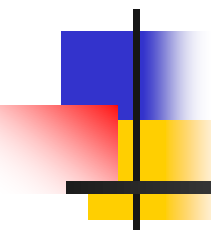


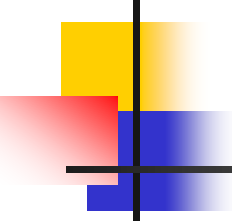
2012. 05. 09 Ver.1



地球温暖化とリスク

東京大学
IR3S/TIGS
住 明正

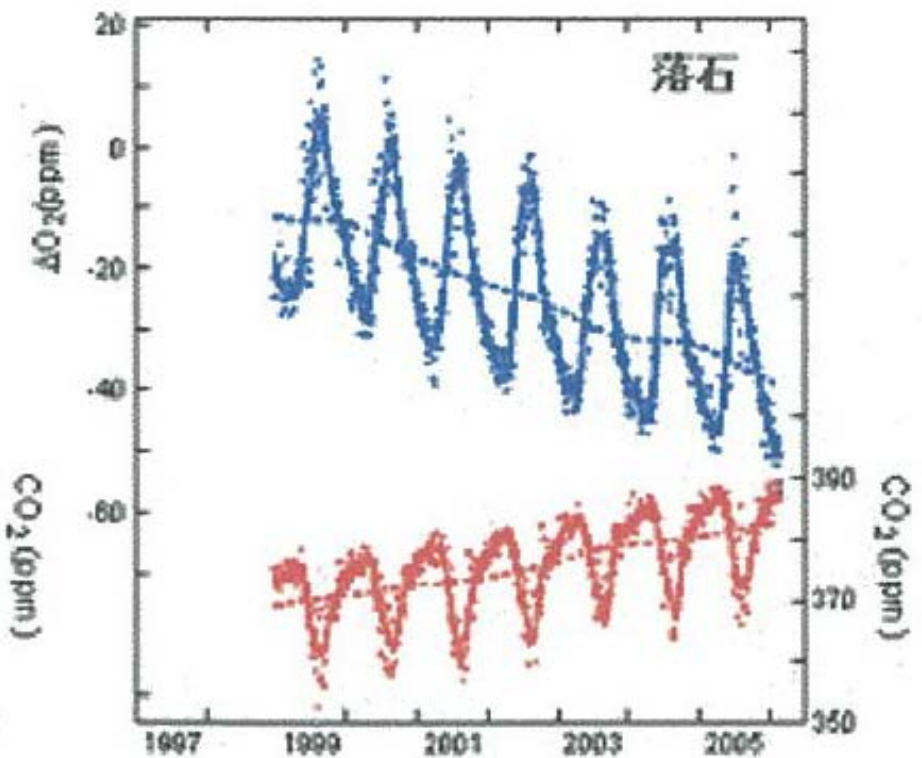
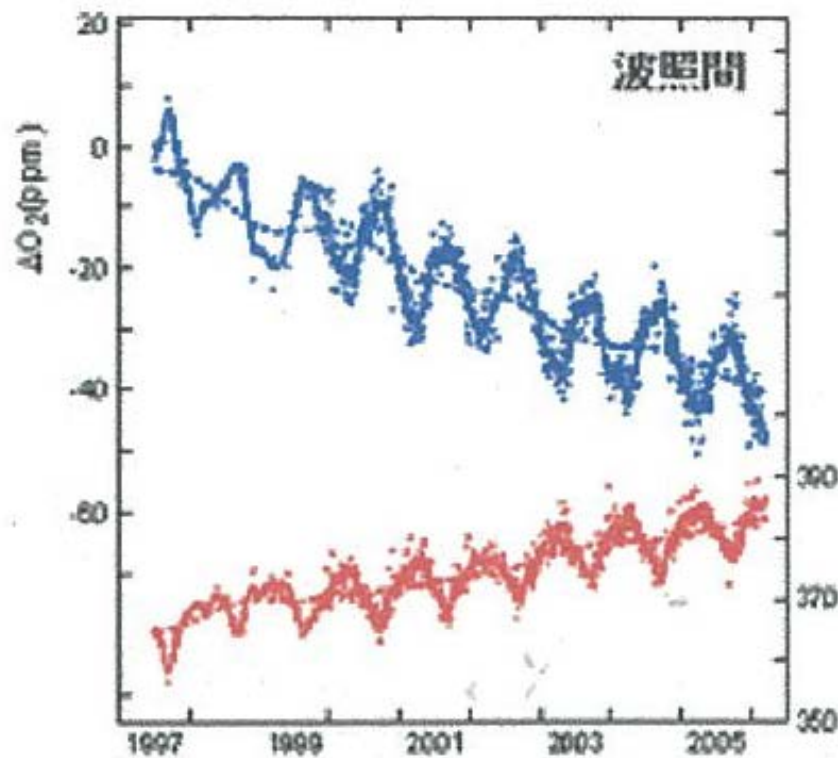
※: このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。



地球上に住むと言う制約

- 我々は、好き勝手に生きているわけではない。
- 地球環境の下に生きている
- そして、地球環境は有限の容量を持っている
 - 宇宙船地球号
 - 成長の限界(ローマクラブ)
- その制約の下で生きてゆくか？
- その制約を打ち破って生きてゆくか？

When CO₂ is emitted, O₂ is decreasing!



Circulation is critical for sustainability!

† (独) 国立環境研究所ご提供

(独) 国立環境研究所記者発表2008年1月23日

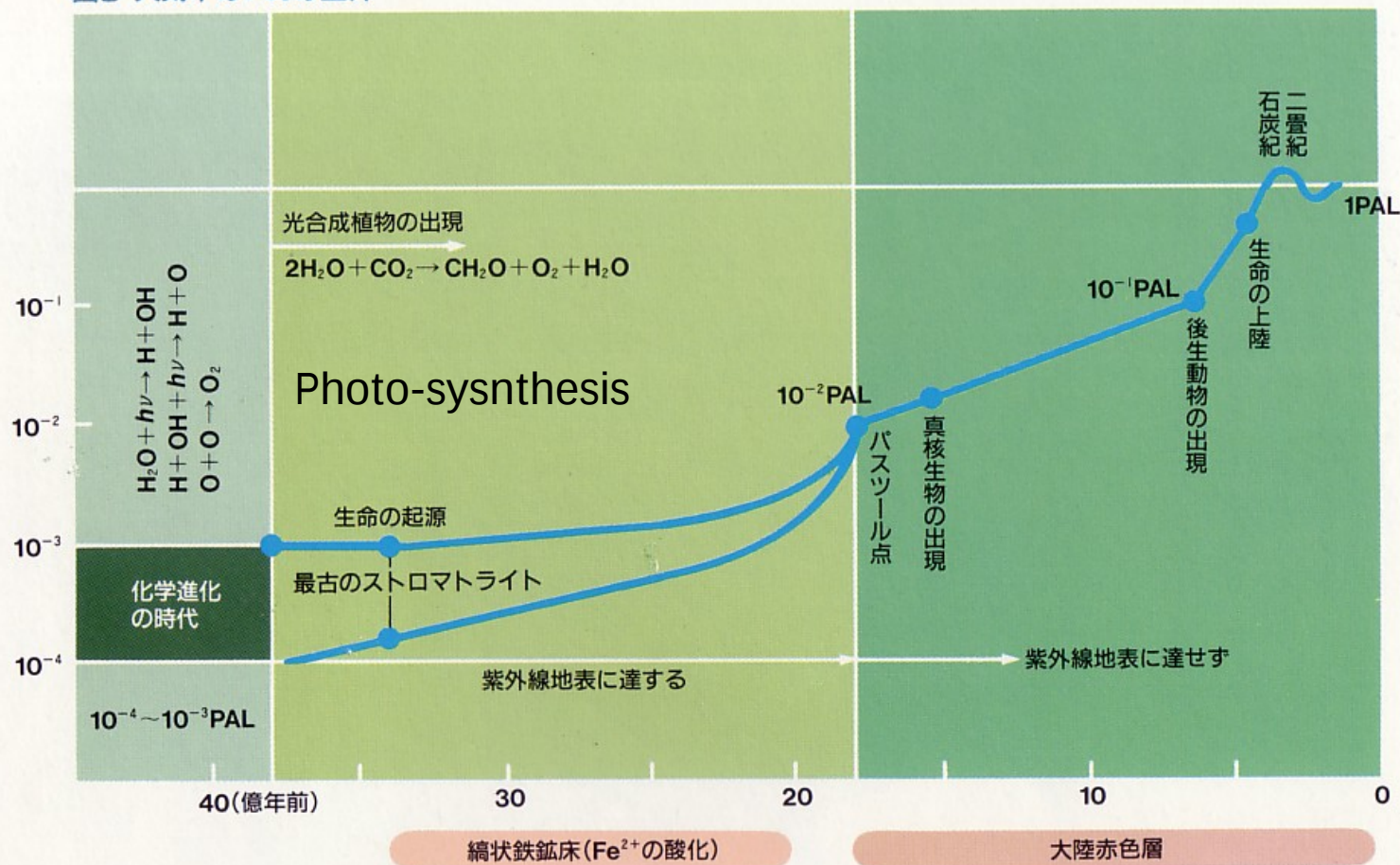
「大気中酸素濃度の減少量から二酸化炭素の陸域生物圏吸収量の推定に成功

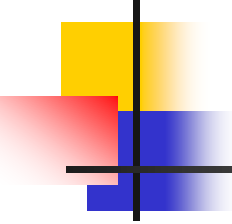
-放出された化石燃料起源の二酸化炭素の30%が海洋に、14%が陸域生物圏に吸収-

図2 波照間島及び落石岬における大気中の酸素濃度(青)及び二酸化炭素濃度(赤)の観測結果

Oxygen has been accumulated in the Earth history!

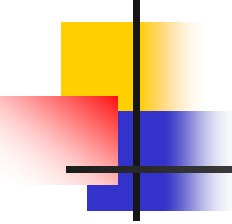
図8 大気中の P_{O_2} の上昇





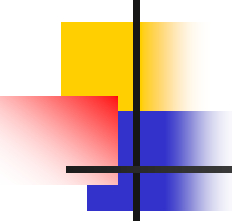
リスクとは？（１）

- 何かしら不都合なことが起きること
- 誰にとって？
- どういう状況で？



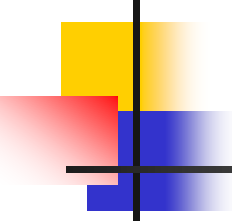
リスクとは(2)

- 個人にとって、
- 人類にとって、
- **将来のこと**(時間スケールは問わず)
- **不確実性**が不可避(確率統計現象)
- 状況が複雑、全貌が分からない
- 矛盾する、あるいは、対立する要因があり、
、どうしていいか、わからない。
- 意思決定メカニズム



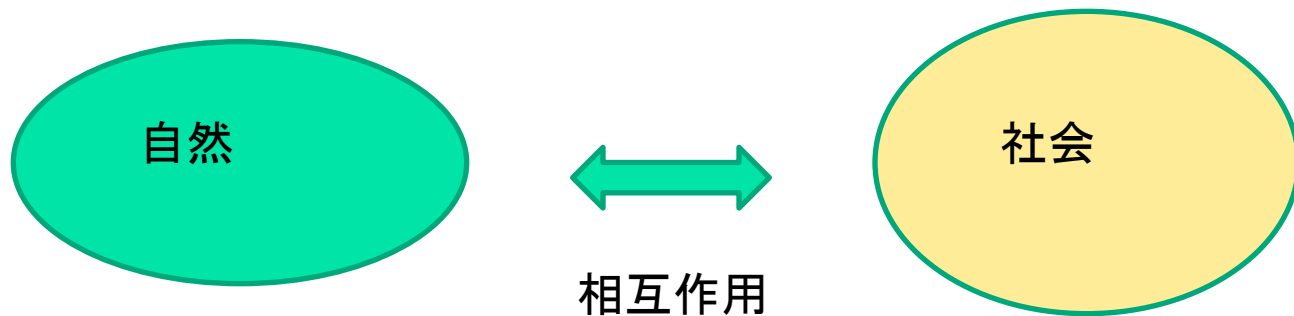
地球温暖化に伴うリスク

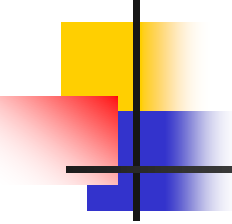
- 地球温暖化そのもの（科学的理解）
- その結果としての影響評価
- 将来の排出シナリオ
- 社会の変化



地球温暖化問題とは何か？

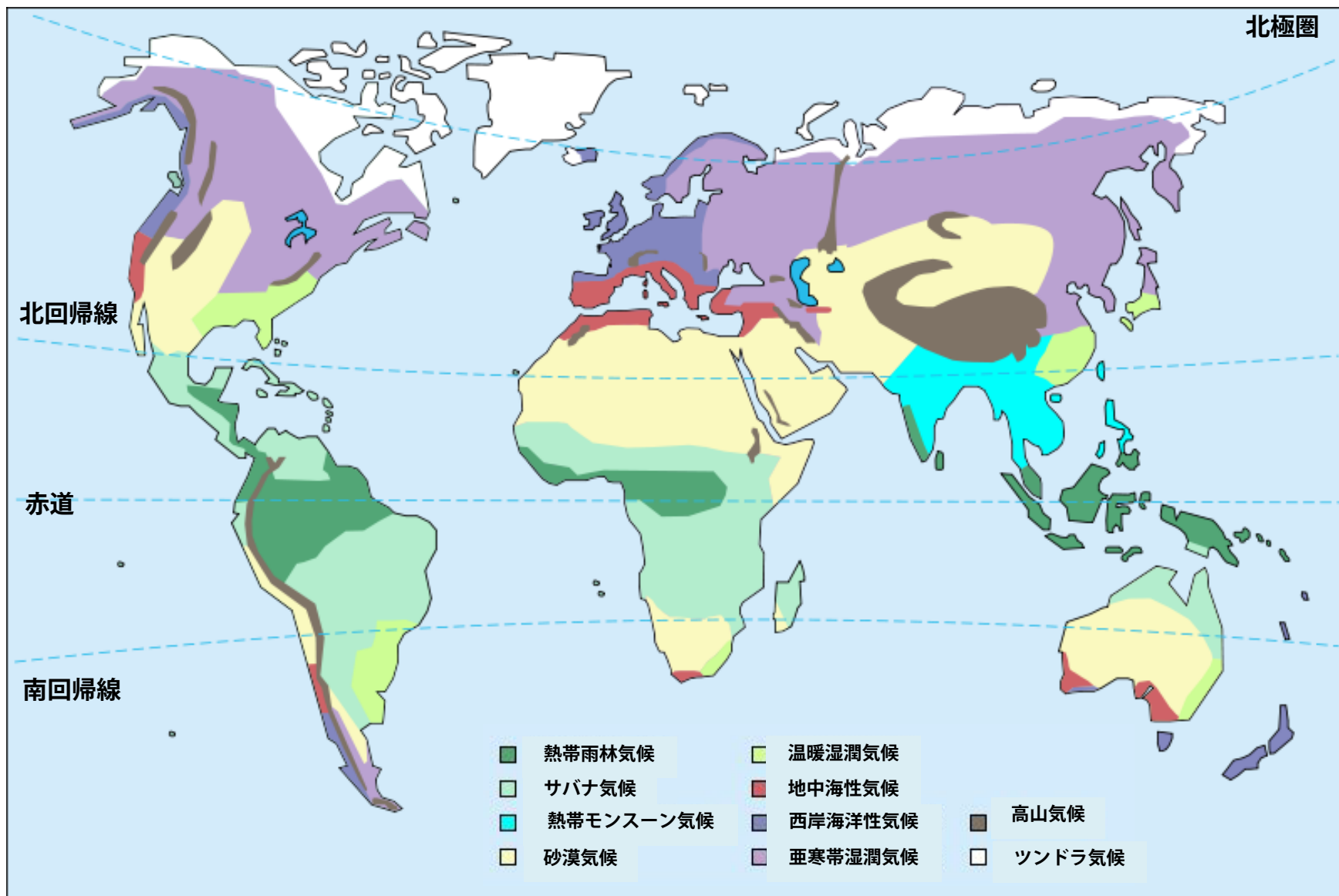
- 人間活動により、地球の気候が変化する
 - 地球の気候がどのようにして決まっているのか？
 - 人間活動が、どのように地球の気候の決まり方に影響を与えているか？



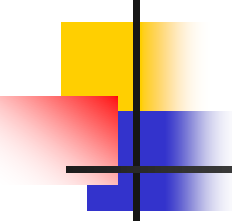


気候とは何か？

- 気象現象や海象現象の標本平均
- 普通は、時間平均
- 気候は、温度（エネルギー）と降水量で特徴づけられる
- ケッペンの気候区分



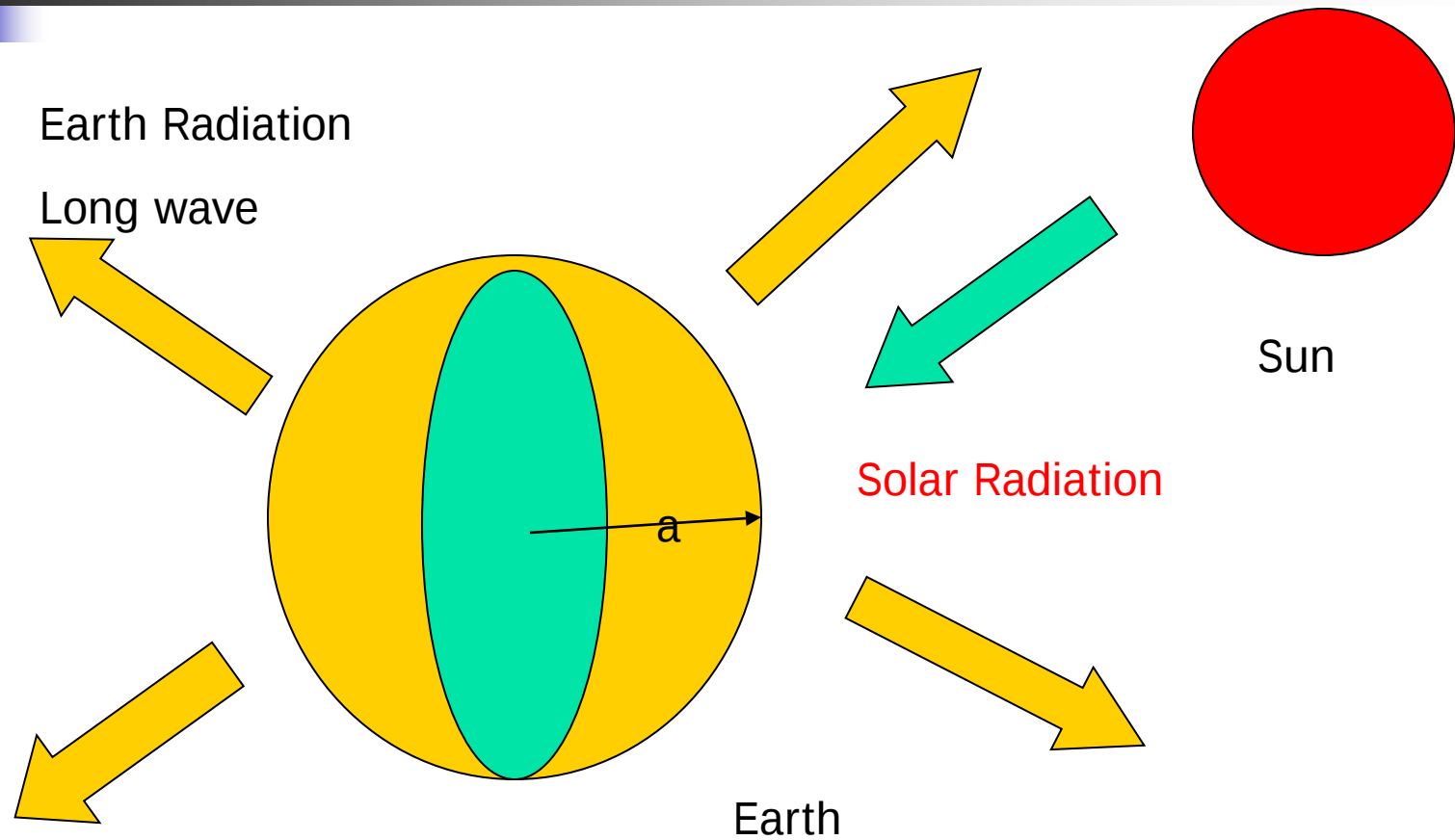
Wikipediaより転載(2012/5/22)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Climates_in_the_world.svg?uselang=ja



