

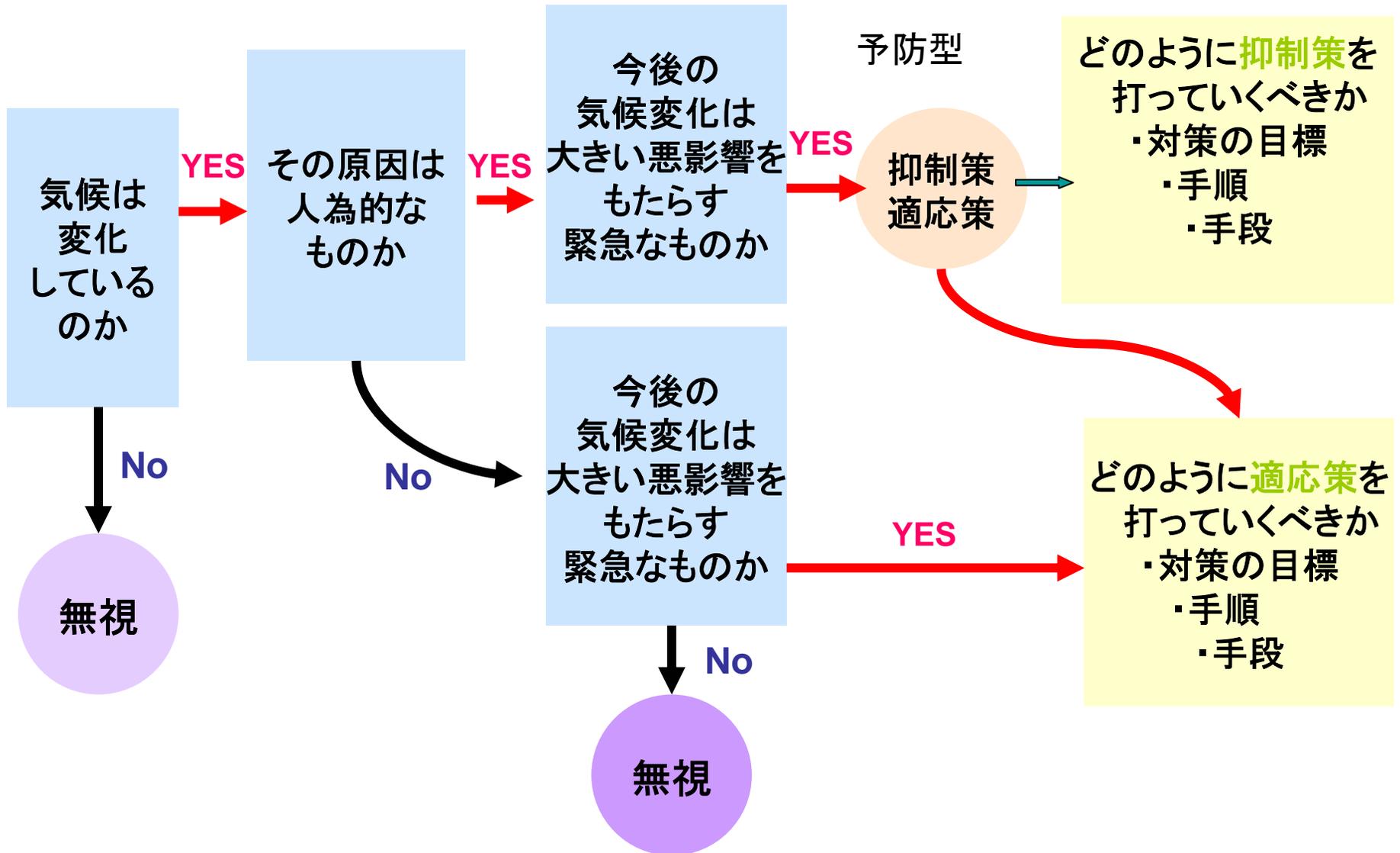
気候変動に関する科学的知見の 整理について

中央環境審議会地球環境部会
気候変動に関する国際戦略専門委員会(第1回会合)

