分布



(例) 豪雨の頻度分布

これまで不可能だった発生頻度の低い異常気象の変化を確率的に見積もることが初めて可能に

過去と将来の気候をシミュレートする、これまでになかった多数事例の実験データベース

地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測実験データベース (d4PDF)



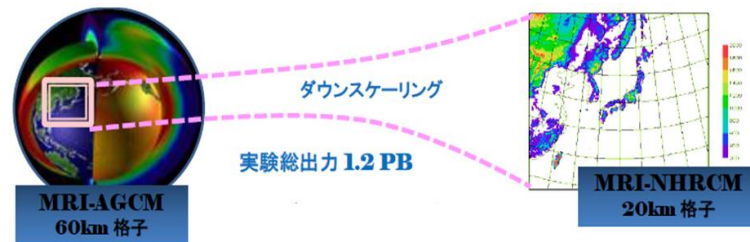
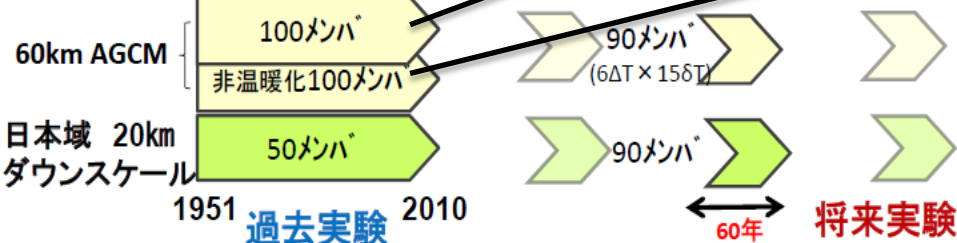
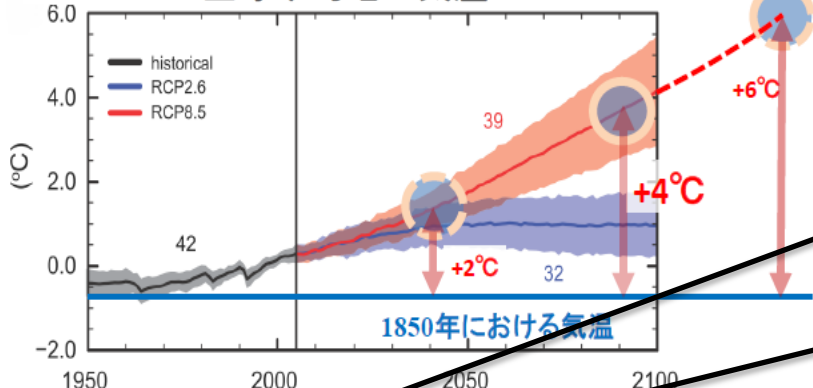
文部科学省気候変動リスク情報創生プログラム主導

気象研究所・東京大学大気海洋研究所・京都大学防災研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構・筑波大学