気候形成の理論

- 太陽エネルギーの下で、エネルギー平衡の結果として、気候が決まる。
- 時間スケールが重要（必ずしも、瞬時にバランスするわけではない）
- 大気中の成分による温室効果が重要
- 人間活動は、大気の組成を変化させ、地表面を変化させたりして、このバランスを乱す

Radiation Balance on the Earth



熱放射（放射場と物質の平衡）

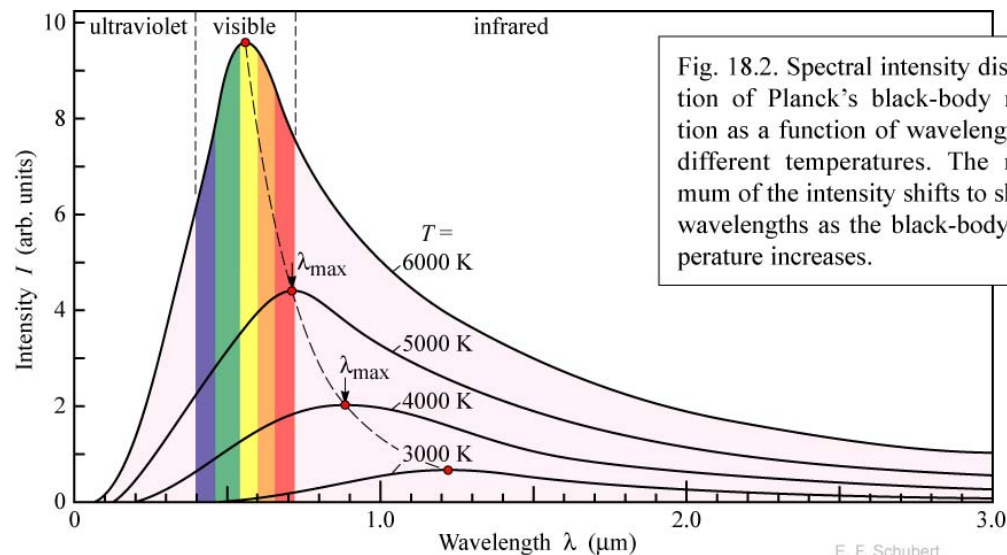


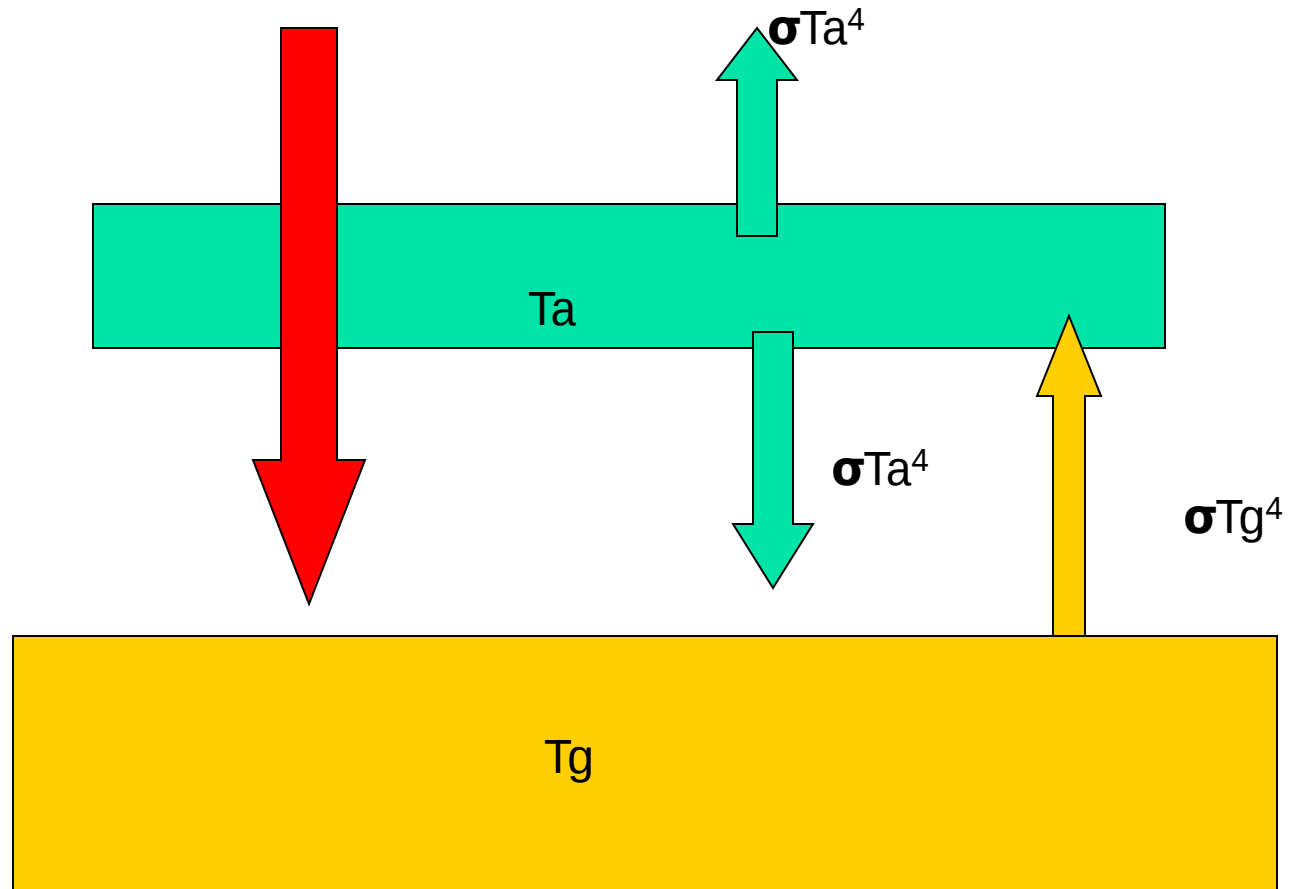
Fig. 18.2. Spectral intensity distribution of Planck's black-body radiation as a function of wavelength for different temperatures. The maximum of the intensity shifts to shorter wavelengths as the black-body temperature increases.

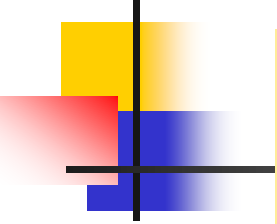
E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

† Image; <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/>
E. Fred Schubert "Light-Emitting Diodes" second edition (Cambridge University Press, Cambridge UK, 2006)

温室効果の簡単な説明

I_0 (Solar Input)



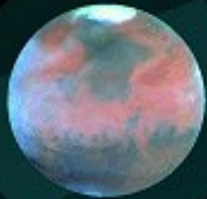


著作権の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

Goody and Yung, *Atmospheric Radiation: Theoretical Basis*,
2nd. ed., Oxford University Press, 1989, p. 4, FIG. 1.1.

Planets and atmospheres

Mars
Thin atmosphere
(Almost all CO₂ in ground)
Average temperature : - 50°C



Earth
0,03% of CO₂ in the atmosphere
Average temperature : + 15°C



Venus
Thick atmosphere
containing 96% of CO₂
Average temperature : + 420°C



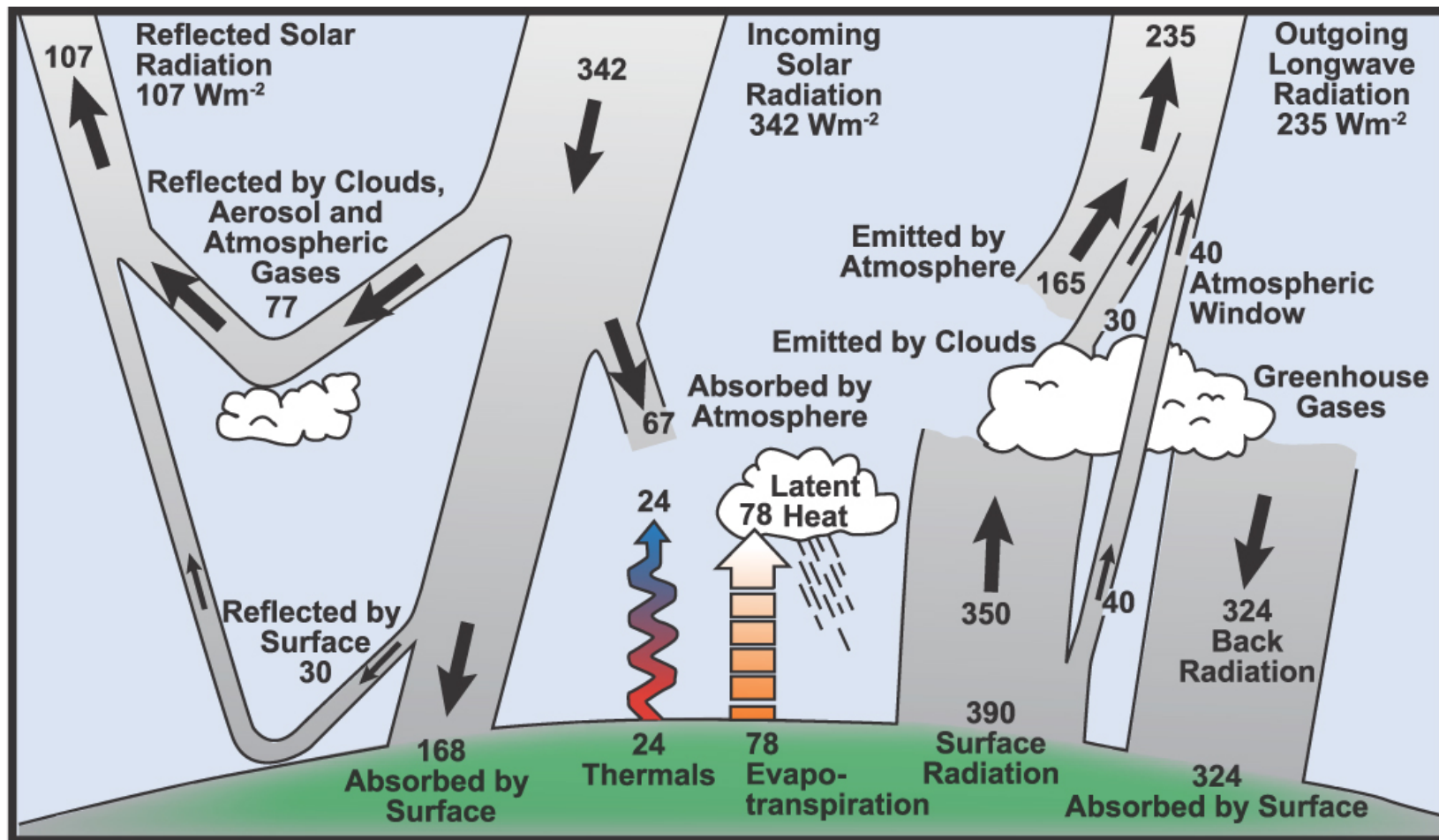
GRID
Arendal  **UNEP**

GRAPHIC DESIGN : PHILIPPE REKACEWICZ

Sources: Calvin J. Hamilton, Views of the solar system, www.planetscapes.com; Bill Arnett, The nine planets, a multimedia tour of the solar system, www.seds.org/billa/tnp/nineplanets.html

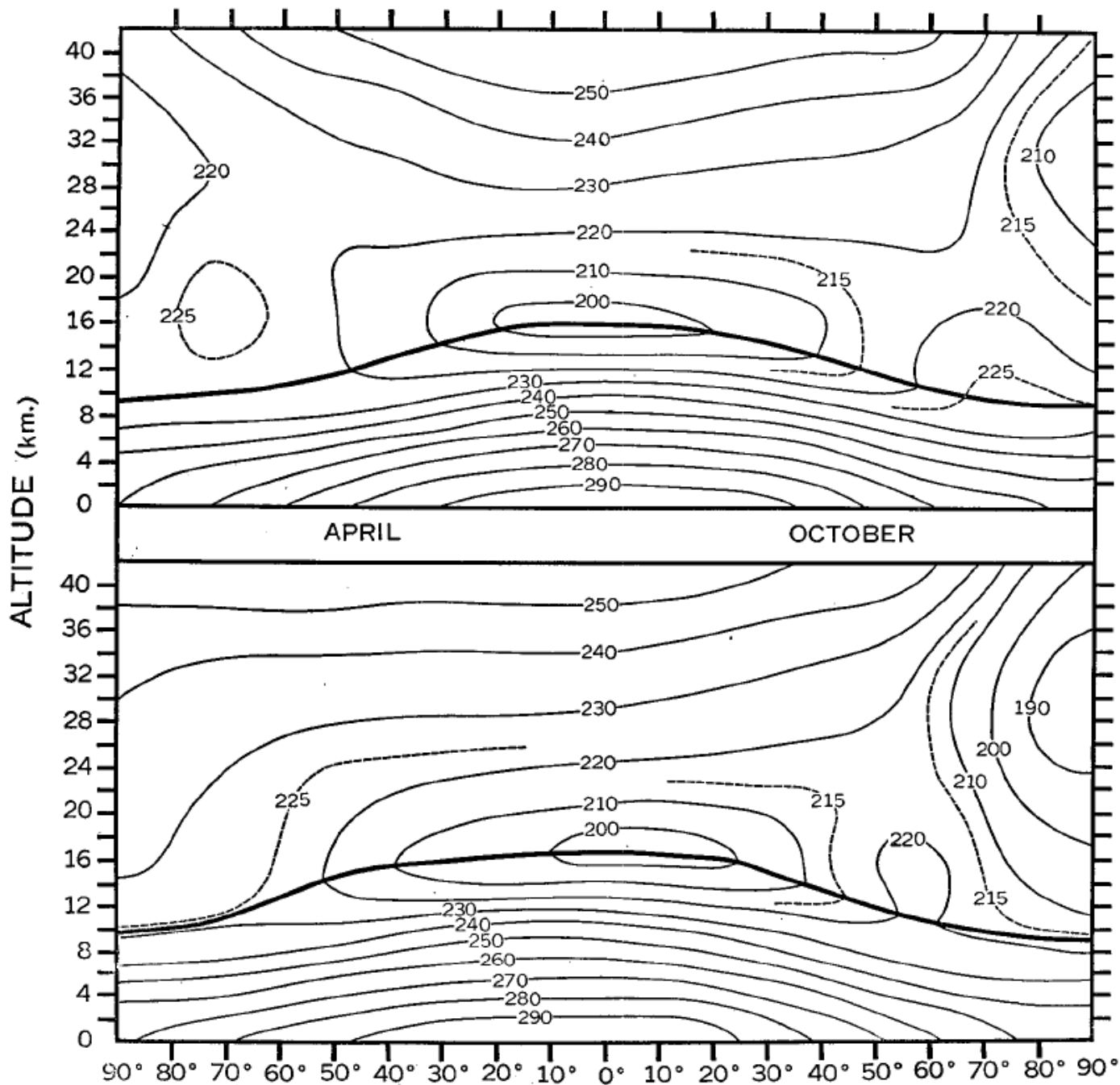
† UNEP(United Nations Environment Programme)/GRID-Arendal
<http://www.grida.no/publications/vg/climate/page/3056.aspx>

Radiation Balance (Energy Flow)



Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I
Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel
on Climate Change, FAQ 1.1 Figure 1, Cambridge University Press.

Energy Cycle cannot be separated from Water Cycle!



† Manabe and Strickler (1964) Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Convective Adjustment, *Journal of the Atmospheric Sciences* 21(4): 361–385, Fig.12. (c) American Meteorological Society. Used with permission.

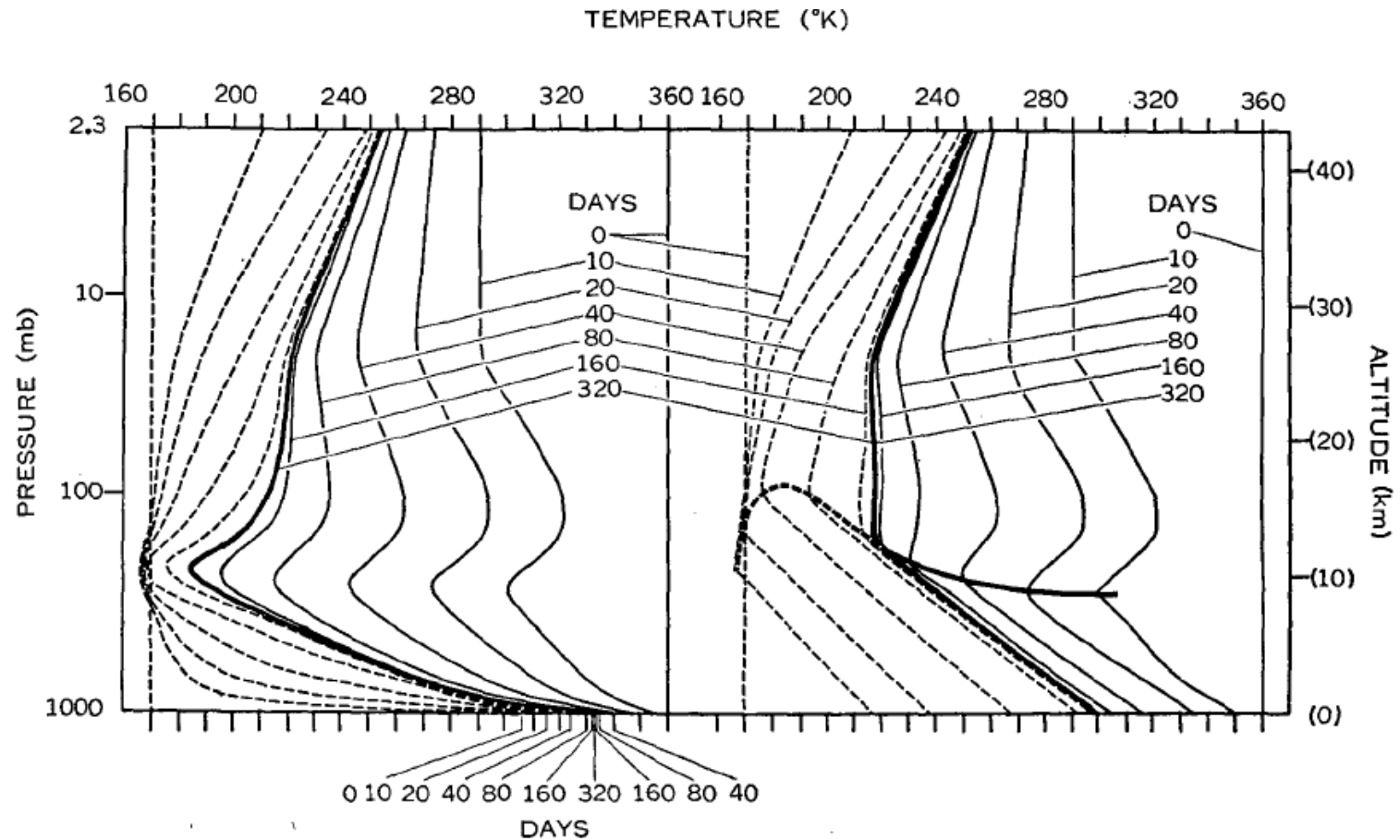


FIG. 1. The left and right hand sides of the figure, respectively, show the approach to states of pure radiative and thermal equilibrium. The solid and dashed lines show the approach from a warm and cold isothermal atmosphere.