平成16年4月8日

国立環境研究所 原沢英夫

気候政策検討に必要な科学的知見

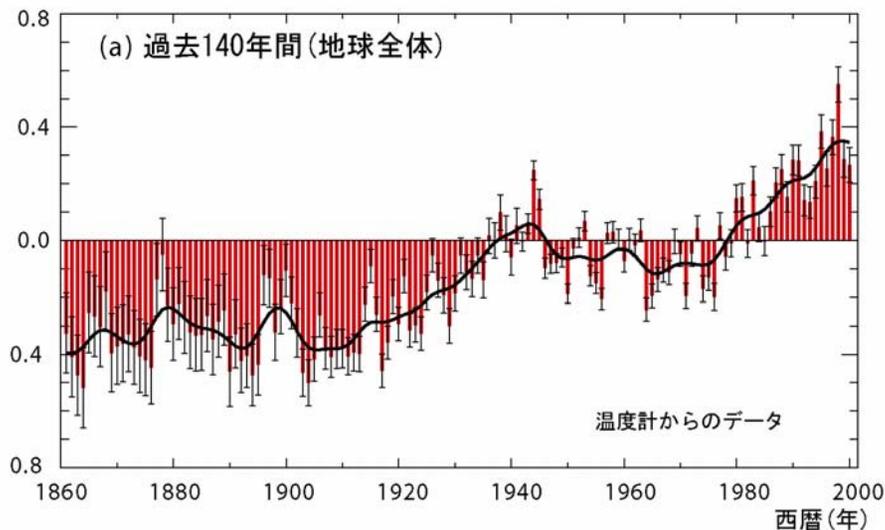


気候は変化しているか？

地球の気温上昇が観測されている

近年の気温変化

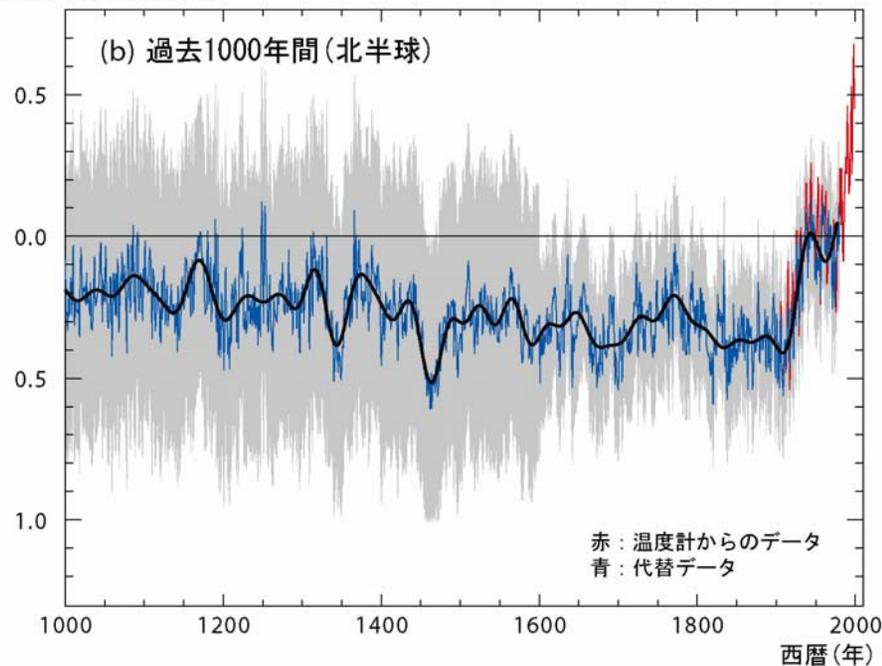
1961～1990年の平均からの気温の偏差(°C)



IPCC第3次評価報告書

過去1000年の気温変化

1961～1990年の平均からの気温の偏差(°C)