実験デザイン

過去 15,000 年分、将来 10,800 年分 (+4°Cのみ) を積分
 総出力データ 2PB
 作業日数 180 日、ES最新機 12% の計算資利用

全球平均地上気温



過去再現実験

非温暖化実験：
 温暖化が進行しなかった
 仮想の気候をシミュレート



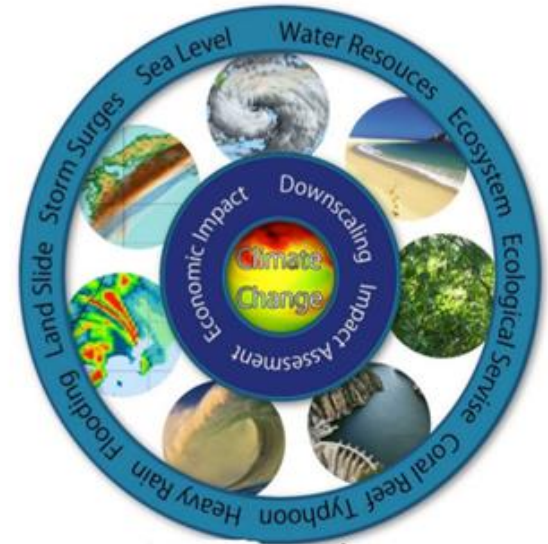
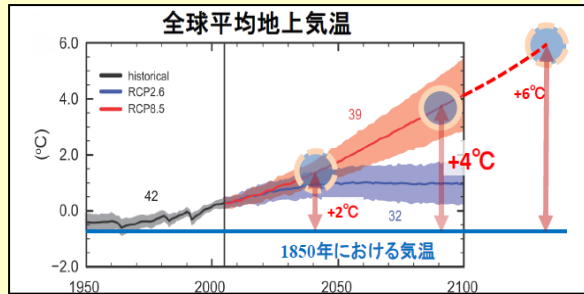
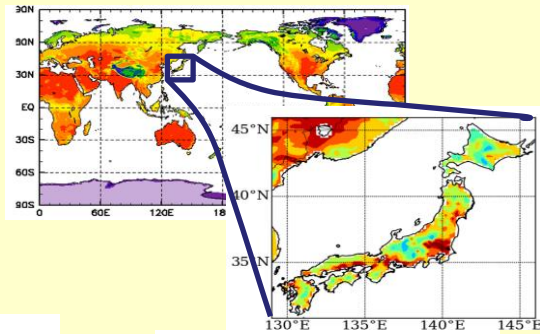
既に進行している温暖化が過去に
 起こった異常気象にどの程度影響
 していたかを評価するイベント・ア
 リビューション研究にも利用可能

過去と将来の気候をシミュレートする、
 これまでにない多数事例の実験データベース

- A common scenario for policy decision making in Japan
- Highly reliable information from huge ensemble of climate model simulation

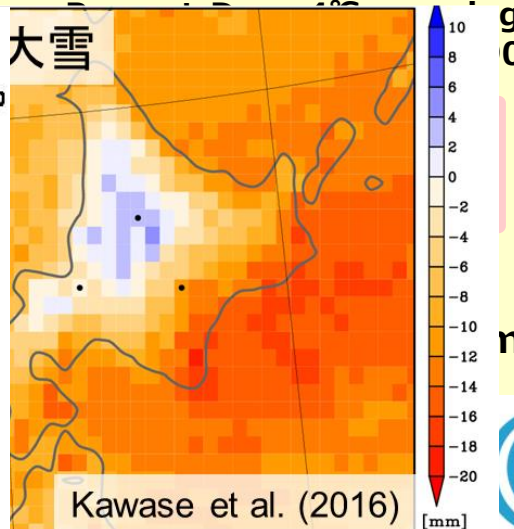
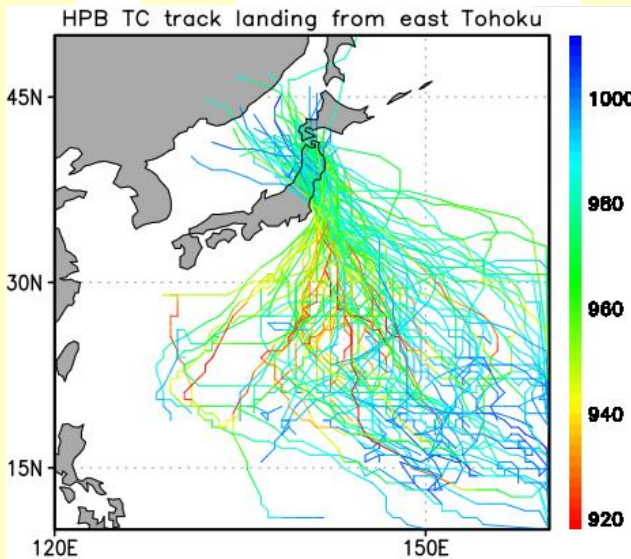
Mizuta et al. (2017; BAMS)

High-res global and regional database (60km) (20km)