† Manabe and Strickler (1964) Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Convective Adjustment, *Journal of the Atmospheric Sciences* 21(4): 361–385, Fig.1. (c)American Meteorological Society. Used with permission.

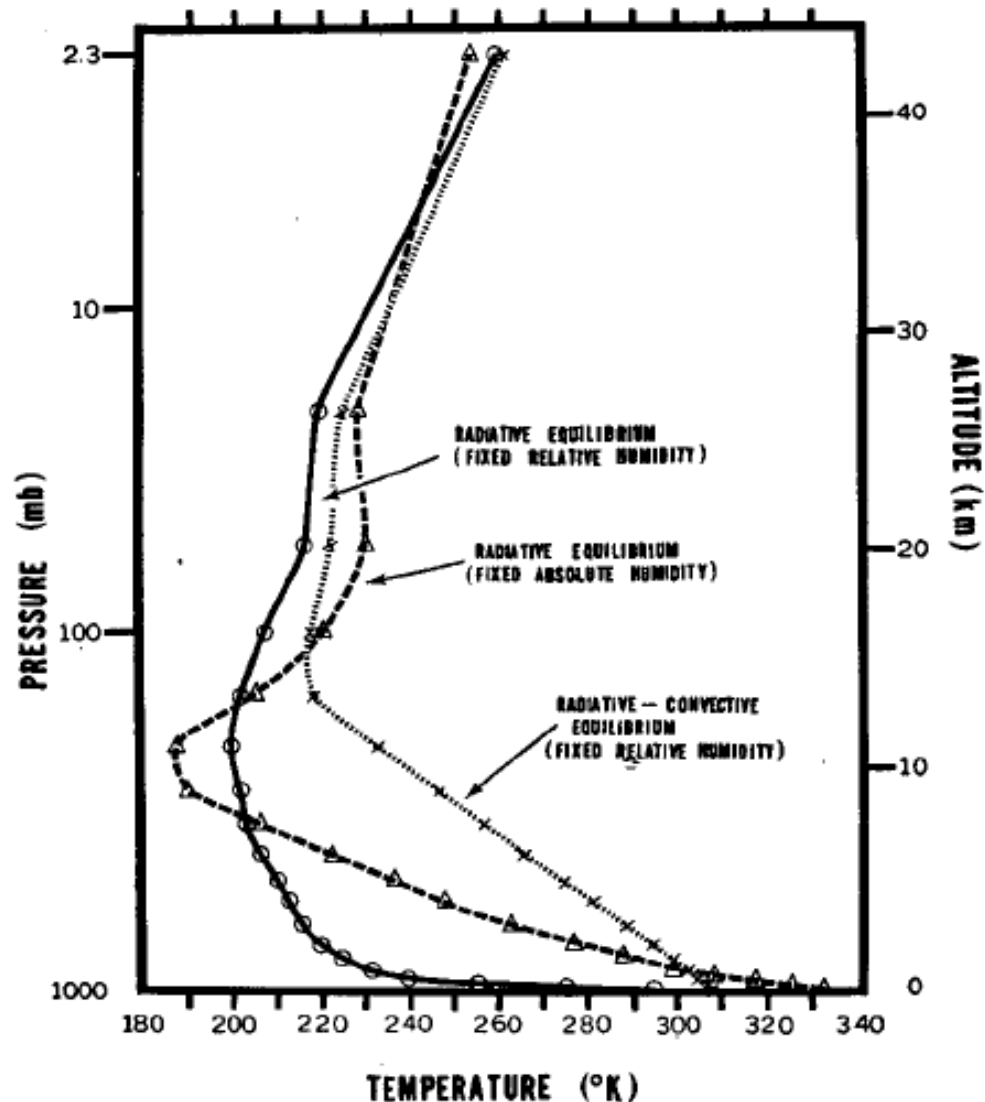


FIG. 5. Solid line, radiative equilibrium of the clear atmosphere with the given distribution of relative humidity; dashed line, radiative equilibrium of the clear atmosphere with the given distribution of absolute humidity; dotted line, radiative convective equilibrium of the atmosphere with the given distribution of relative humidity.

† Manabe, Syukuro, Richard T. Wetherald (1967) Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity, *Journal of the Atmospheric Sciences* 24(3): 241–259, Fig. 5. (c)American Meteorological Society. Used with permission.

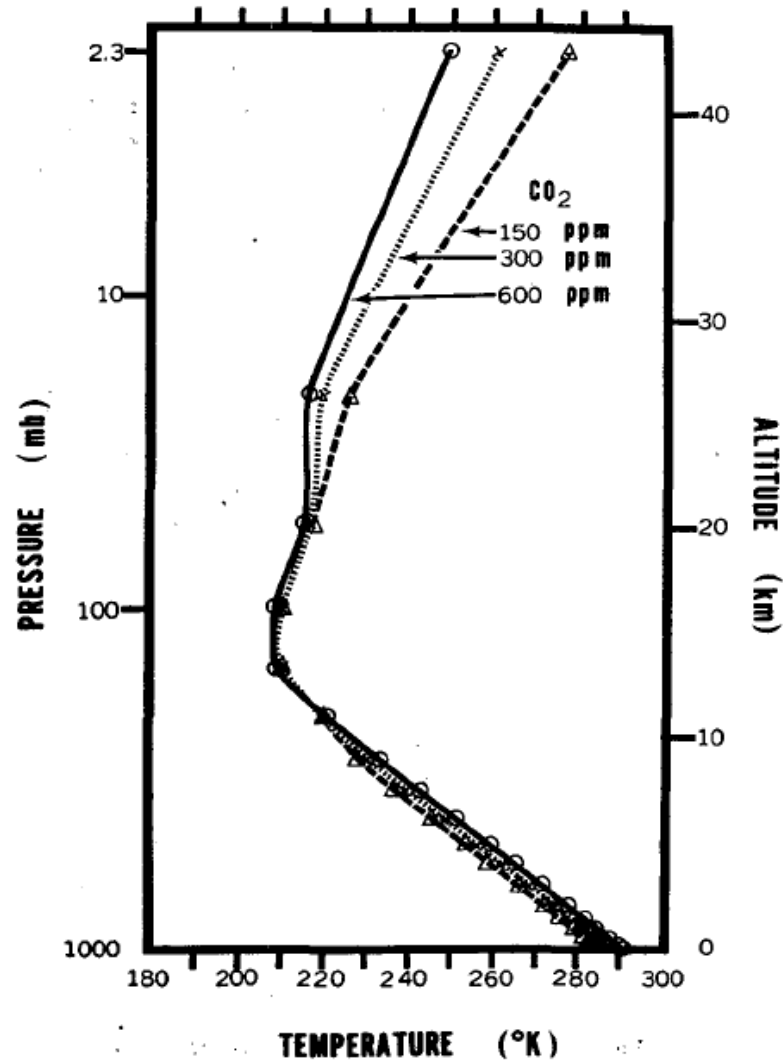
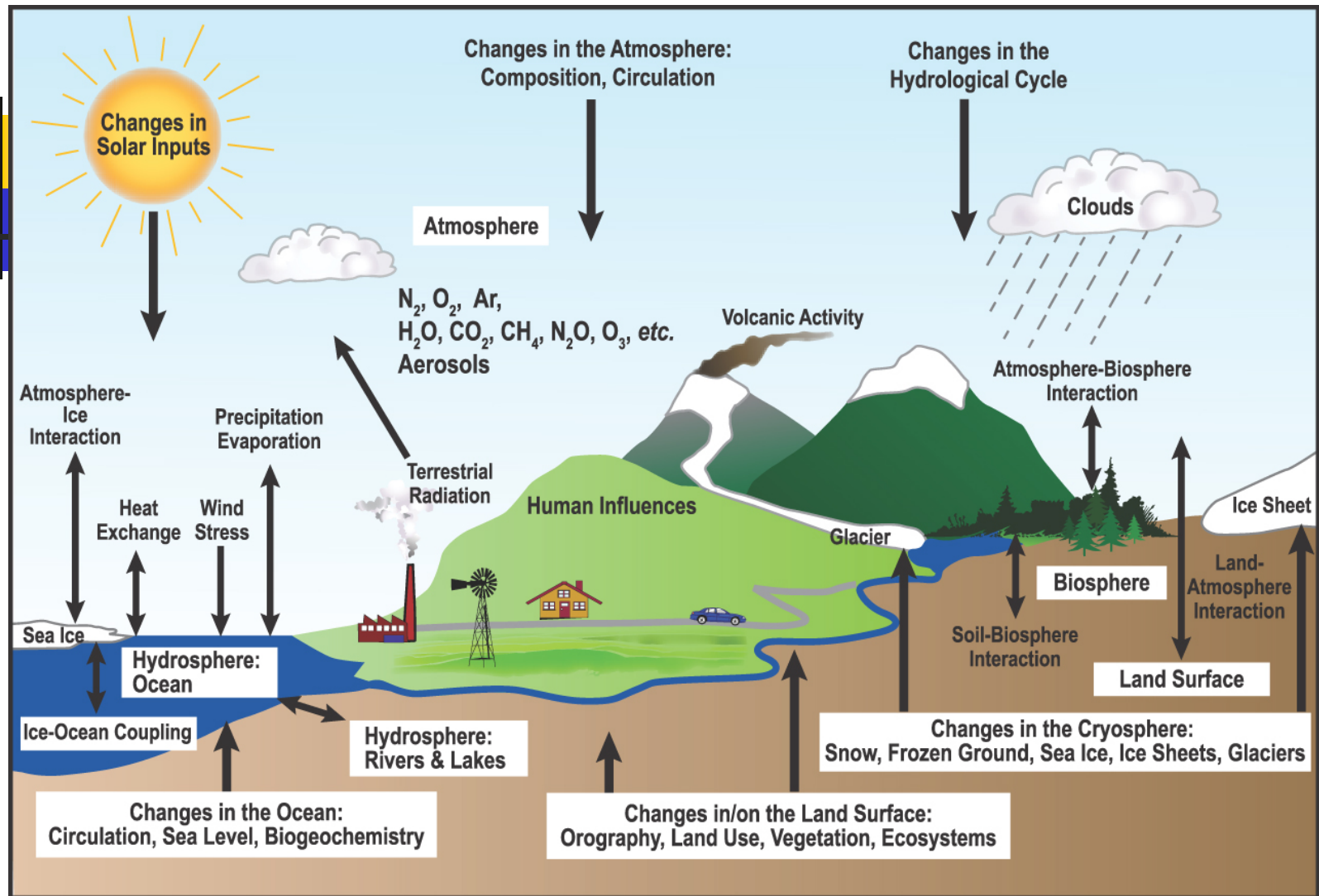


FIG. 16. Vertical distributions of temperature in radiative convective equilibrium for various values of CO₂ content.

† Manabe, Syukuro, Richard T. Wetherald (1967) Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity, *Journal of the Atmospheric Sciences* 24(3): 241–259, Fig.16.

(c)American Meteorological Society. Used with permission.

Climate System



Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, FAQ 1.2 Figure 1, Cambridge University Press.

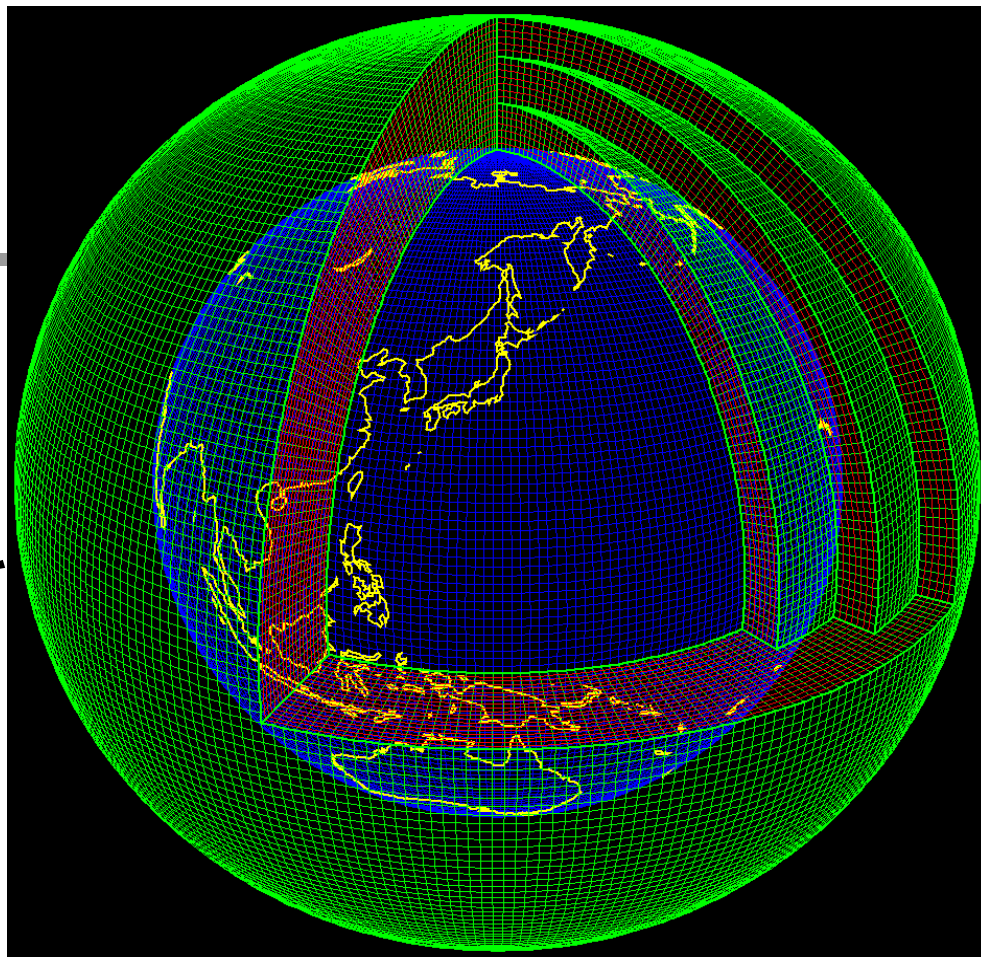
Complex System

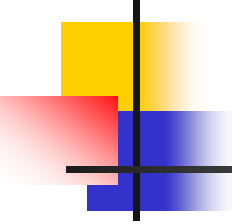
Sub-systems are interacting mutually

気候モデルとは？



格子で地球を覆い、
風や温度、雲などを
計算する





気候モデルは、スーパーコンピュータとともに

- 当初から(ENIACの時代から)、気象の計算は、暗号解読とともに、スーパーコンピュータの重要なUser
- ベクトル型
- 並列マシンでは
- 素子開発とアーキテクチャー
- 省エネが不可欠