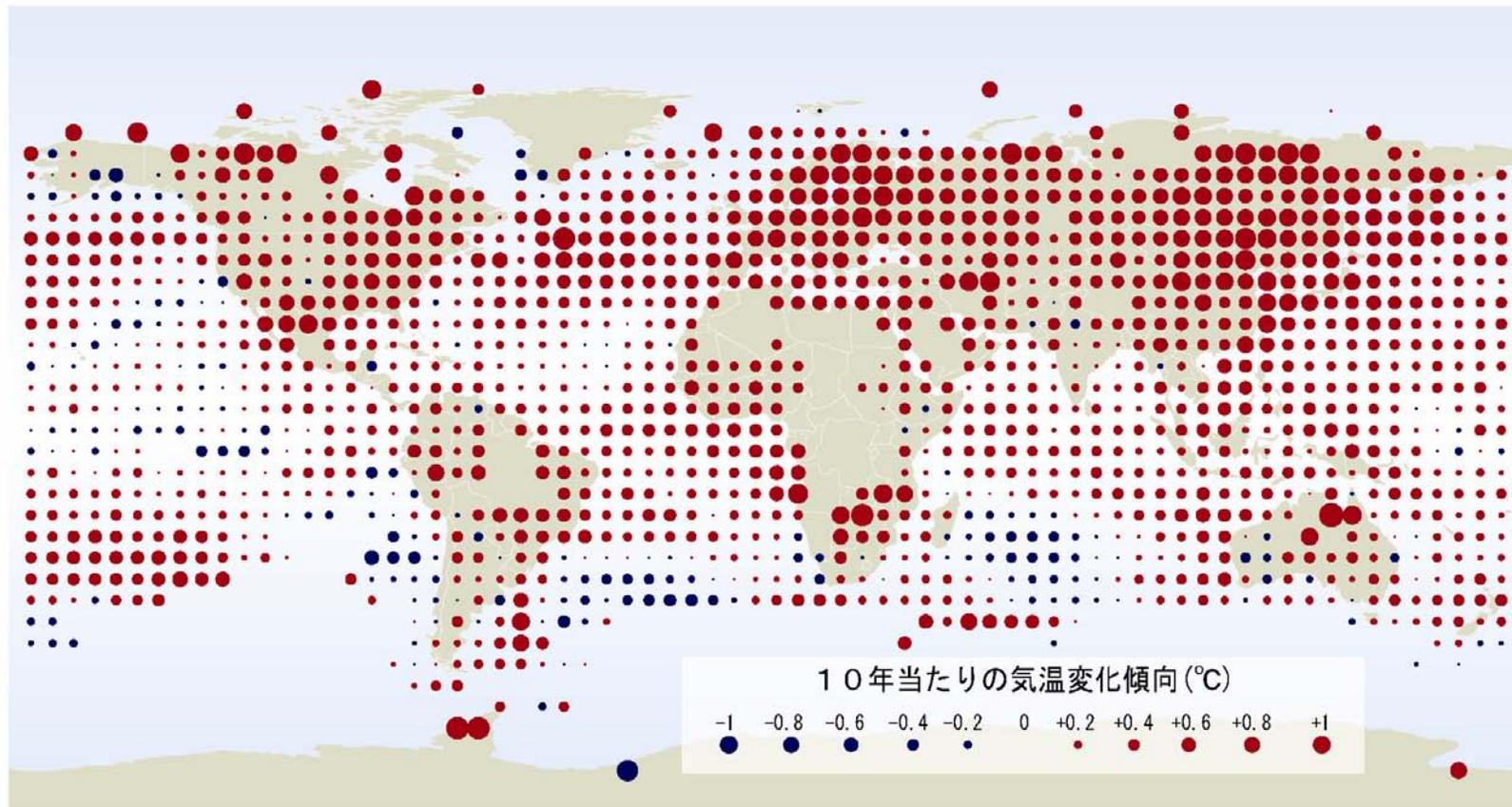


- 20世紀の100年間に、世界の平均気温が $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 上昇
- 1990年代の10年間は、過去1000年間で最も温暖な10年の可能性