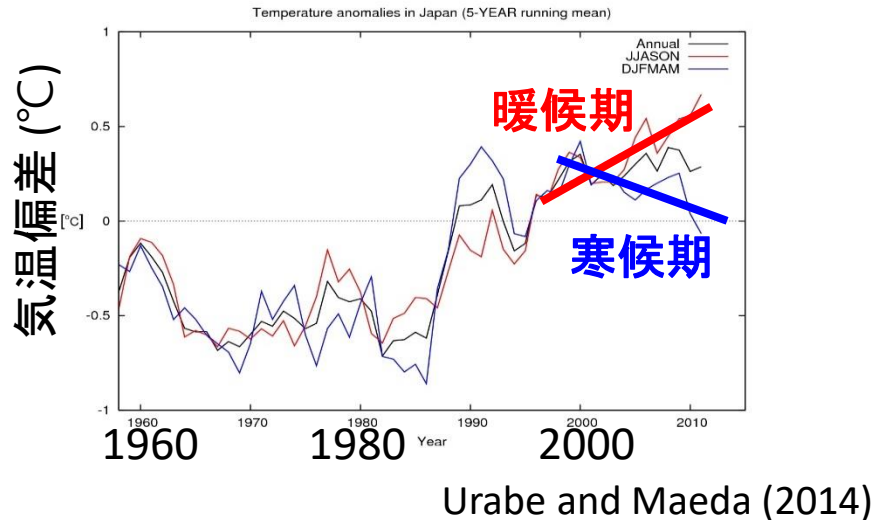
Applicable to various
climate change assessments

niroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/



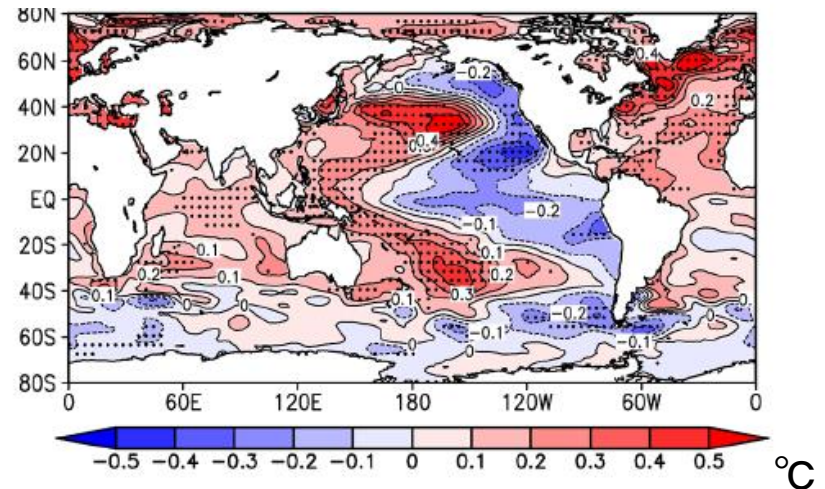
2000年代の日本の夏の気温上昇

日本の地表気温偏差



太平洋10年規模変動

1999-2012年平均海面水温偏差

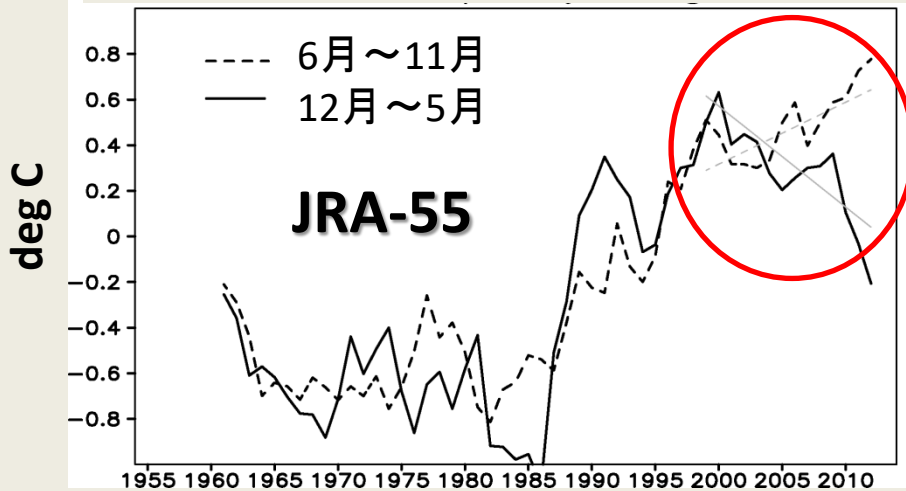


2000年代の世界と日本の気候

- 全球気温上昇の停滞（ハイエイタス）
- ラニーニャ型海面水温偏差（負のIPO）
- バレンツ・カラ海の海氷減少
- 日本の夏は暑く、冬は寒い傾向＝季節の変化が大きい
⇒ なぜ？

d4PDFを用いたE/Aの例: 年代の日本の地上気温

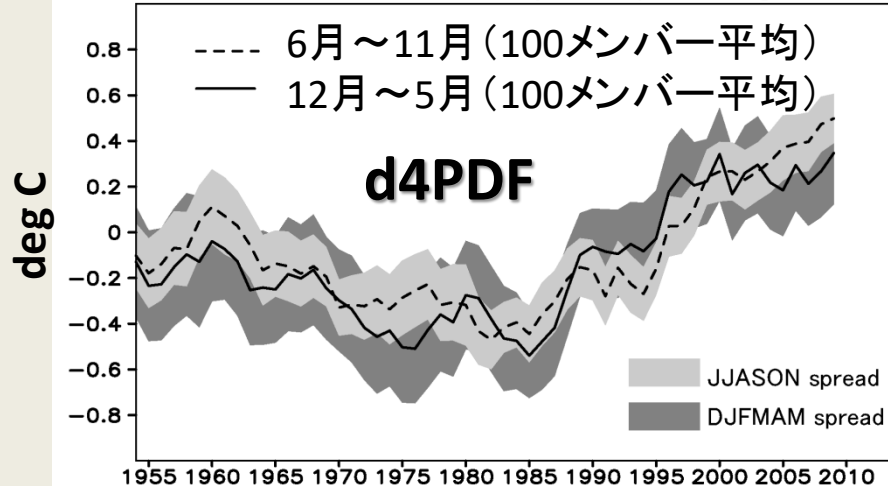
日本の地上気温の季節別5年移動平均



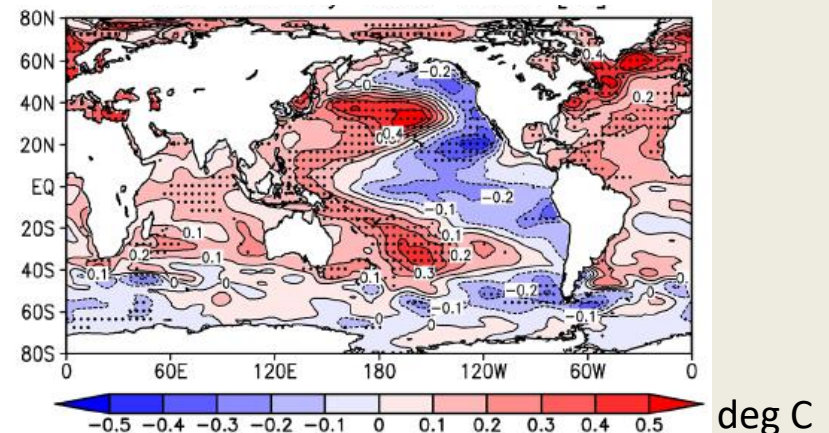
- d4PDFの過去60年100メンバーのシミュレーションで2000年代の傾向を再現することに成功
- 太平洋10年規模変動に伴って生じた日本域の気圧パターンも再現

Urabe and Maeda 2014 SOLA

MRI-AGCM(60km) T2 in Japan (5-yr running mean)