The Earth Simulator



独立行政法人海洋研究開発機構／地球シミュレータセンター

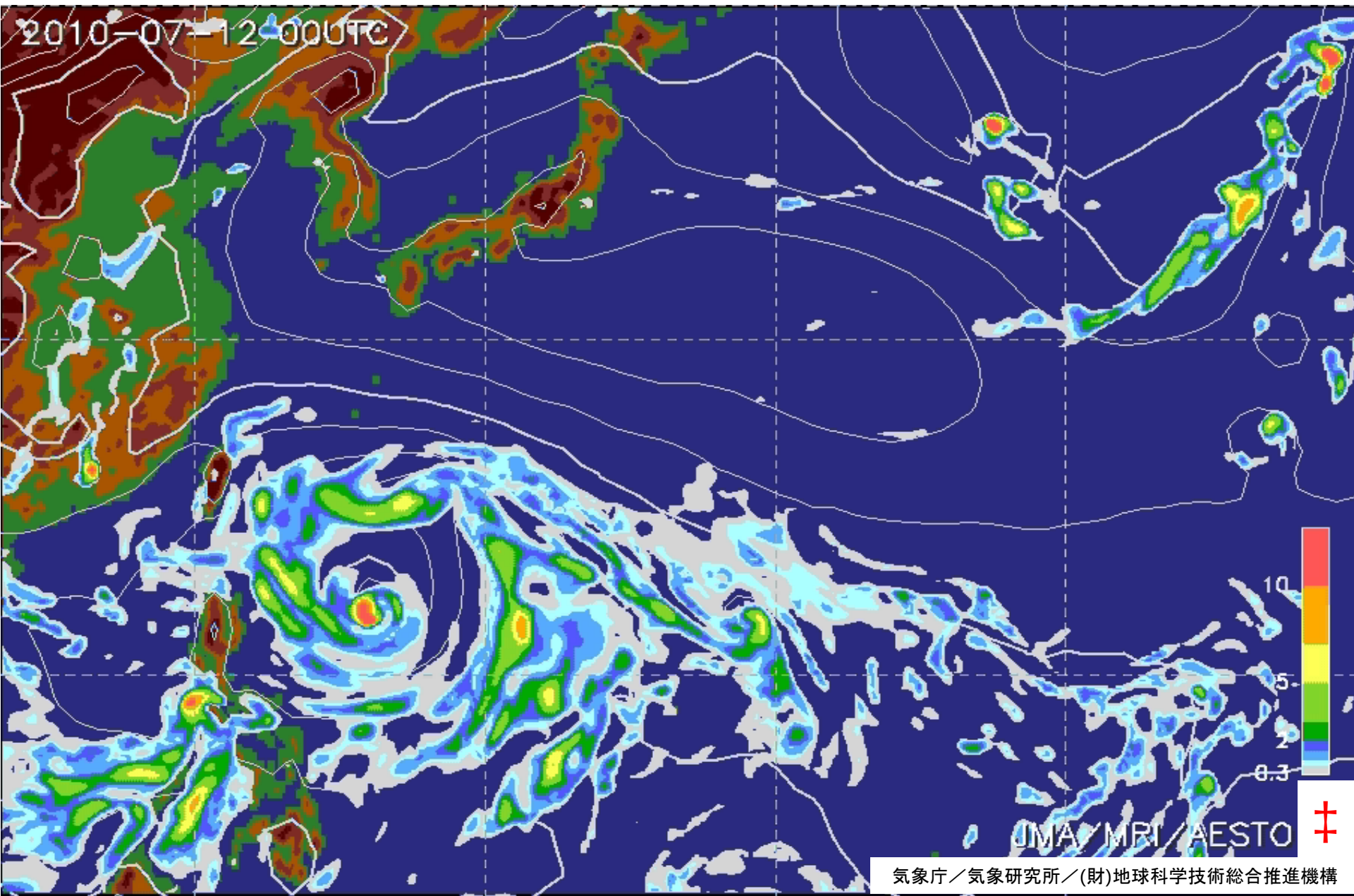


©RIKEN

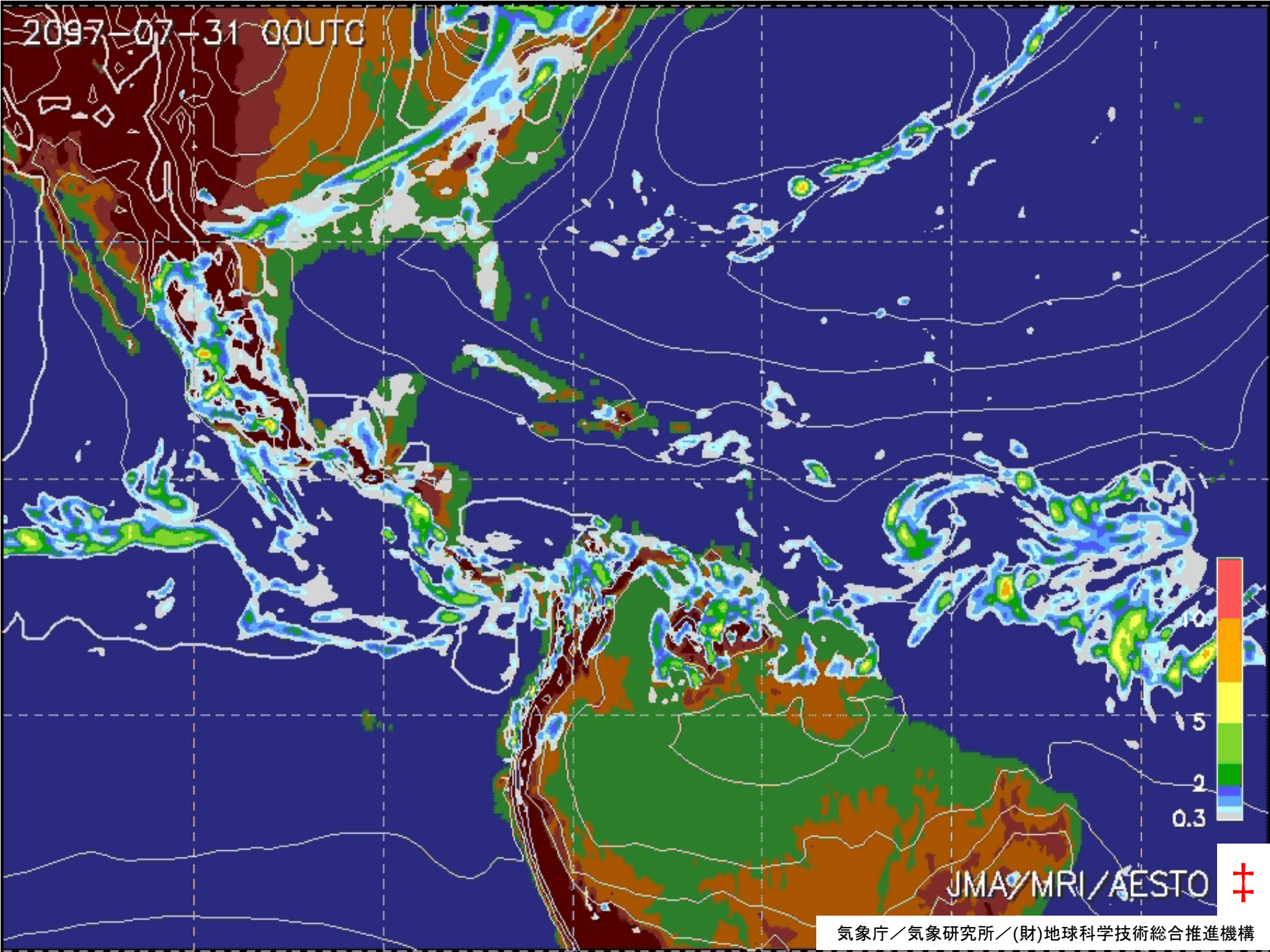


提供: (独) 理化学研究所

An extremely intense typhoon appears in the future expt. (AS)
with MIROC Δ SST (max sfc wind 68.8 m/s, CP 877.6 hPa)



2097-07-31 00UTC



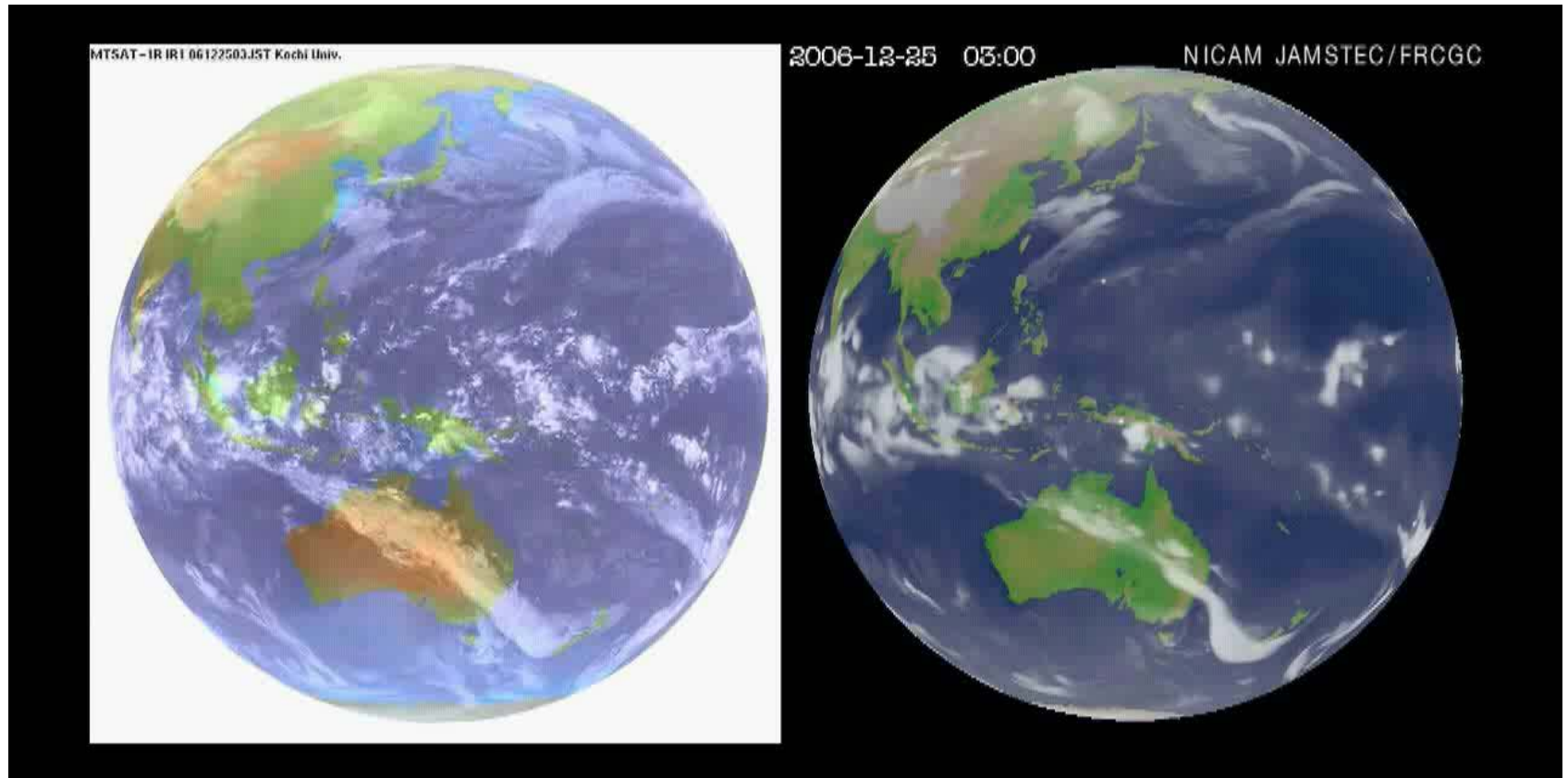
JMA/MRI/AESTO



NICAMにより再現された雲分布

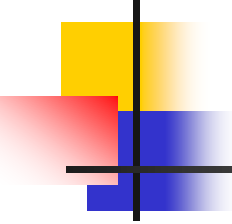
静止気象衛星ひまわり6号の雲画像

NICAM 3.5km メッシュシミュレーション



三浦裕亮氏ご提供画像

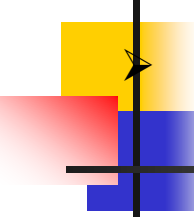
Miura et al.(2007,Science)



地球温暖化の原因推定

- 完全な推定は不可能
- 実験室とは異なる、繰り返し試行
- 気候モデルによるシミュレーション
- 気候モデルの能力に依存
- 天気予報などの結果？
- 20世紀の気候の再現？

20世紀再現実験で考慮する外部強制



➤ 自然起源の気候影響

- ✓ 太陽定数変動 (Lean et al., 1995)
- ✓ 火山噴火に伴う成層圏エアロゾル放出 (Sato et al., 1993)

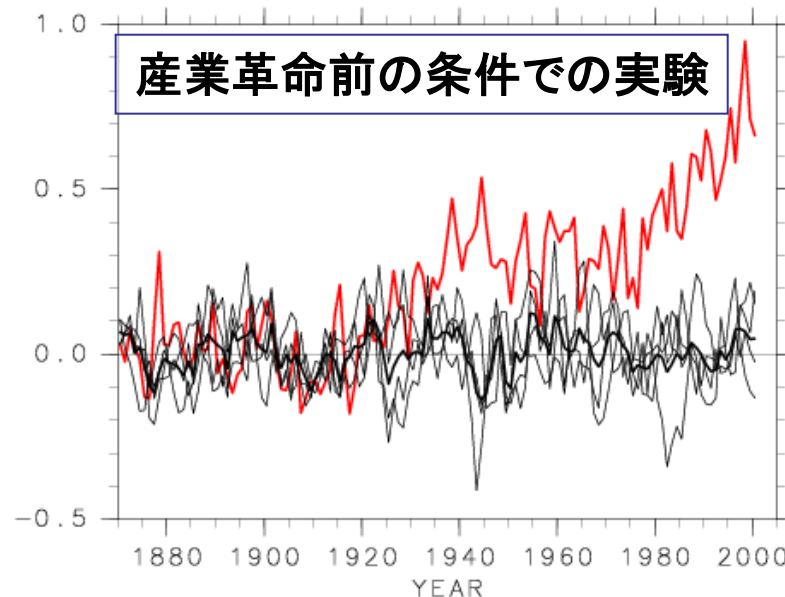
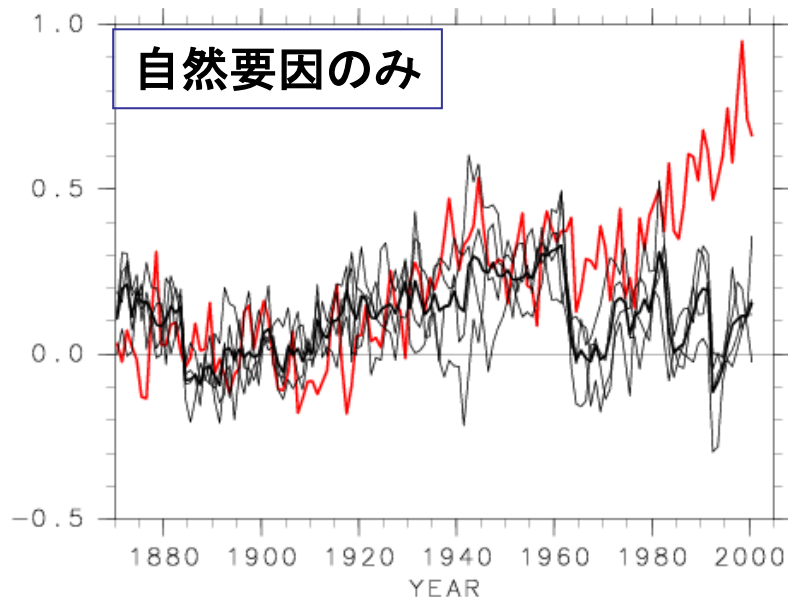
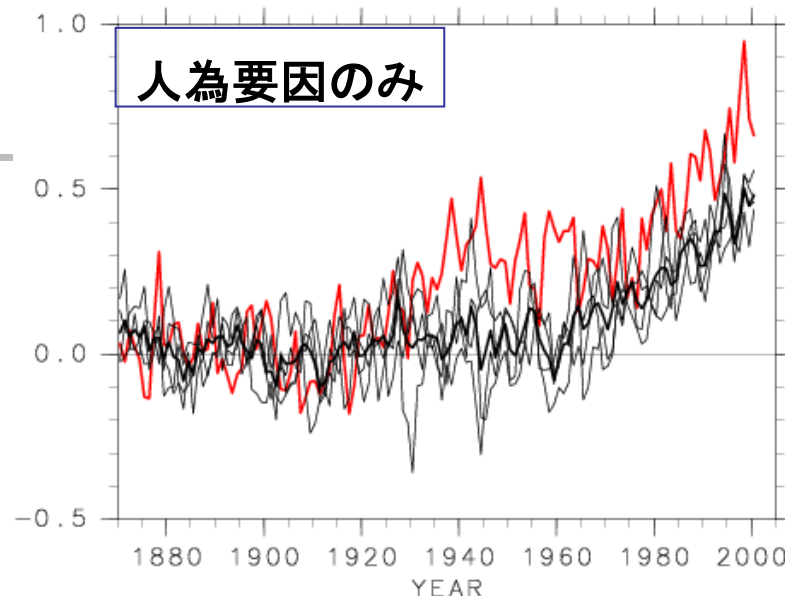
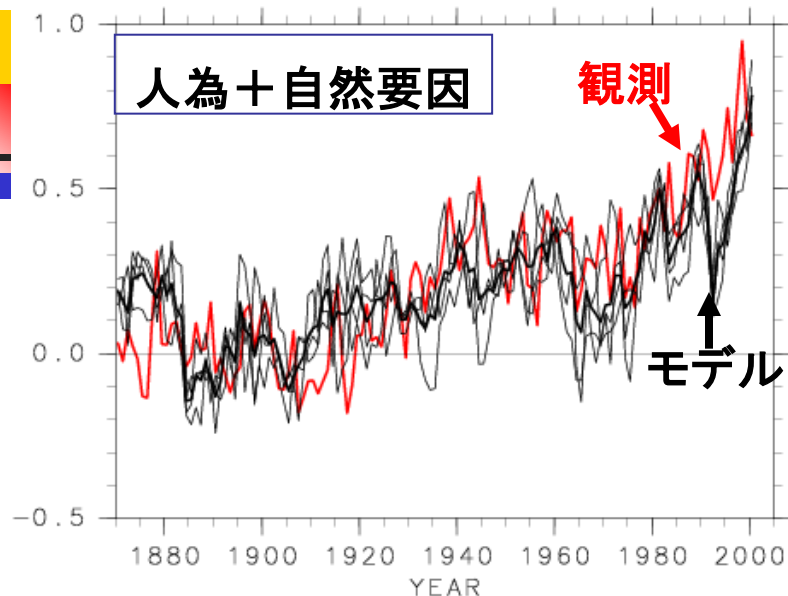
➤ 人為起源の気候影響

- ✓ 温室効果気体の増加 (Radiation+MATSIRO)
- ✓ 成層圏オゾンの減少
- ✓ 対流圏オゾンの増加
- ✓ 化石燃料燃焼に伴う SO_2 放出
- ✓ 化石燃料燃焼、生活用木燃料利用、農業廃棄物燃焼、森林火災に伴う炭素性エアロゾル前駆物質の放出
- ✓ 土地利用変化 (LAIの変化)

※ 海塩粒子、土壌性ダストについてはモデル変数(地上風速、土壌水分量、積雪など)より診断しているため、外部強制とは考えない

20世紀気候再現実験

全球平均地表気温—18世紀末からの変化



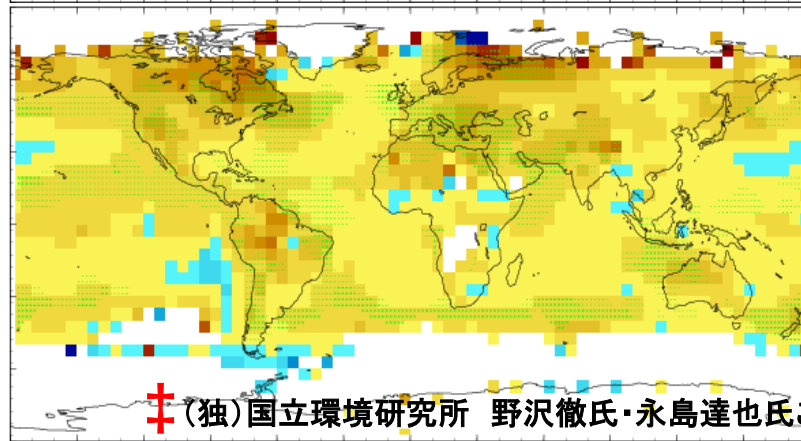
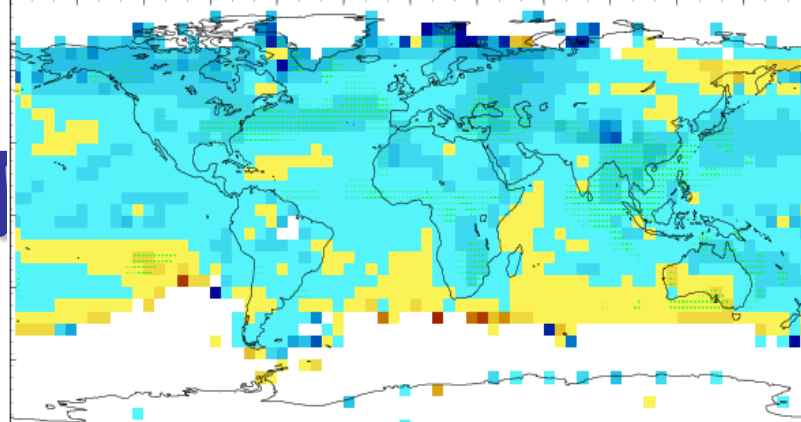
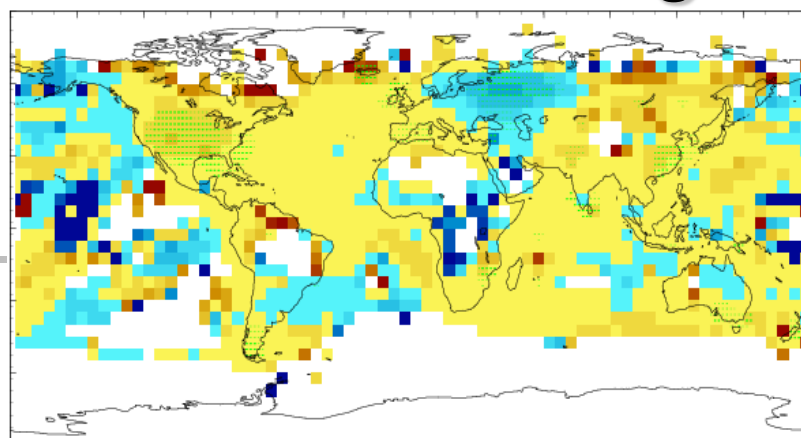
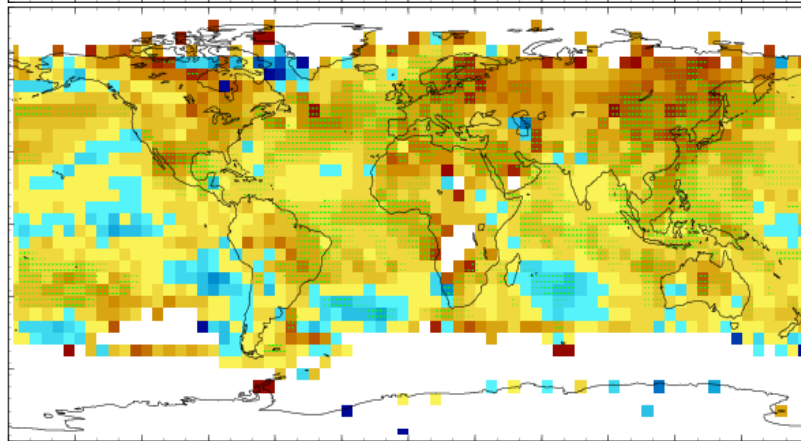
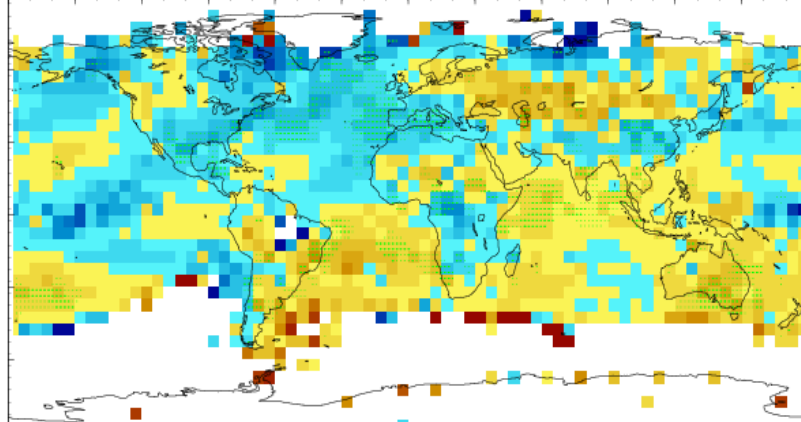
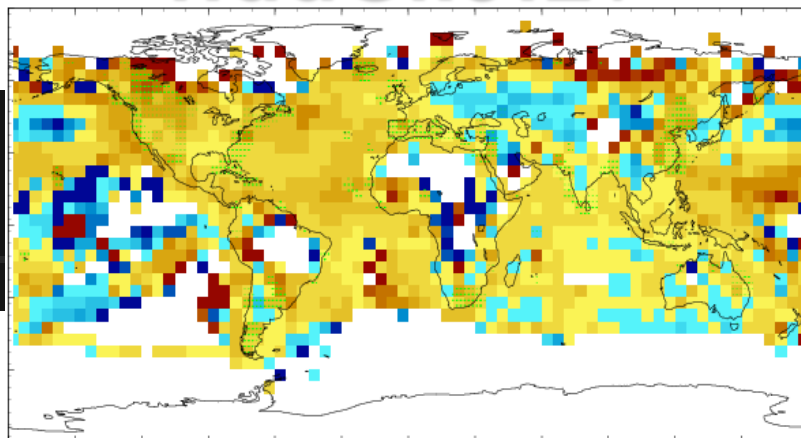
HadCRUT2v