気候は変化しているか？

世界の各地域で気温上昇が観測されている

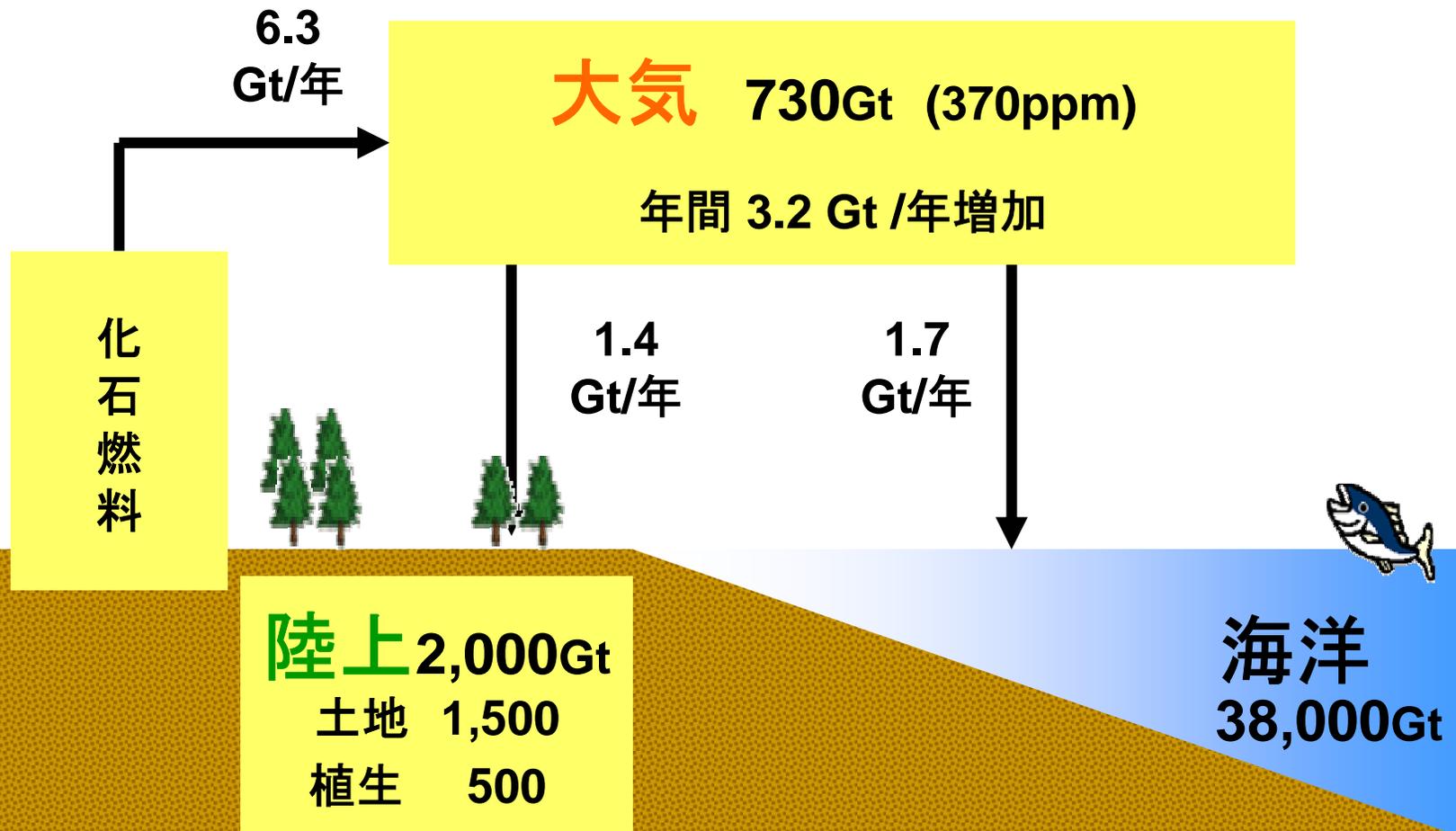
年平均気温の変化傾向：1976年～2000年



IPCC第3次評価報告書

- 陸上の方が海上より大きく気温が上昇
- 北半球の中高緯度で最も気温が上昇

その原因は人為的なものか？
大気中にCO₂が蓄積しつつある



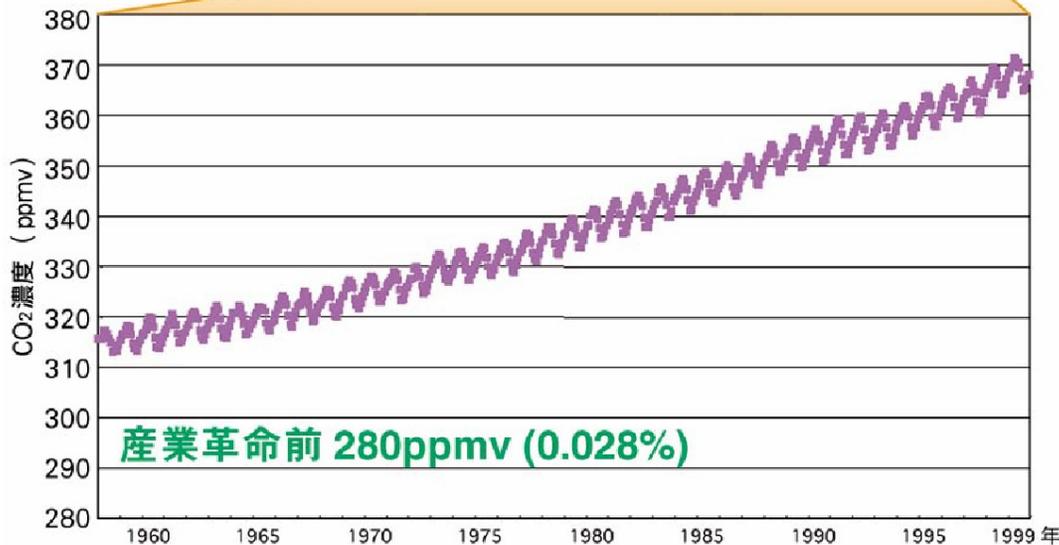