1999-2012年平均海面水温偏差



太平洋10年規模変動

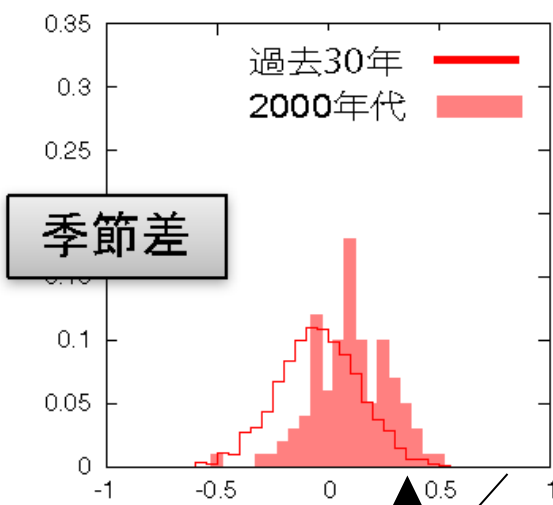
※偏差: 1981-2010年の平均からの差



d4PDFを用いて要因を切り分ける

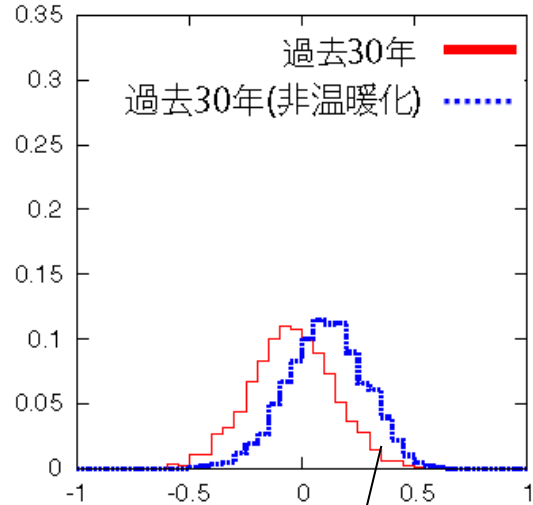
日本の地上気温偏差の季節差(JJASON-DJFMAM、10年移動平均)の頻度分布