Ensemble Average

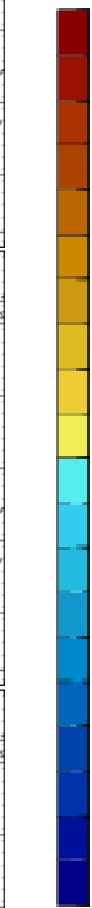
1910→1945

1946→1975

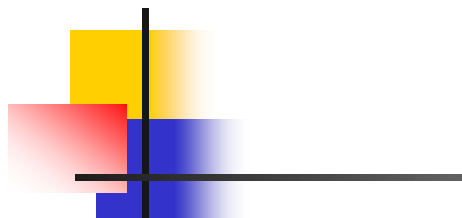
1976→2000



+1K
/10yr



-1K
/10yr



信頼度は？

GLOBAL MEAN WARMING: MODEL PROJECTIONS COMPARED WITH OBSERVATIONS

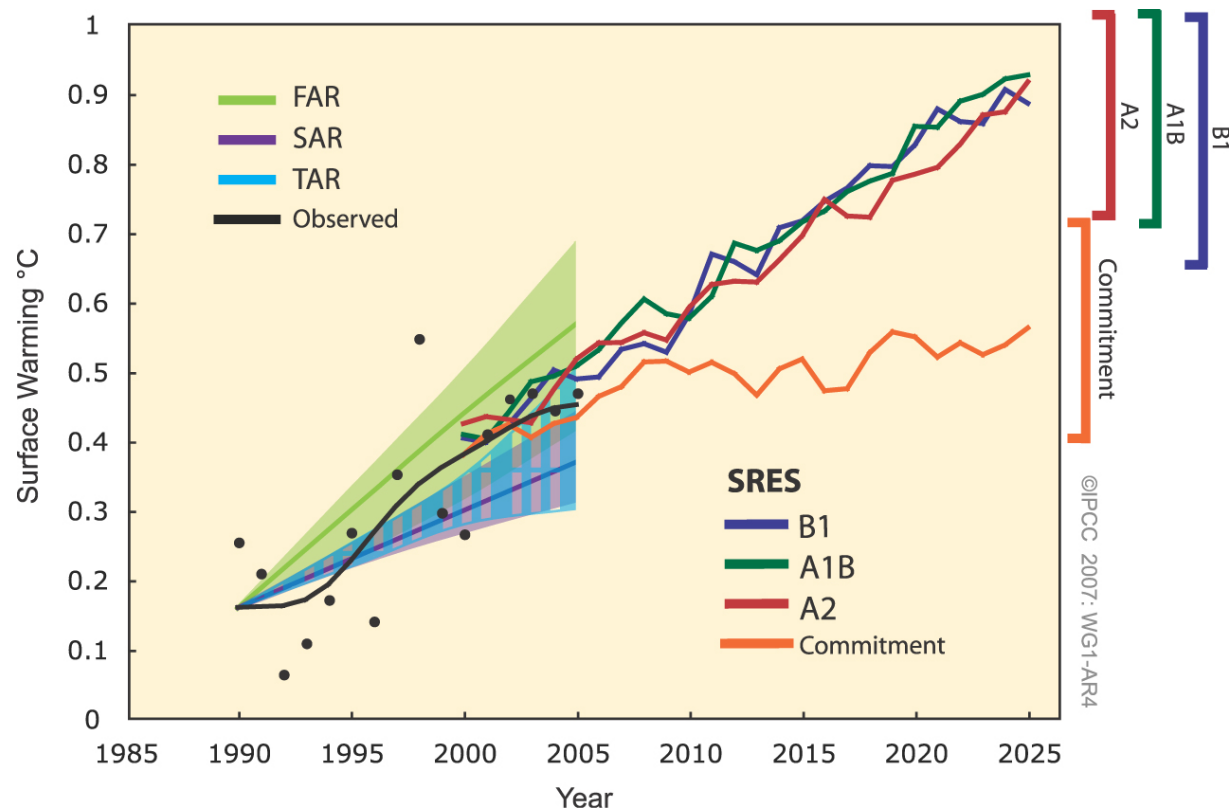
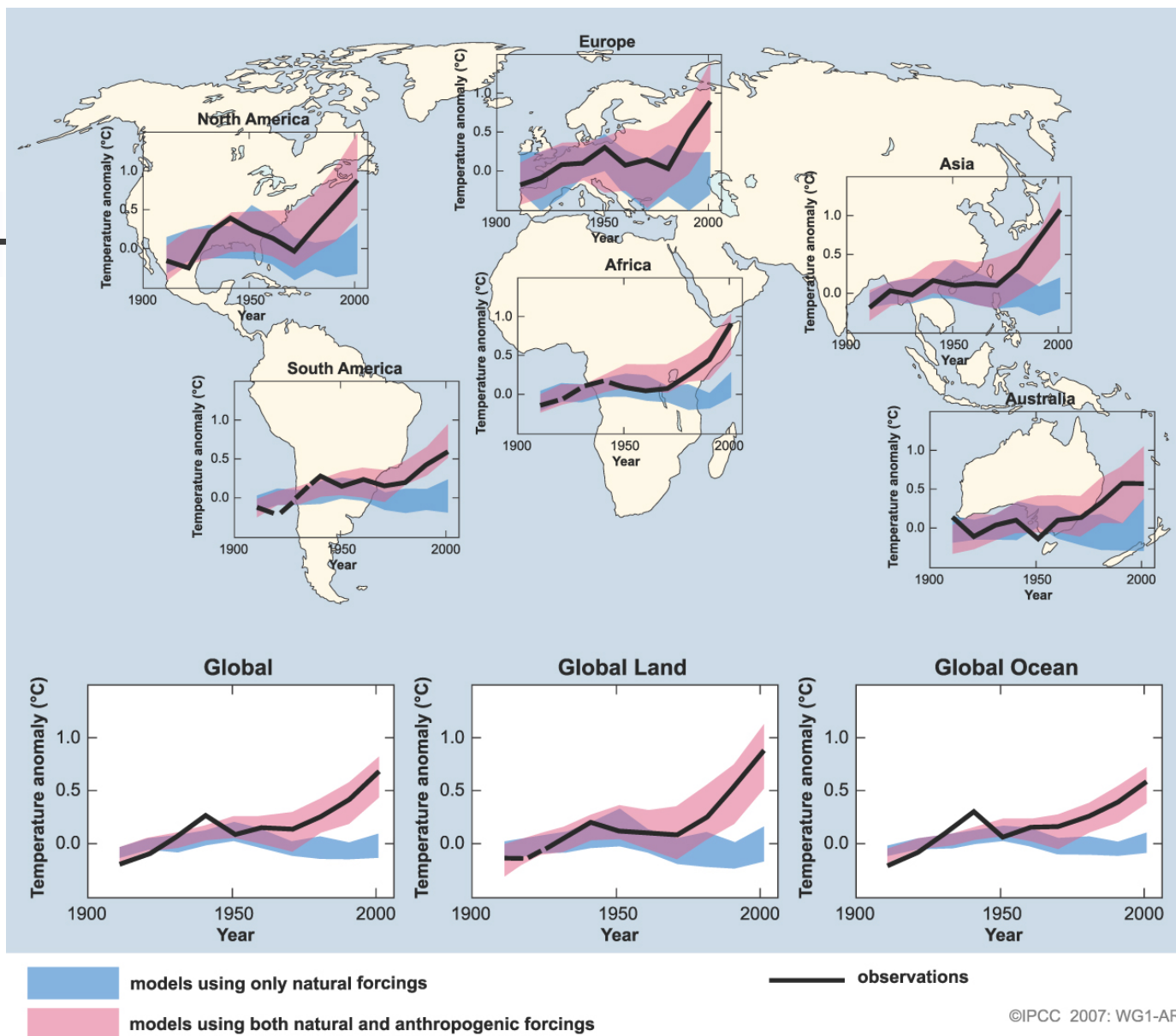


Figure TS.26. Model projections of global mean warming compared to observed warming. Observed temperature anomalies, as in Figure TS.6, are shown as annual (black dots) and decadal average values (black line). Projected trends and their ranges from the IPCC First (FAR) and Second (SAR) Assessment Reports are shown as green and magenta solid lines and shaded areas, and the projected range from the TAR is shown by vertical blue bars. These projections were adjusted to start at the observed decadal average value in 1990. Multi-model mean projections from this report for the SRES B1, A1B and A2 scenarios, as in Figure TS.32, are shown for the period 2000 to 2025 as blue, green and red curves with uncertainty ranges indicated against the right-hand axis. The orange curve shows model projections of warming if greenhouse gas and aerosol concentrations were held constant from the year 2000 – that is, the committed warming. {Figures 1.1 and 10.4}

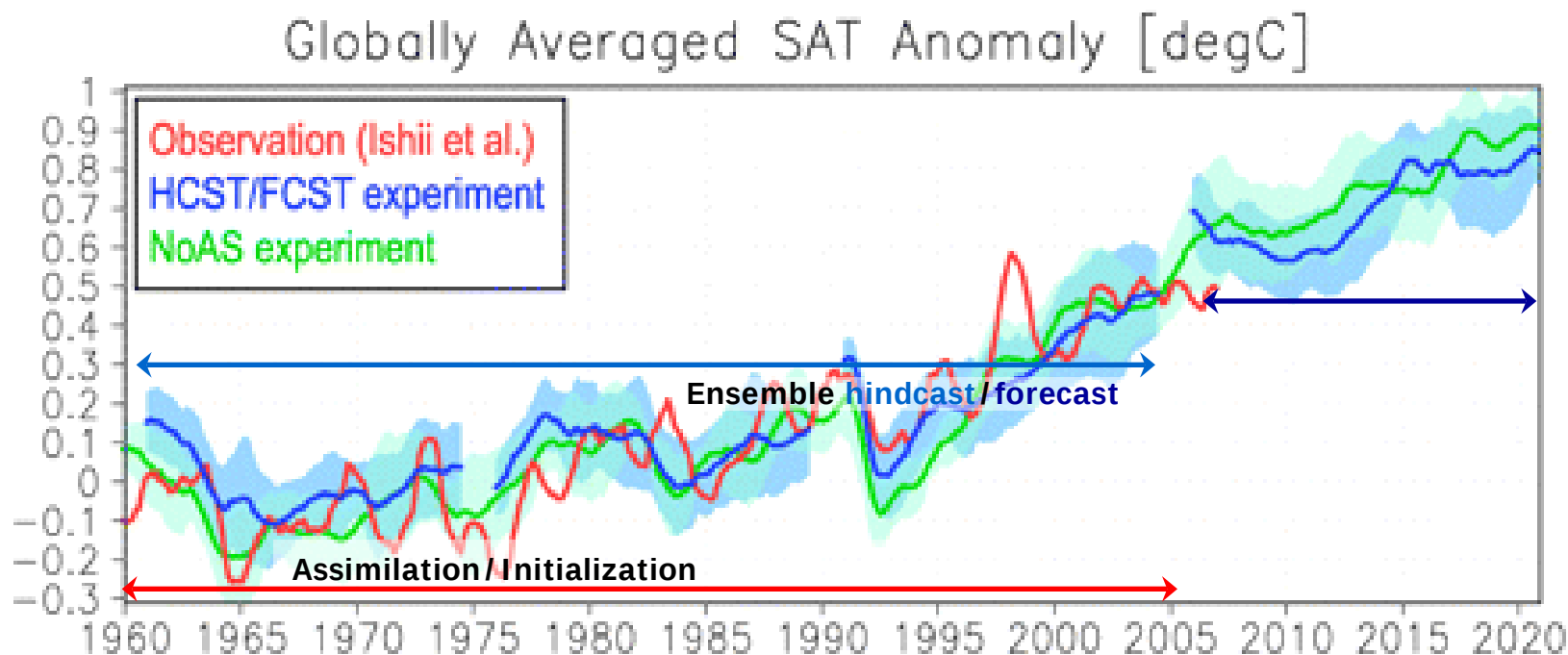


Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Figure TS.26, Cambridge University Press.

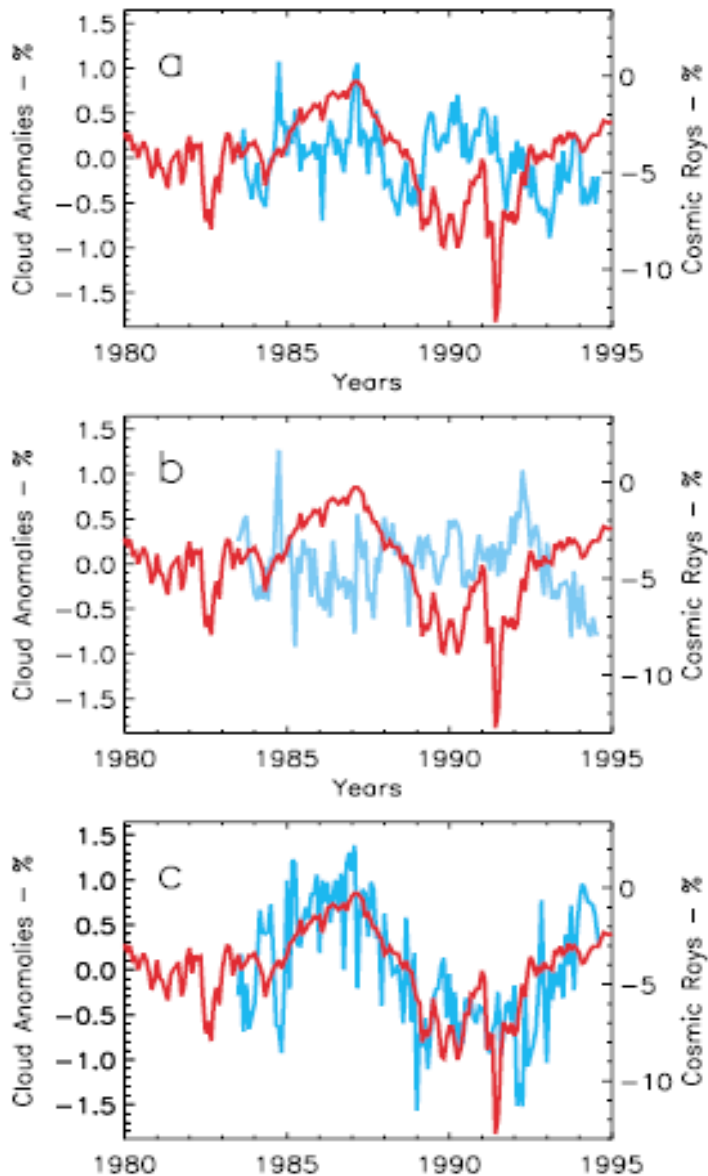


©IPCC 2007: WG1-AR4

最近の寒冷化？ 自然変動＋人為的影響



† Mochizuki et al. (2010) Pacific decadal oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(5) : 1833-1837, Fig. 1.
Copyright (2009) National Academy of Sciences, U.S.A.