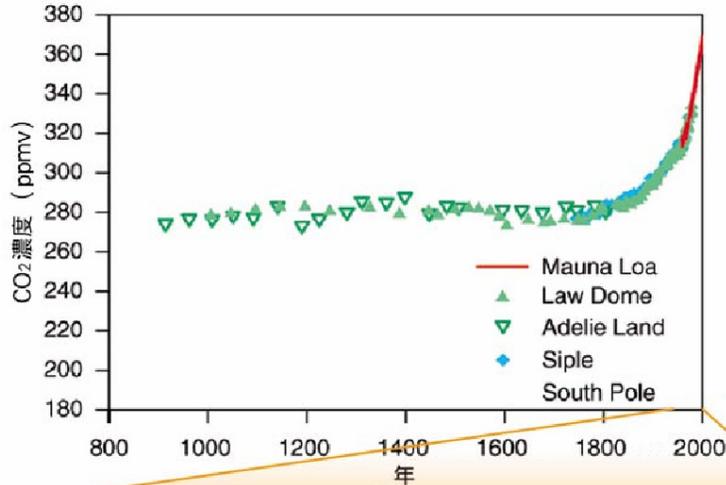
地球の炭素収支の推定

Gt=10億トン

気候変化の原因は人為的なものか？

大気中の二酸化炭素は増加している

大気中の二酸化炭素濃度の変化



大気中二酸化炭素濃度は産業革命以降急激に増加

1750年：280 ppm



2000年：368 ppm

過去42万年間の最高値
(アイスコア測定：280ppm)