過去30年と2000年代



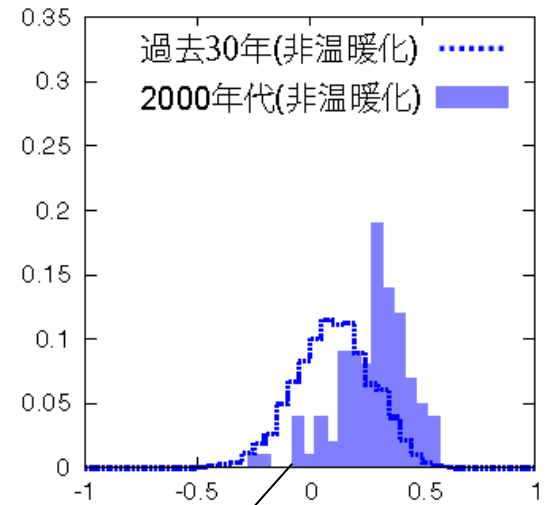
2000年以降、日本の夏季と冬季の気温の季節差が増加する傾向にある。

温暖化の影響



地球温暖化はむしろ、この傾向を打ち消す方向に働いていた。

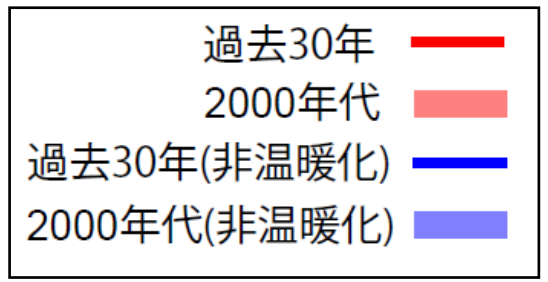
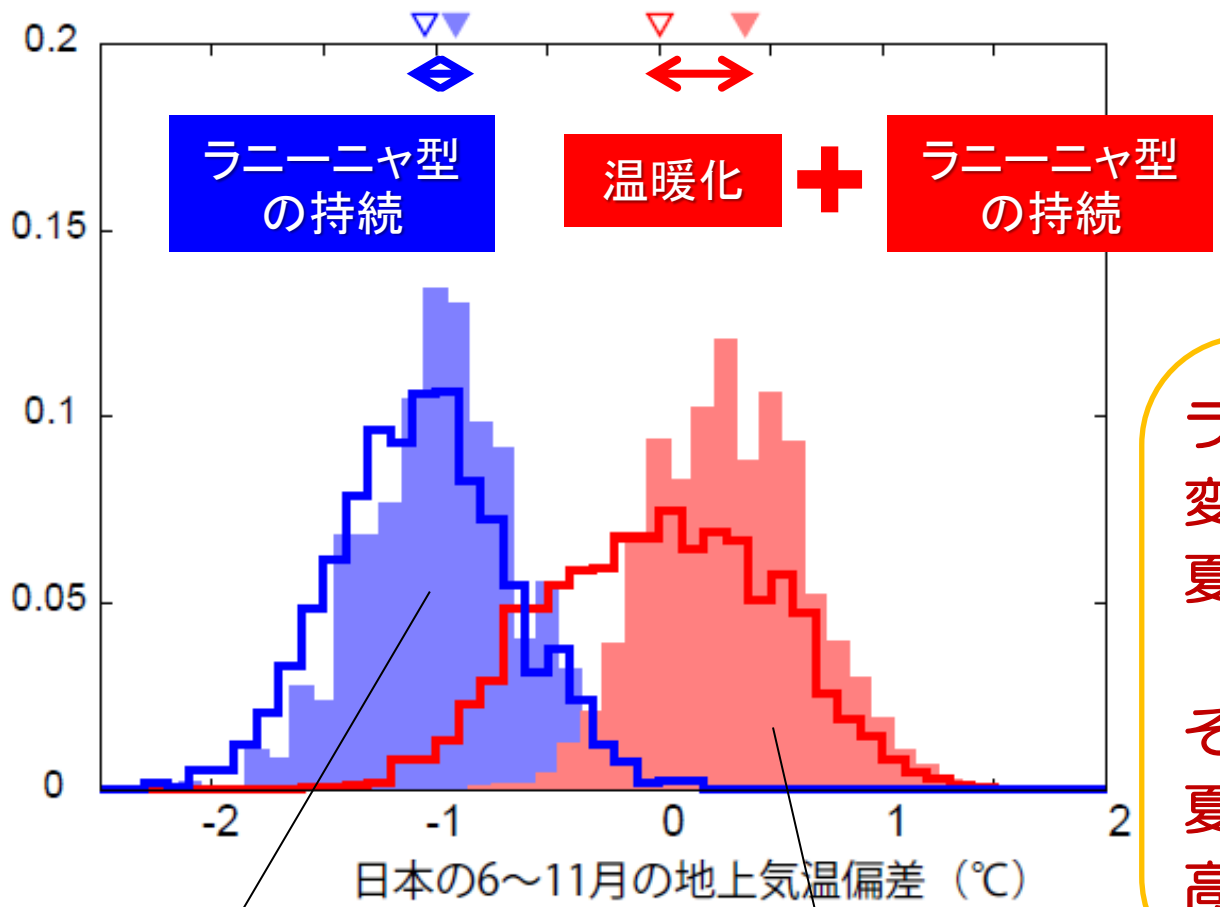
10年規模変動の影響