著作権の都合により、
ここに挿入されていた画像を
削除しました。

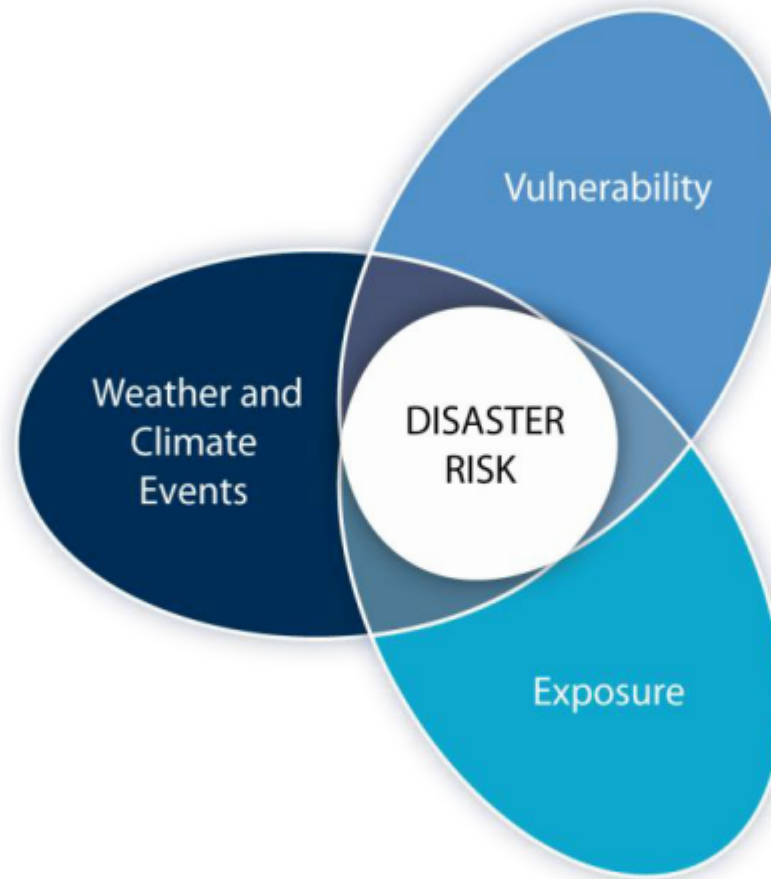
2000年までのデータで
更新されたFIG)。

FIG) Global average of monthly cloud anomalies for (a) high (<440 hPa), (b) middle (440-680 hPa), and (c) low (>680 hPa) cloud cover (blue).

Reprinted figure with permission from Marsh and Svensmark, Physical Review Letters, 85, 5004-5007, 2000. Copyright 2000 by the American Physical Society.
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.85.5004>

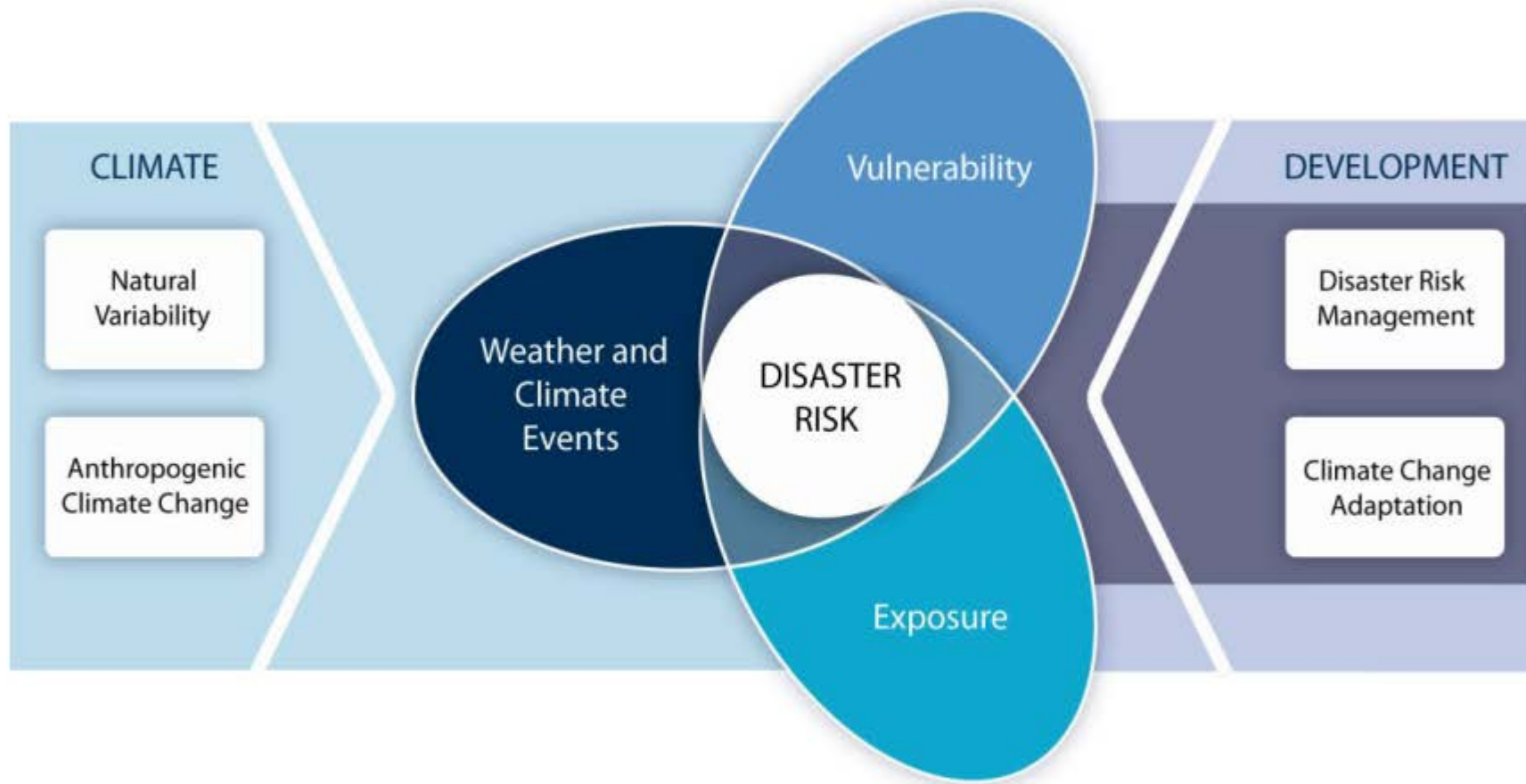
Readers may view, browse, and/or download material for temporary copying purposes only, provided these uses are for noncommercial personal purposes. Except as provided by law, this material may not be further reproduced, distributed, transmitted, modified, adapted, performed, displayed, published, or sold in whole or part, without prior written permission from the American Physical Society.

Socioeconomic development interacts with natural climate variations and human-caused climate change to influence disaster risk



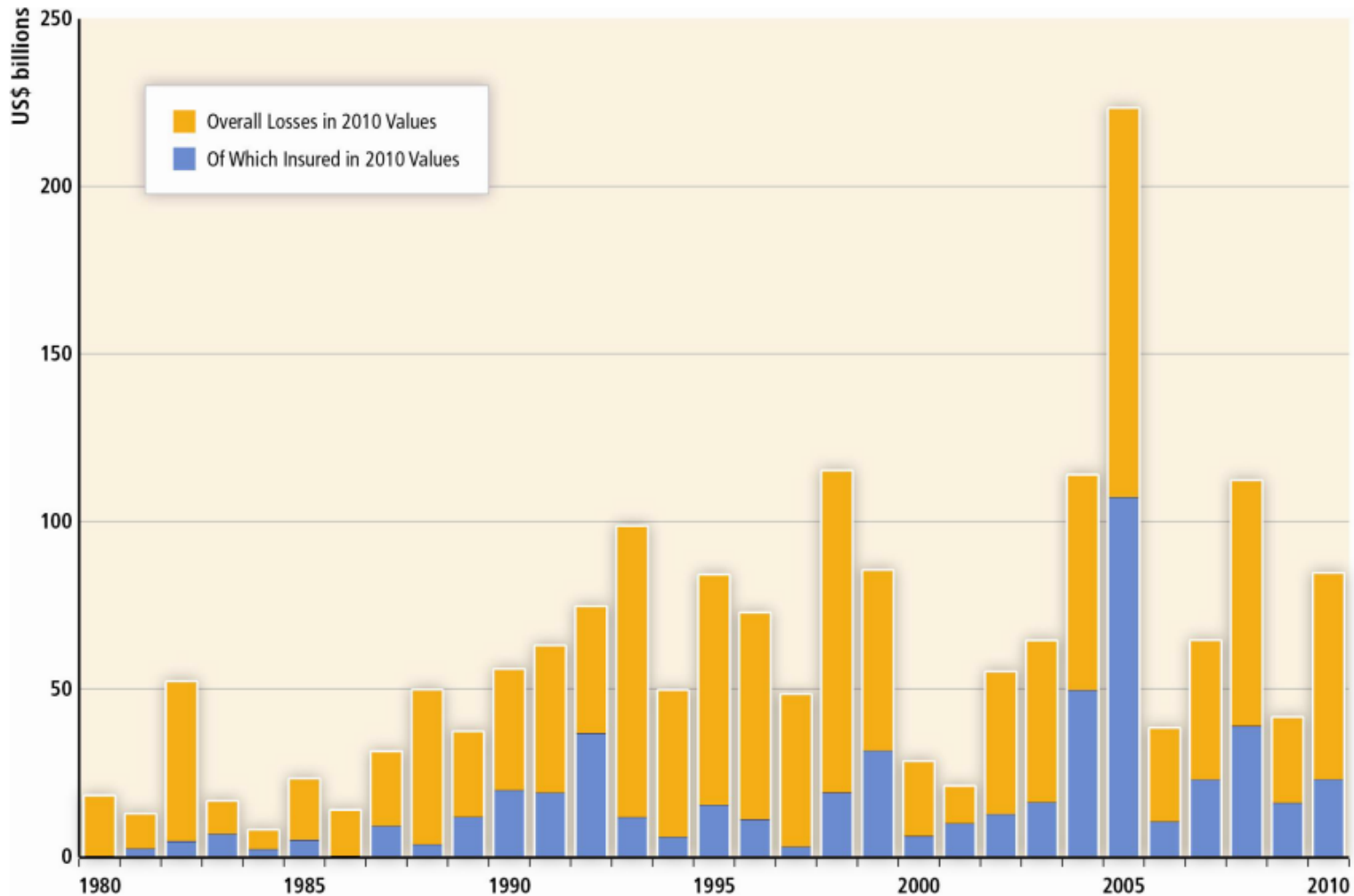
† IPCC 2012: Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p.4, Cambridge University Press.

Increasing vulnerability, exposure, or severity and frequency of climate events increases **disaster risk**



† IPCC 2012: Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p.6, Cambridge University Press.

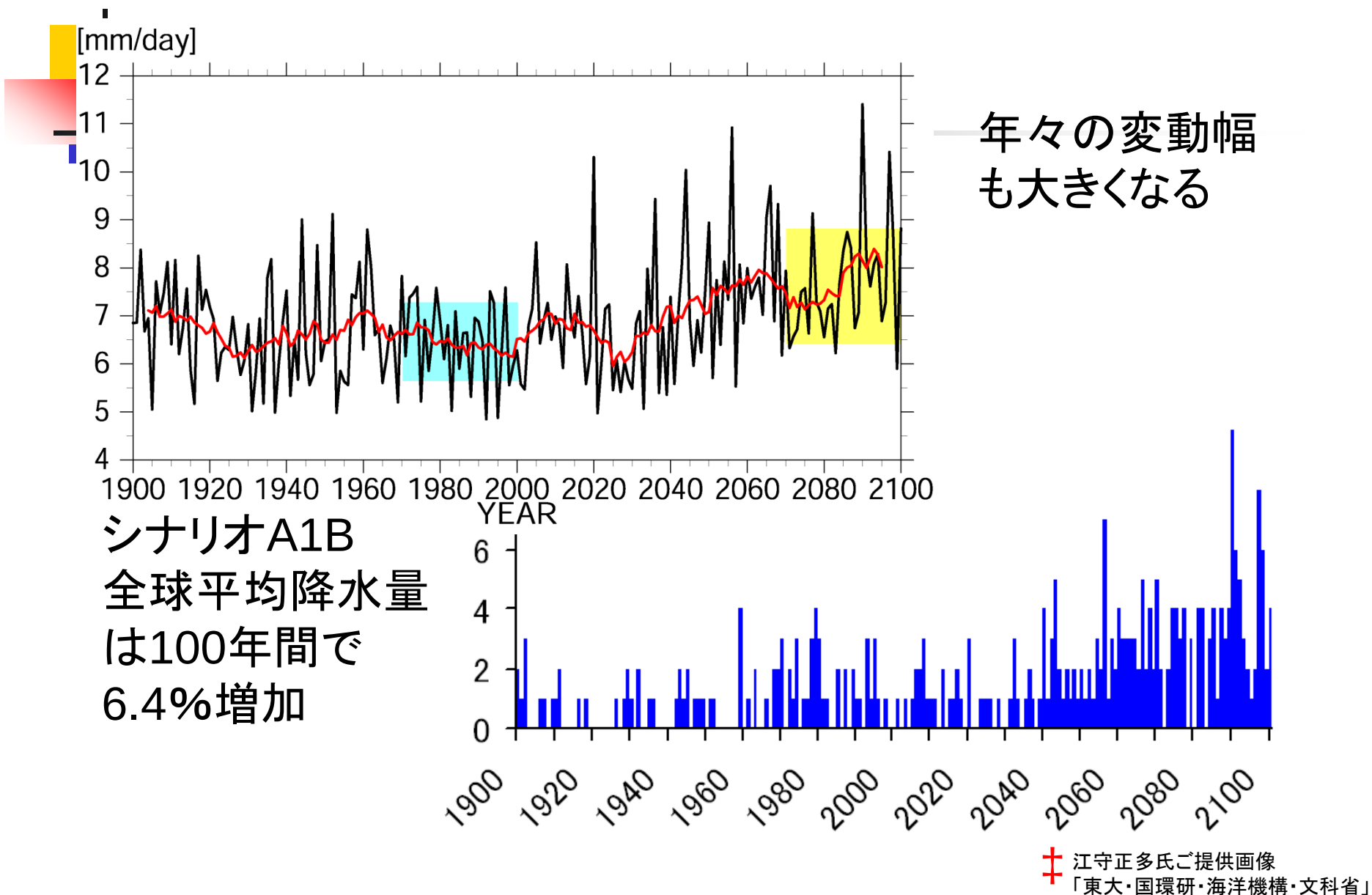
Economic losses from climate-related disasters have increased, with large spatial and interannual variations



Data from Munich Re, 2011

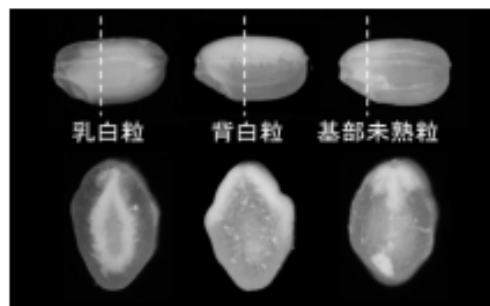
IPCC 2012: Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p.10, Cambridge University Press.

日本の夏季豪雨日数と夏季平均降水量の変化

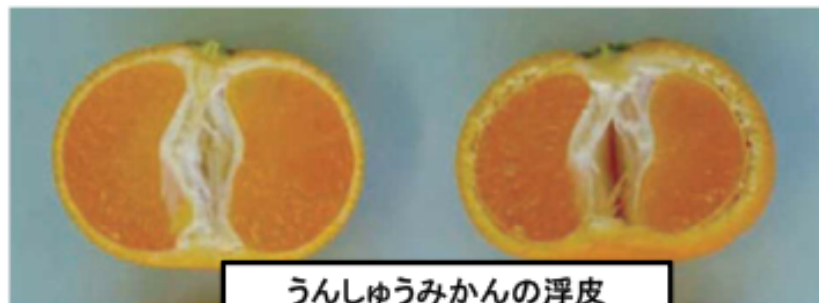


● 気候の変化と影響の予測

➤ コメ、果樹等への影響



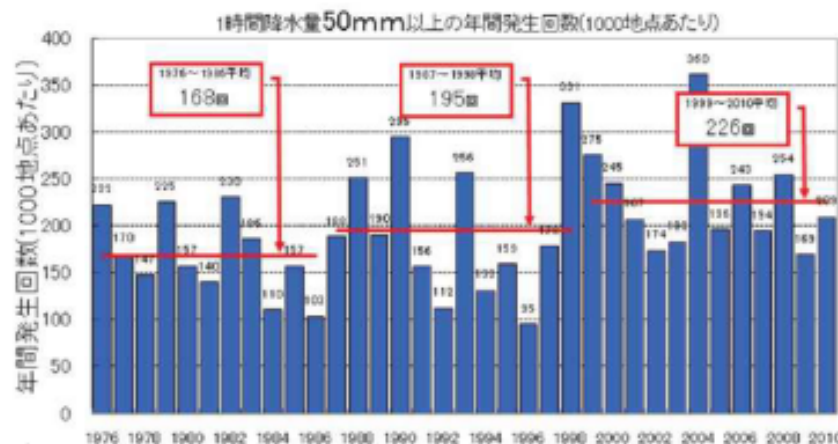
森田 (2005)



うんしゅうみかんの浮皮

広島県立総合技術研究所農業技術センター資

➤ 豪雨、台風等により被害が増大



気象庁



2004年10月20日 台風23号による被害(豊岡市)
兵庫県消防防災航空隊資料

† 出典) 環境省地球環境局「今後の地球温暖化による影響に対する適応の取組について」
中央環境審議会地球環境部会第104回資料5(平成24年4月13日)
<http://www.env.go.jp/council/06earth/y060-104.html>

● 気候の変化と影響の予測

➤ 南方系生物の生息域北上、高山植物への影響



ヒトスジシマカの北上
(デング熱を媒介)



資料提供: 国立環境研究所環境健康研究領域
総合影響評価研究室 小野雅司室長



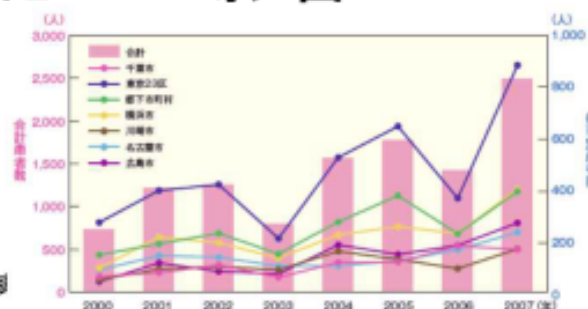
北海道大雪山・五色が原(左)1990年(右)2007年
北海道大学 工藤准教授 資料

➤ 熱ストレス、熱中症、感染症のリスク増大

➤ 観光・文化への影響

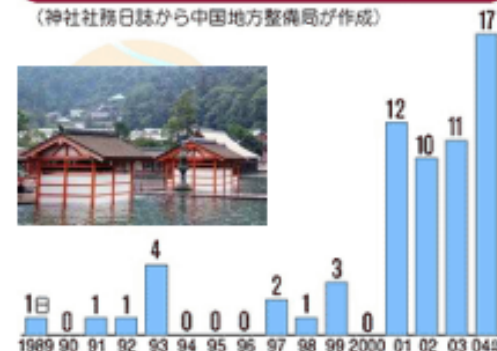
中国地方整備局資料

図 都市別熱中症
患者数の推移



資料提供: 国立環境研究所環境健康研究領域
総合影響評価研究室 小野雅司室長

厳島神社回廊の冠水日数の推移
(神社社務日誌から中国地方整備局が作成)



7

† 出典) 環境省地球環境局「今後の地球温暖化による影響に対する適応の取組について」
中央環境審議会地球環境部会第104回資料5(平成24年4月13日)
<http://www.env.go.jp/council/06earth/y060-104.html>

地球温暖化による農業への影響

○主な作物・影響

水稻(白未熟粒の発生)、りんご(着色不良・遅延、日焼け果)、かんきつ類(浮皮、着色不良・遅延)、トマト(着果不良)など幅広い品目で影響が報告されている。また、平成22年夏の気候は記録的猛暑となり、全国で被害が発生。