IPCC第3次評価報告書

依然として増加し続けている大気中のCO₂濃度

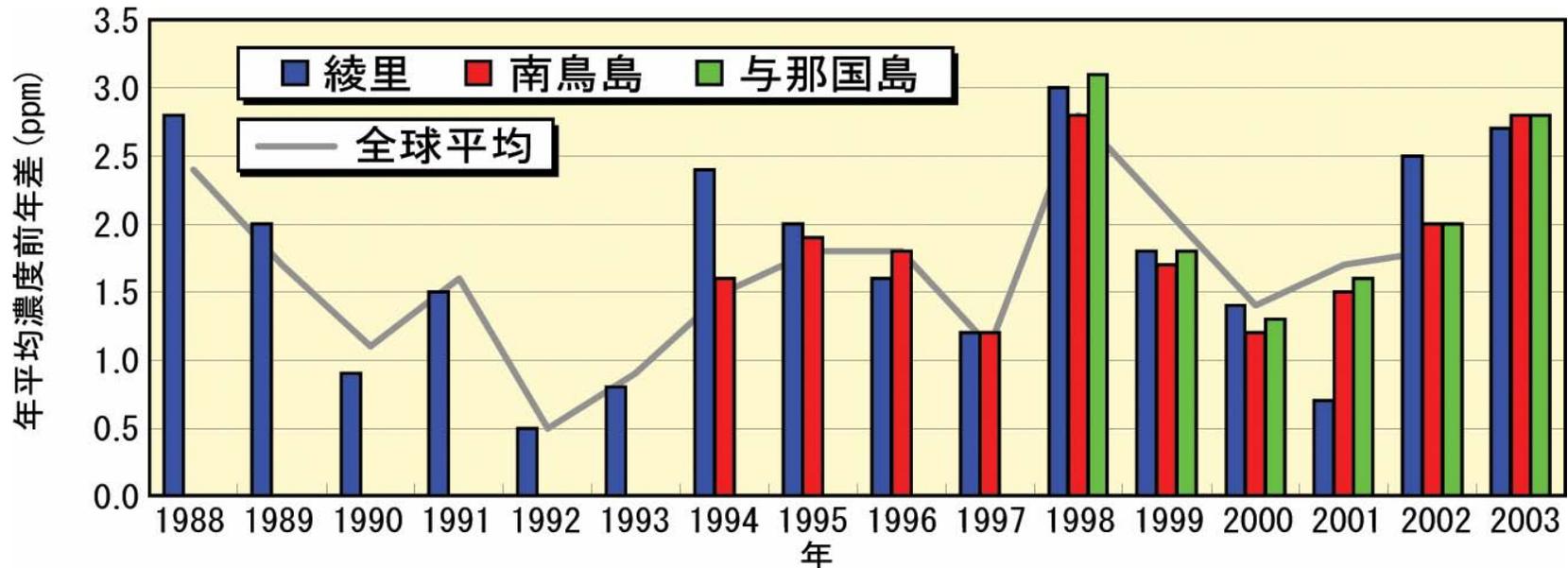


図 綾里、南鳥島、与那国島および全球平均における二酸化炭素濃度年平均値の前年からの増加量の経年変化

【2003年の大気中の二酸化炭素濃度】

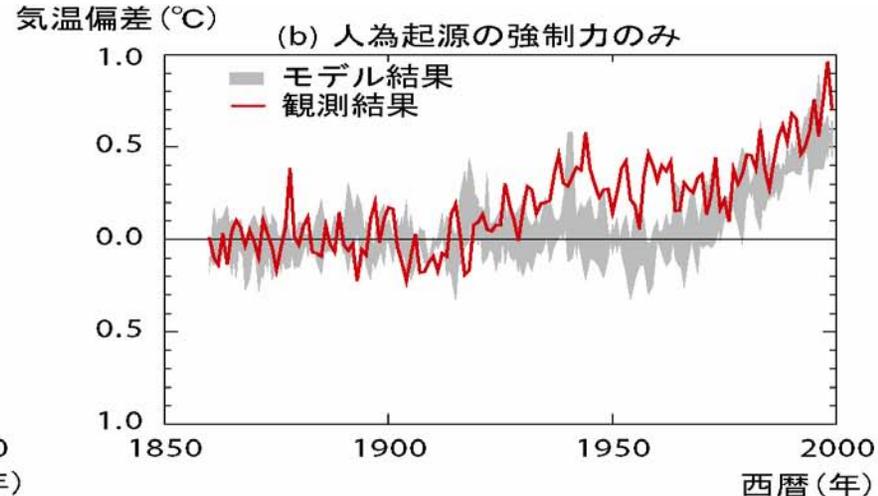
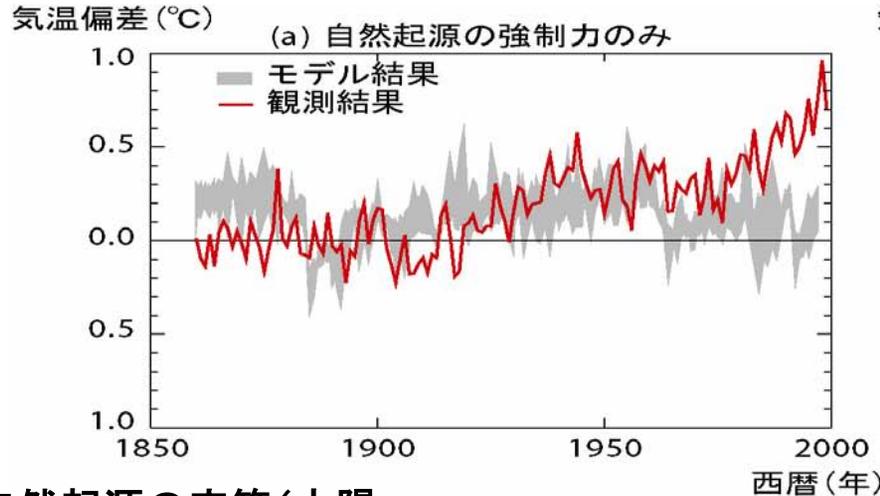
➤ 前年と比較して2.7～2.8ppm 増加しており、前年に引き続き年増加量が2.0ppm以上となった。