気温の季節差の増加は、主に2000年代に持続したラニーニャ傾向によってもたらされた。

日本の高温リスクに対する 温暖化と十年規模自然変動の寄与

d4PDFから得られた日本の地表気温偏差ヒストグラム



ポイント

ラニーニャ型の十年規模変動発生時には、日本の夏がより暑くなる傾向

そこに温暖化が重なると夏の高温リスクがより高まる

ラニーニャ型の持続も夏の高温リスクの増加に寄与している

最近10年で夏～秋の高温リスクが増加

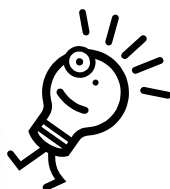
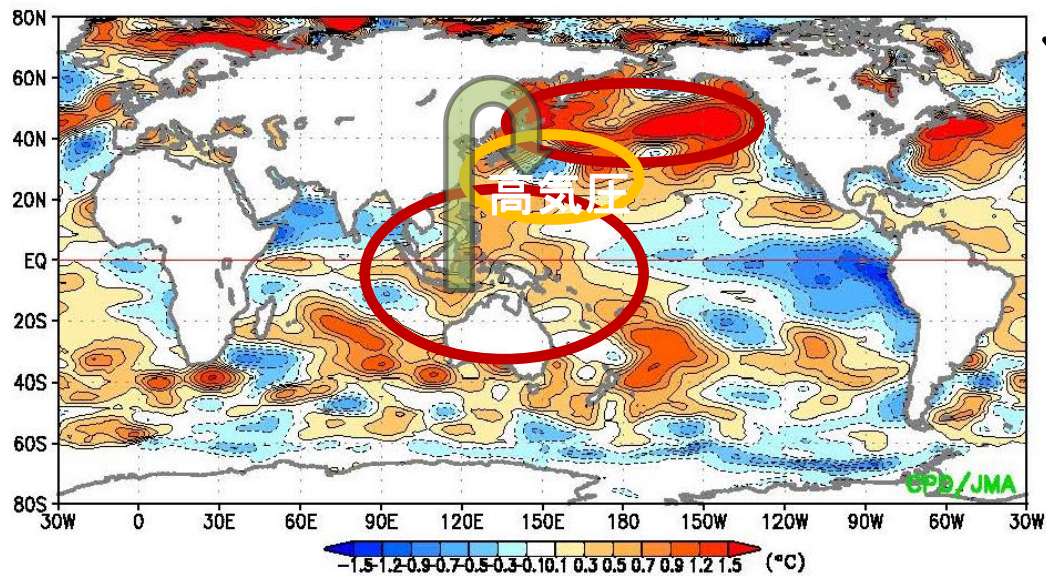
ハイエイトスと日本の夏

PDO負位相がハイエイトスの直接的な原因とする

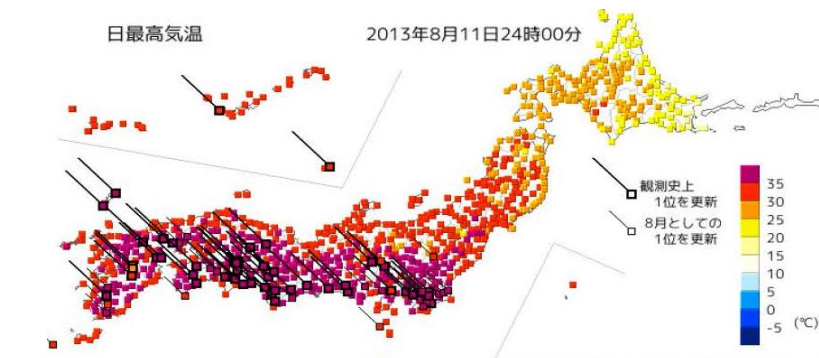
✓ 西太平洋の高いSST → 太平洋高気圧の強化?

✓ 北太平洋の高いSST → 日本付近の暑夏を増幅?

2013年7-8月の海面水温偏差



これらは2013年猛暑時に観測された特徴



EA研究の課題と発展

□ 現時点で可能なこと

- 大規模な大気場の変動に起因する猛暑・寒波などの異常気温イベント(2週間~1ヶ月よりも長い時間スケール)

□ 現時点で困難なこと

- 降水イベント(洪水、干ばつなど)
- 台風や豪雨などの比較的短時間のイベント

□ EAのエッセンス

多くのサンプルを作り出すこと

- ⇒ 同じような大きなアンサンブルを長期間で生成すれば、より多くの気象・気候変動に対する要因分析が可能に