作物	主な現象	発生の主な要因 (障害発生時期)	主な発地域
水稻	白未熟粒の発生	出穂期～登熟期の高温 (7～9月)	全ブロック (北海道を除く)
りんご	着色不良・着色遅延	果実着色期の高温 (8～10月)	東北・関東・北陸、 九州・沖縄
	日焼け果	果実肥大期～収穫期の高温 (7～10月)	東北・関東・北陸
かんきつ類	浮皮	開花～収穫期の高温多雨(6 ～12月)	関東・北陸以西の ブロック
	着色不良・着色遅延	果実着色期の高温 (6～12月)	関東・北陸以西の ブロック
トマト	着果不良	開花期～果実肥大期の高温 (5～10月)	全ブロック (北海道を除く)

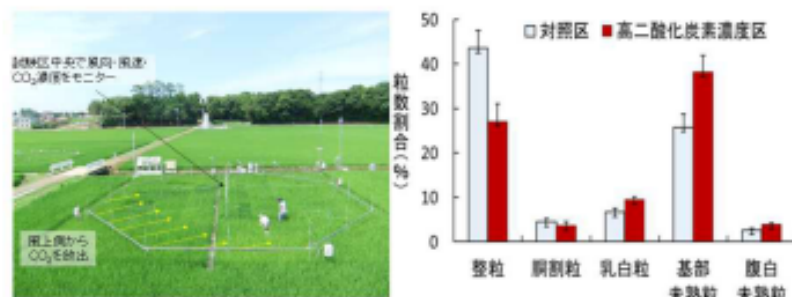
注：主な発地域については、全国を5つのブロック（北海道・東北ブロック、関東・北陸ブロック、東海・近畿ブロック、中国・四国ブロック、九州・沖縄ブロック）に分けて示している。

※地球温暖化影響調査レポート抜粋

地球温暖化が与える影響の将来予測と評価

●共通のシナリオ・時間軸を用いた、より精度の高い将来予測と評価

50年後に想定される高CO2濃度がコメに及ぼす影響



FACE(開放系大気二酸化炭素増加実験施設)において、記録的猛暑となった2010年に調査。高二酸化炭素濃度(現在+200ppm)条件では、主として基部未熟が増加し、整粒割合が著しく低下した。

水稻



水稻の「白未熟粒」

・水稻の登熟期(出穂・開花から収穫までの期間)の日平均気温が27℃を上回ると玄米の全部又は一部が乳白化したり、粒が細くなる「白未熟粒」が多発。
・特に、登熟期の平均気温が上昇傾向にある九州地方等で深刻化。

果樹



りんごの「日焼け果」
高温条件下、強い日差しによって果実表面の組織が障害を受けて発生



みかんの「浮皮症」
・成熟後の高温・多雨により、果皮と果肉が分離する。(品質・貯蔵性の低下)

野菜



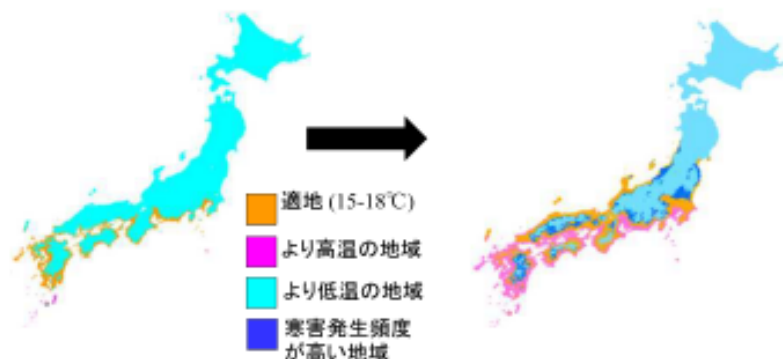
着色不良
トマトの生育(着花・着果)不良
・高温による花粉機能障害、赤色素(リコピン)の生成抑制



ウンシュウミカンの栽培適地の移動予測

現在

2060年代



●水災害対策

平成20年6月「水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について(答申)」

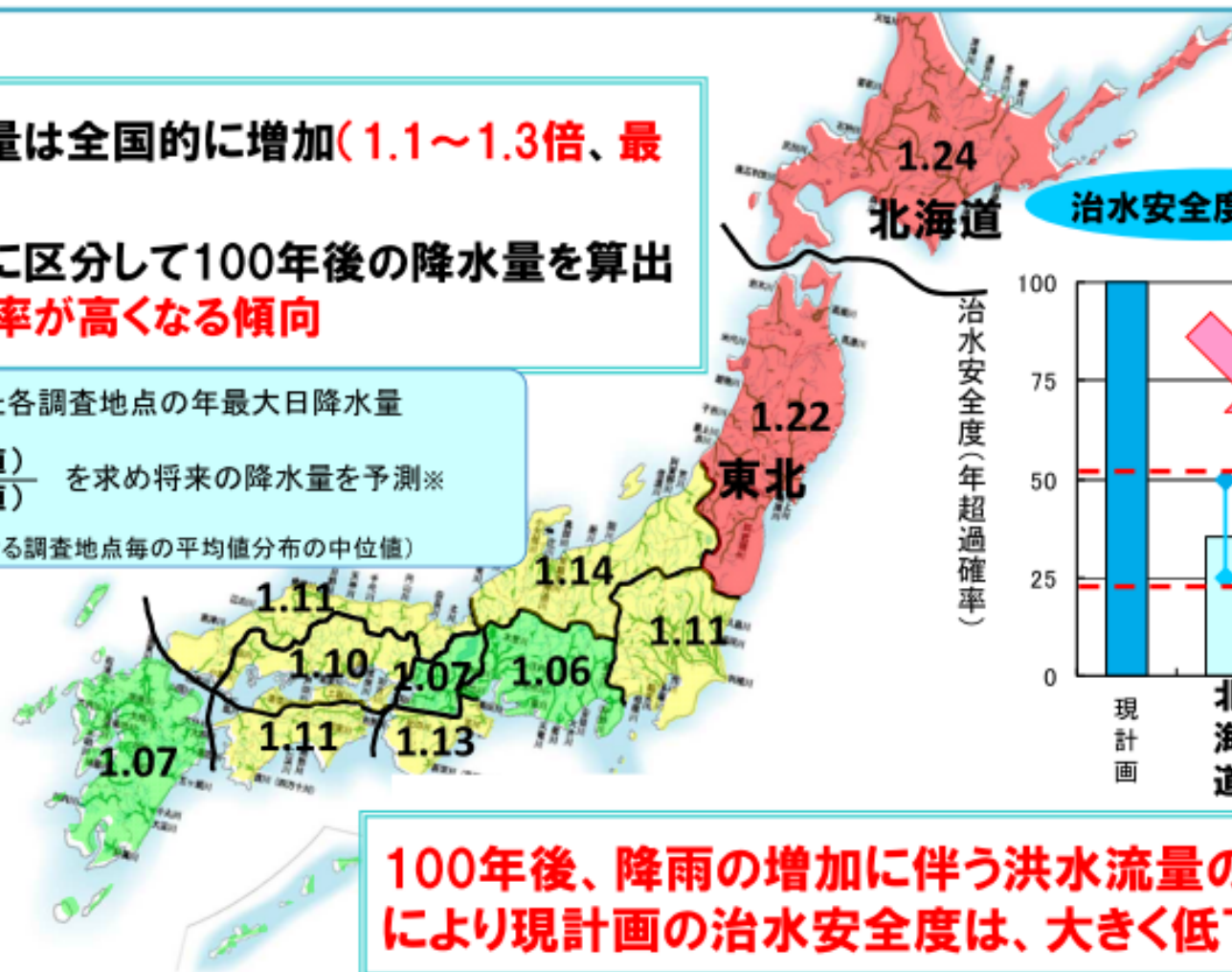
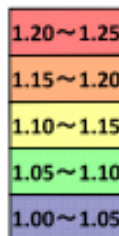
- 100年後の降水量は全国的に増加(1.1～1.3倍、最大で1.5倍)
- 全国を11の地域に区分して100年後の降水量を算出すると北日本で倍率が高くなる傾向

GCM20 (A1Bシナリオ)で求めた各調査地点の年最大日降水量

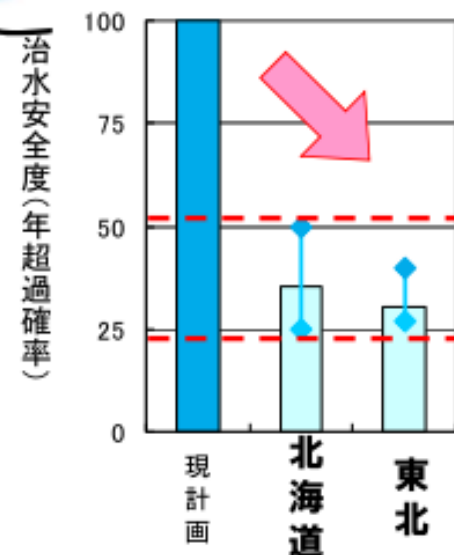
から $\frac{(2080-2099\text{年の平均値})}{(1979-1998\text{年の平均値})}$ を求め将来の降水量を予測※

(※ 各地域における調査地点毎の平均値分布の中位値)

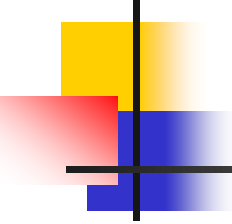
凡例



治水安全度で評価



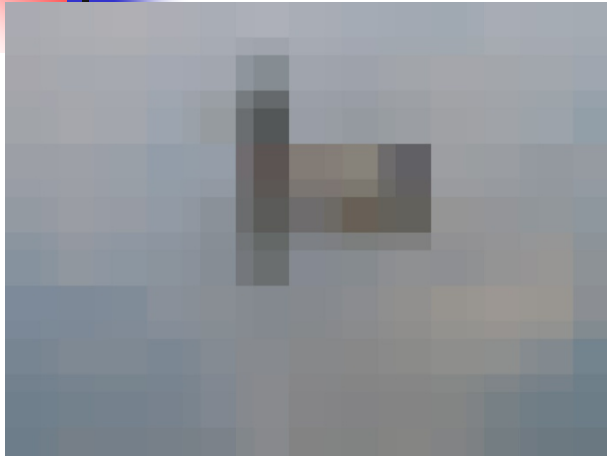
100年後、降雨の増加に伴う洪水流量の増加により現計画の治水安全度は、大きく低下



リスク情報にするには、現在の 気候モデルの精度は不十分

- 2070-2100年の30年平均で全球平均の気温が、3°C上昇
- 自分のところは？
- リスクは、局所的、地域的
- Downscalingが必要

What is downscaling?



Bridging between the climate model results
and the impact studies



高薮出氏ご提供画像

(Takayabu Izuru, "Down-scaling system applied for representing local climate in Japan," 2010, p.3
<http://g-rsm.wikispaces.com/file/view/5.5Takayabu.pdf>)

Time-Slice Global Warming Experiment

Global Warming
Experiment with
CGCM

Time-Slice
Experiment with
AGCM

Nesting Time-Slice
Experiment with RCM

T42 AGCM

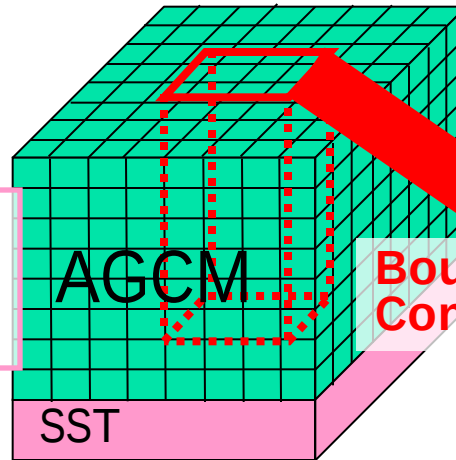
20km-mesh AGCM

5km-mesh cloud
resolving RCM

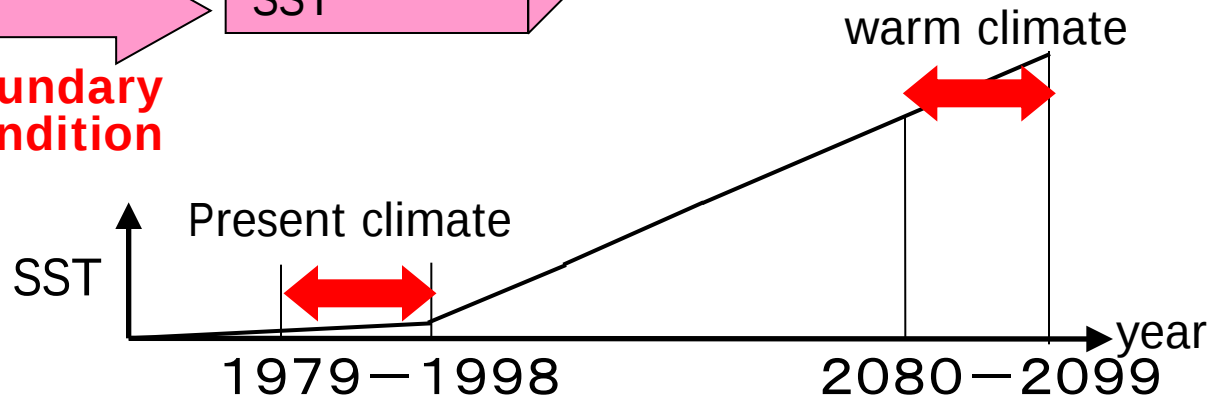
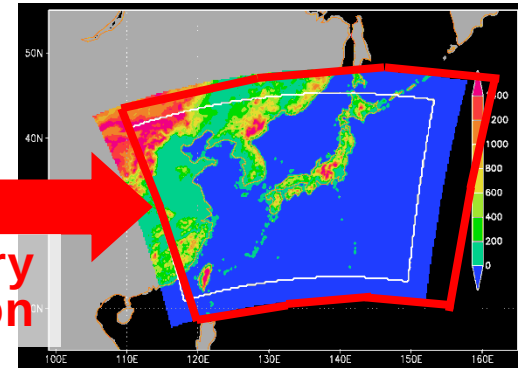


Predicted
SST

Boundary
Condition



Boundary
Condition

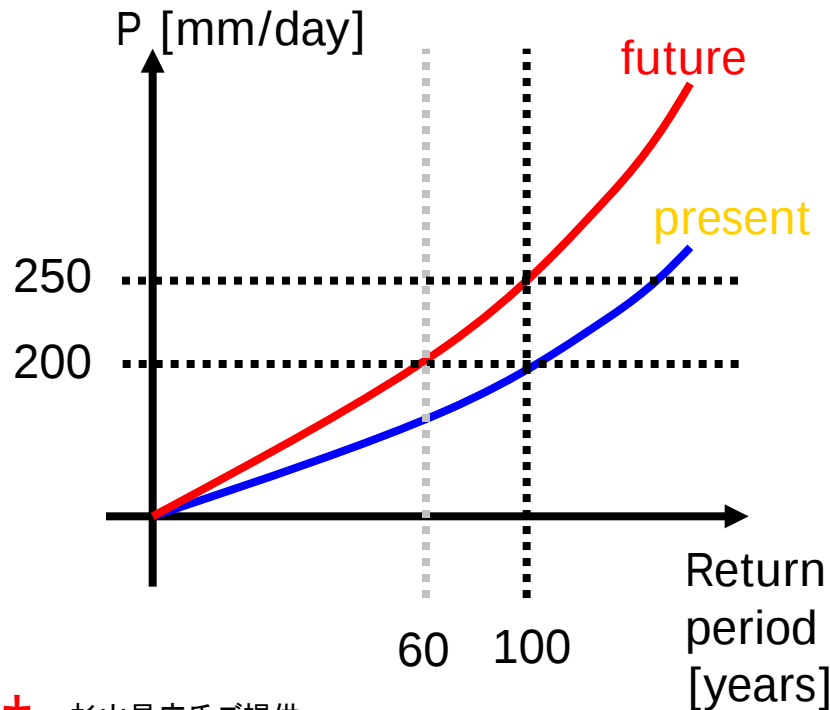


気候が変動するとは？

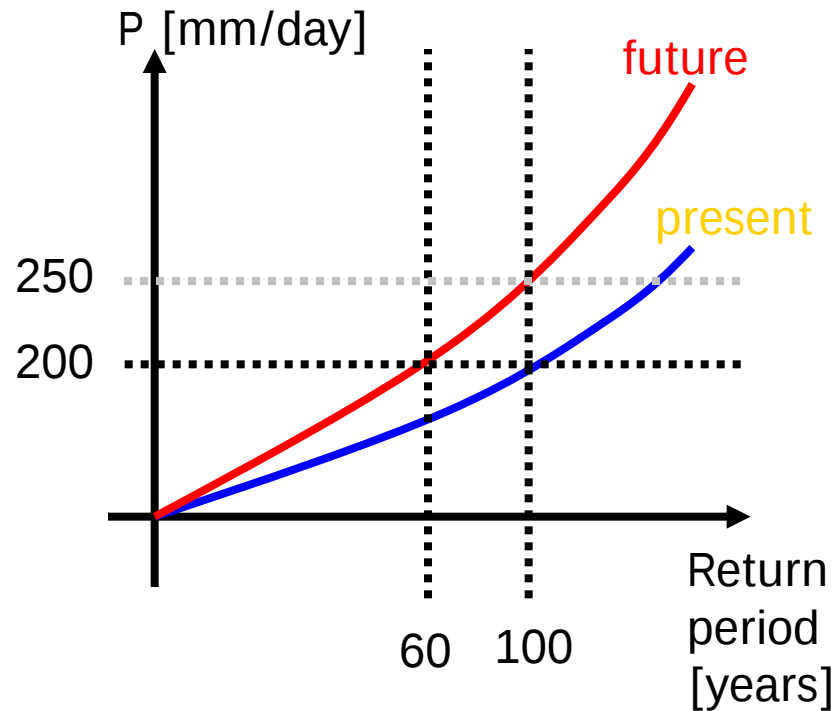
同じ頻度なら強い雨が降る

同じ雨なら頻度が増す

If you fix the return period
(or frequency), you will have
an increased precipitation



If you fix the precipitation level,
the return period will decrease



$$\frac{\frac{\Delta P}{P}}{P\%} = \Delta T_{\text{global}} \times \left(\frac{\Delta T_{\text{Philippine}}}{\Delta T_{\text{global}}} \right) \times \left(\frac{1}{\Delta T_{\text{Philippine}}} \frac{\Delta P}{P} \right)$$