【推定される主な原因】

➤ 世界の気温が高いと、陸上生物圏の呼吸や土壌有機物の分解が活発になり、二酸化炭素の大気への放出が強まるため、世界中で濃度増加量が多くなると考えられる。

気候変化の原因は人為的なものか？

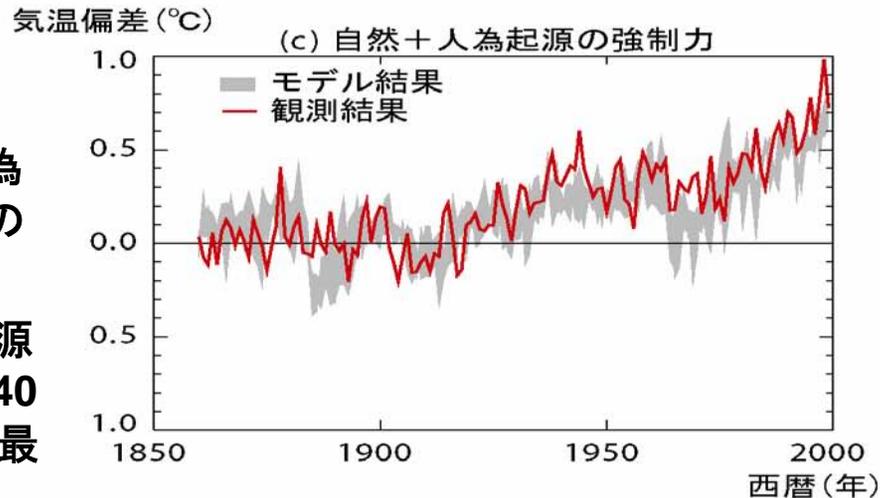
最近50年間の温暖化のほとんどは人間活動に起因



(a) 自然起源の応答(太陽放射や火山噴火)だけでは、20世紀後半の温暖化は説明できない