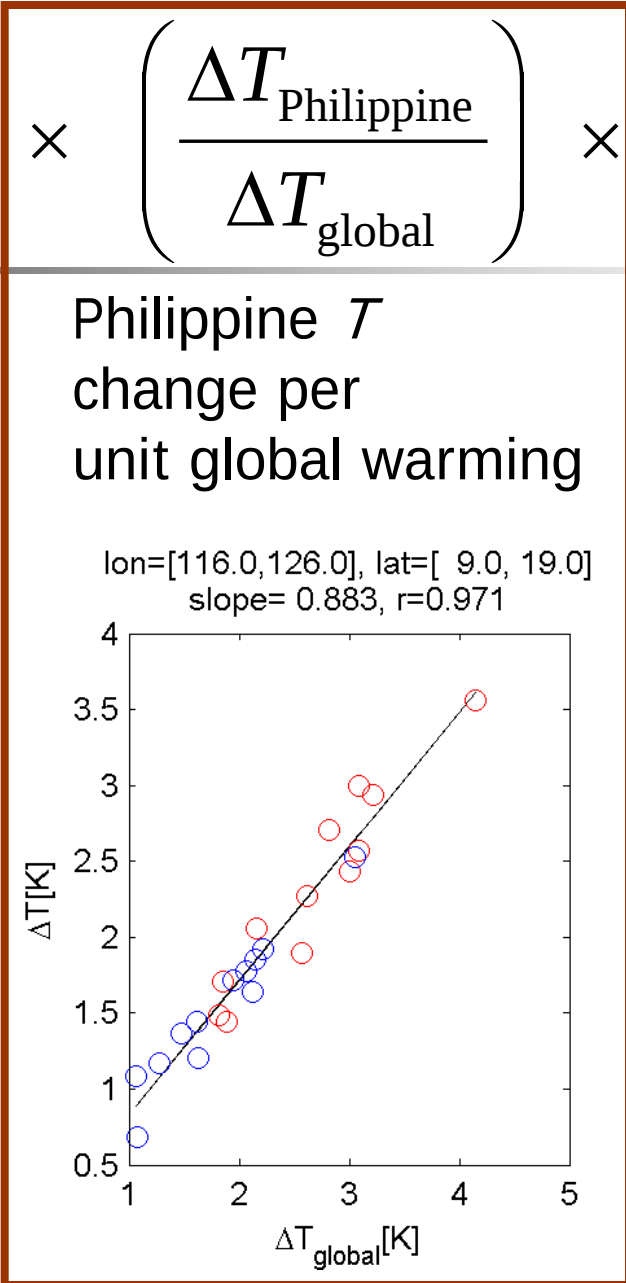
$\frac{\Delta P}{P}$
 $P\%$
 change

ΔT_{global}
 Global T
 change

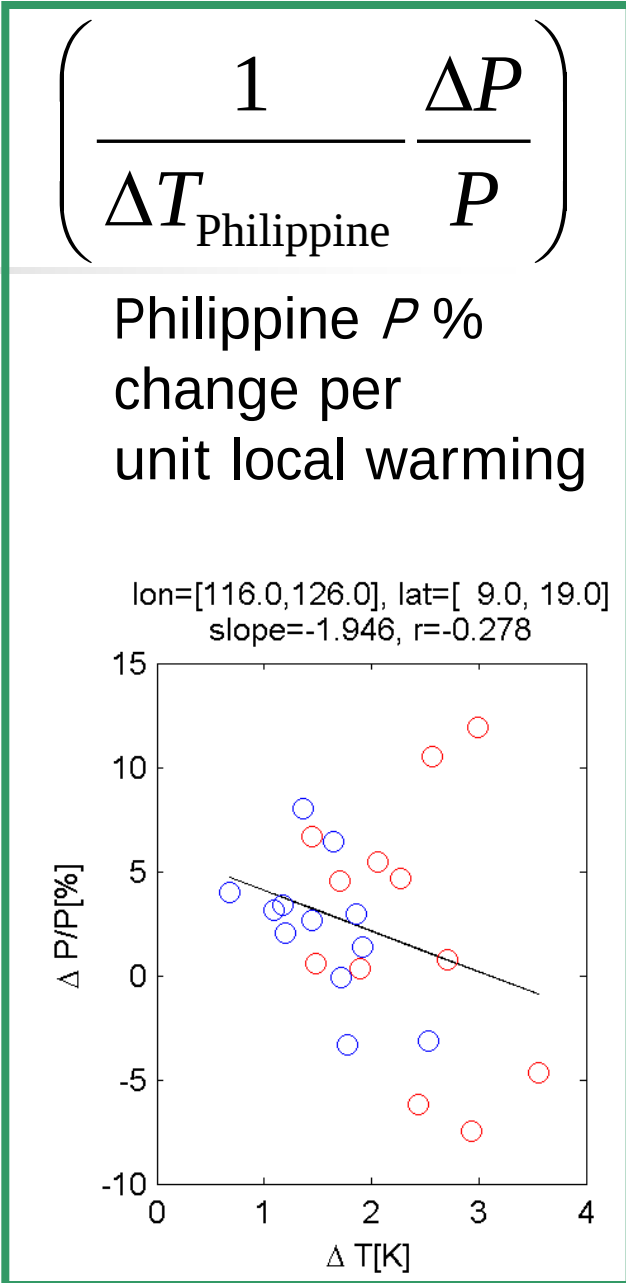
Mean precipitation change

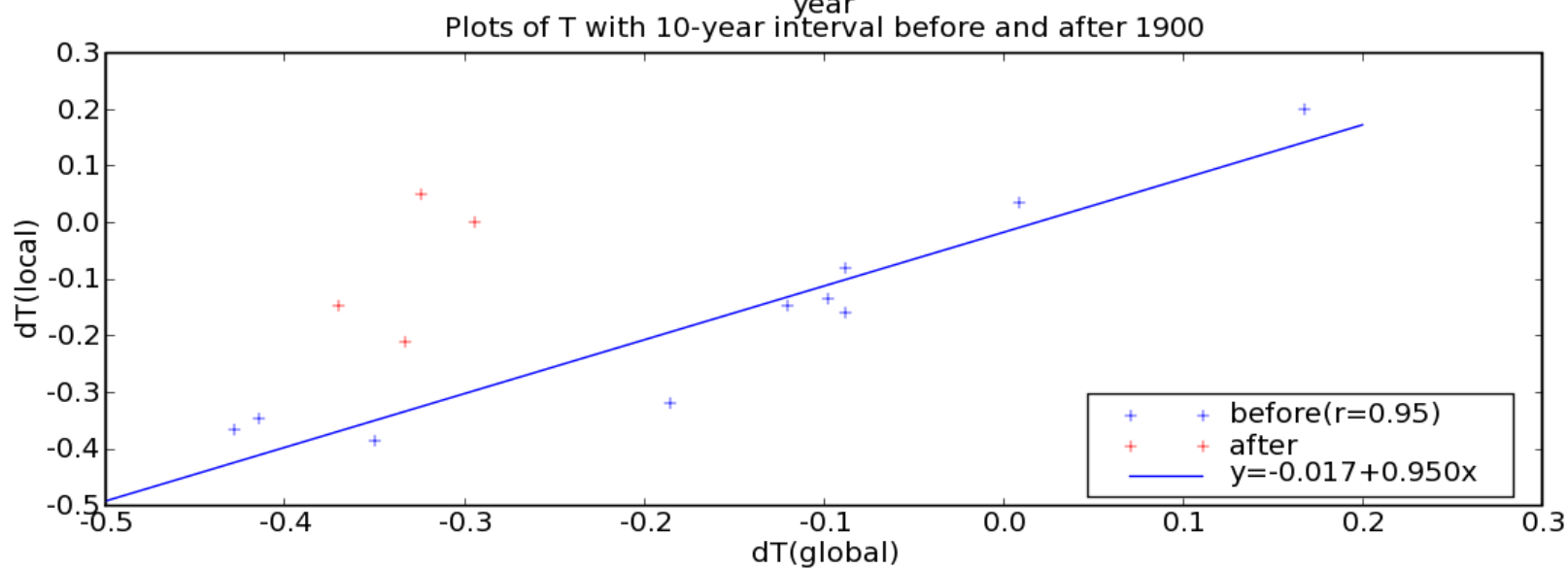
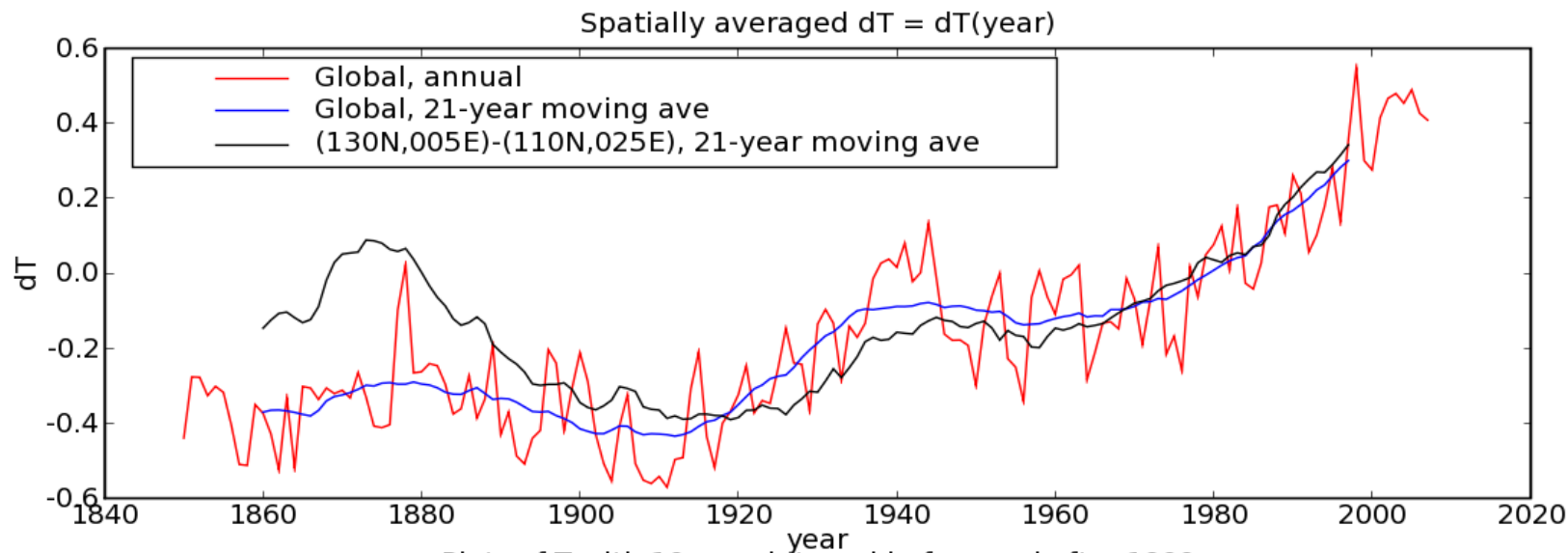
P: Precipitation
 T: Temperature
 Δ : Late 21C (A1B/B1)
 - Late 20C (20C3M)

Robust



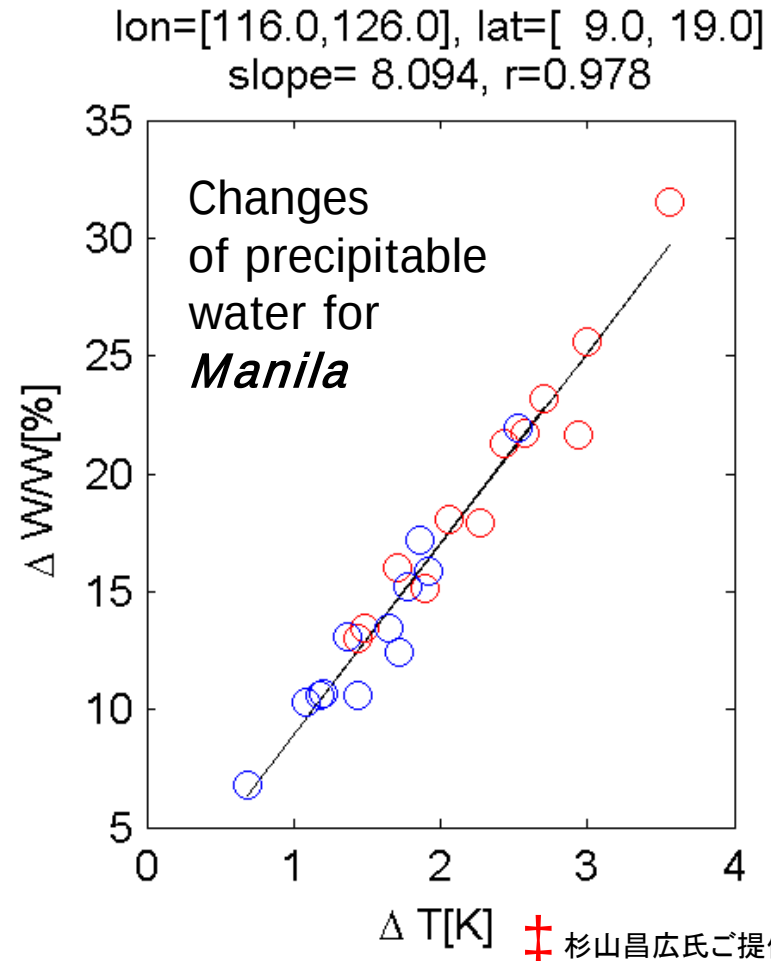
Uncertain





極端現象の推定は、難しい

- 台風や集中豪雨の雨量の最大値を推定するのは難しい
- 可降水量の増加から推定



Overall procedure

IPCC A1FI
Scenario
(Specified)

$$\Delta T_{\text{global}}^{\text{mean}} = 2.0 \text{ K}$$

Local
temperature
change

$$\Delta T_{\text{local}}^{\text{mean}} = \Delta T_{\text{global}}^{\text{mean}} \times \left(\frac{\Delta T_{\text{local}}^{\text{mean}}}{\Delta T_{\text{global}}^{\text{mean}}} \right)^{\text{model}}$$

$$= 2.0 \times \boxed{0.88} = 1.76 \text{ K}$$

IPCC models

% change
of
precipitation

$$\frac{\Delta P_{\text{local}}^{\text{extreme}}}{P_{\text{local}}^{\text{present, extreme}}} = \Delta T_{\text{local}}^{\text{mean}} \times \left(\frac{1}{\Delta T_{\text{local}}^{\text{mean}}} \frac{\Delta P_{\text{local}}^{\text{extreme}}}{P_{\text{local}}^{\text{present, extreme}}} \right)^{\text{model}}$$

$$= 1.76 \times \boxed{0.08} \approx 0.14$$

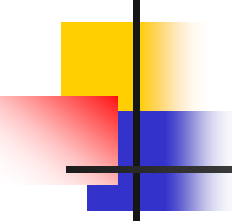
IPCC models

Future
precipitation

$$P_{\text{local}}^{\text{future, extreme}} = \left\{ 1 + \left(\frac{\Delta P_{\text{local}}^{\text{extreme}}}{P_{\text{local}}^{\text{present, extreme}}} \right) \right\} \times P_{\text{local}}^{\text{present, extreme}}$$

$$= (1 + 0.14) \times \boxed{183.5} = 209 \text{ mm/d}$$

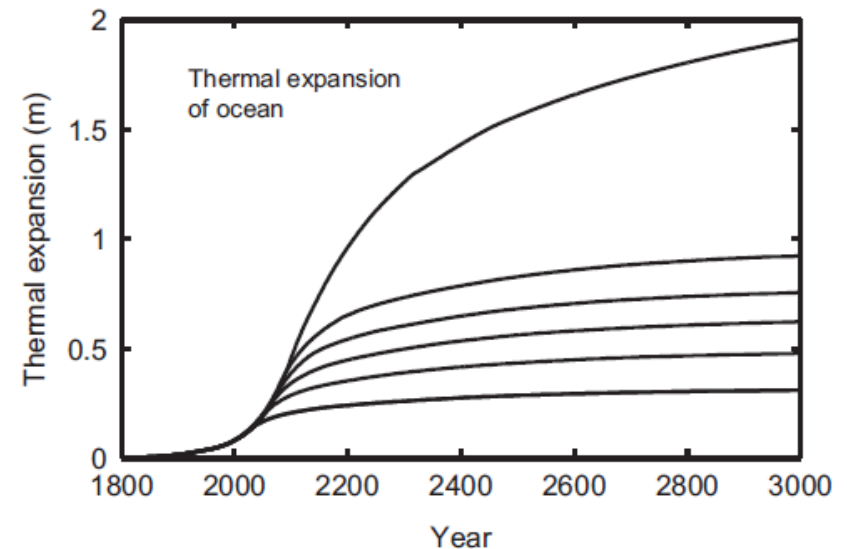
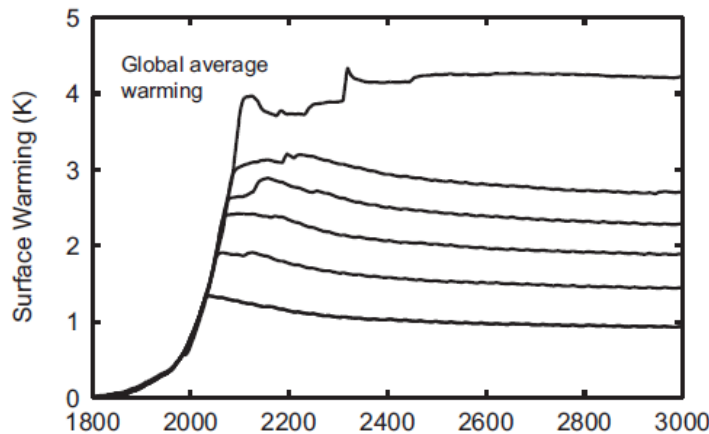
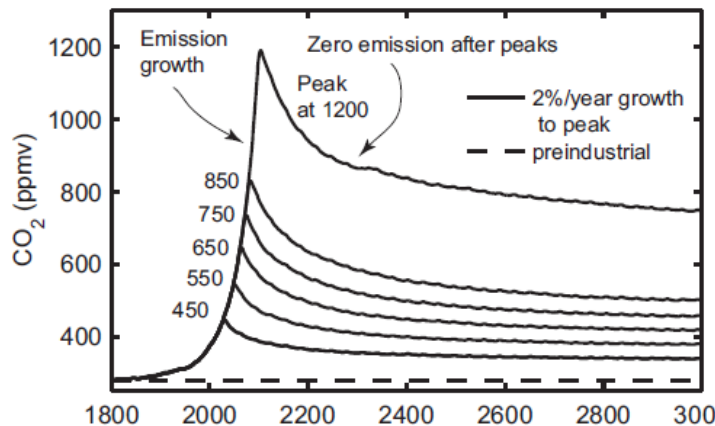
observation



温暖化して何が悪い？

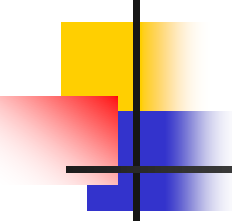
- 自然災害などの影響が出る
- 生態系が乱れる
- もともと気候は変動しているものだから仕方が無い
- 現在の社会は、気候が変動しないことを前提に、投資がされている
- 経済的な損害
- コスト・ロス比較か？（人命の価格？）

危険な気候変動がそこまできたら緩和策では温暖化を止められない



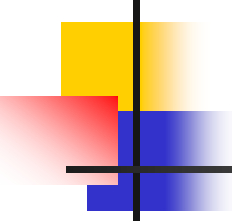
Solomon et al. (2009, PNAS)
Bern 2.5 CC EMIC の結果

† Solomon et al. (2009) Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(6): 1704-1709, p.1705, Fig.1. Copyright (2009) National Academy of Sciences, U.S.A.



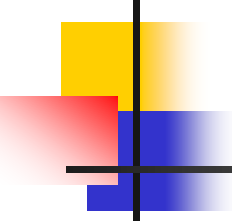
Plan-Bが必要？

- 最悪のケースに備えるべきか？
- 全ての場合に備えるのは不可能
- Cost and benefit を考えなければならない
- 大きな議論が起きている！



結局、100%確実なことはない

- 不十分な知見の下に意思決定
 - Win-Win あるいは Co-benefit
 - 100%全員を満足させることが可能か？
 - リスクの評価が主観的
- 意思決定に、気分が重要な役割
 - めんどく、起きるはずが無い(考えないことは起きない)
 - 誰かが何とかしてくれるはず



まとめ

- 覚悟を決めて、合理的な判断を！
- 科学で予測されることは、かならず、起きる
- 太平洋戦争の教訓
- 失敗の教訓
 - 結果を見れば、反省する。結果を見ない前に、どれだけ考えられるか？
 - 学問をする意義がある。