(b) 最近50年の温暖化は人為起源の温室効果ガスによるものと識別できる

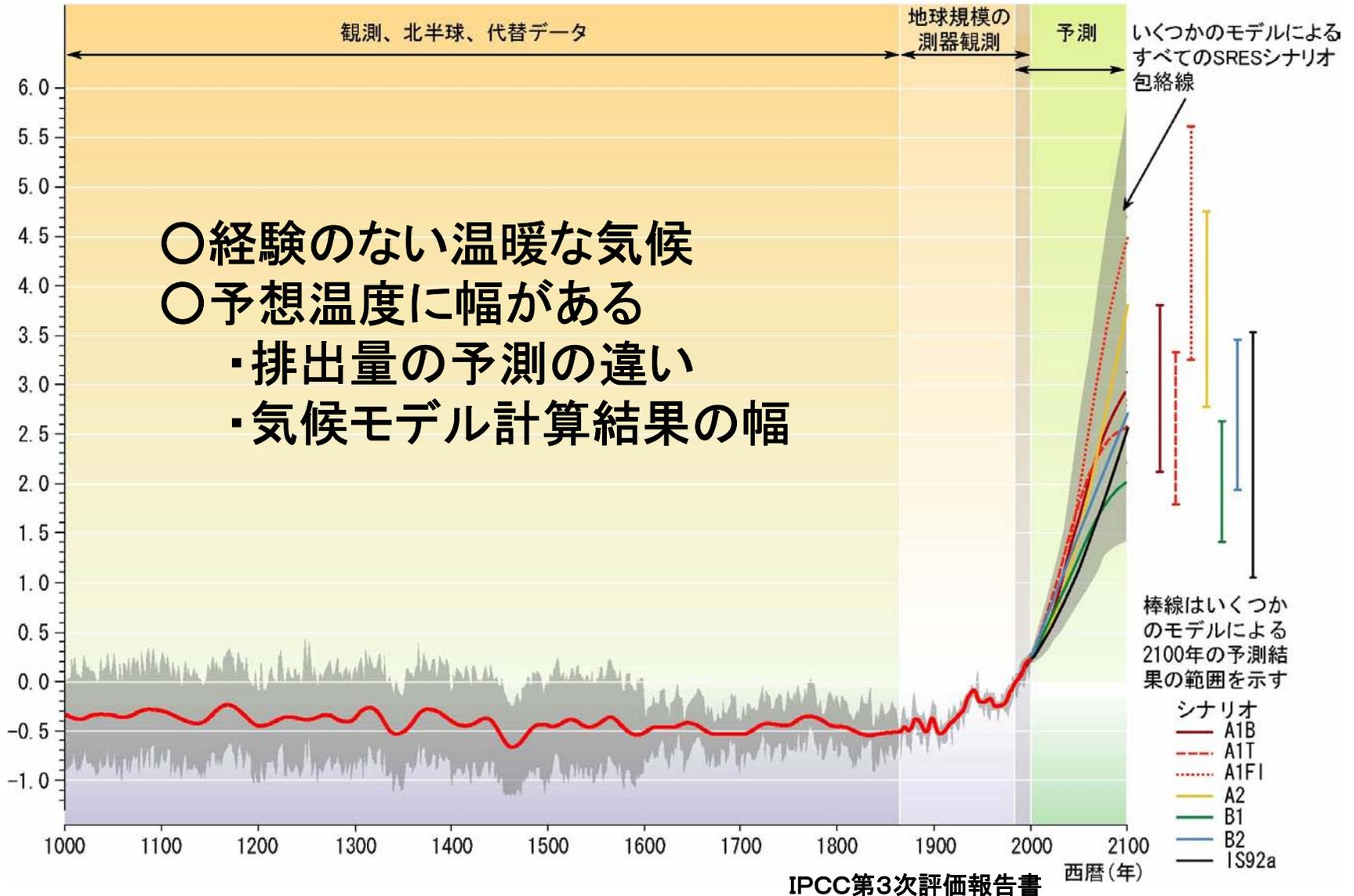
(c) 全ての人為起源と自然起源の因子を複合させると、過去140年間の観測値とモデル計算が最もよく説明される



気温変化の観測結果とモデルシミュレーションによる再現結果を比較して主な変化の原因を見極める。モデルの気候感度の不確実性を考慮する必要がある

今後予想される気候変化は？ 急激な速度の変化

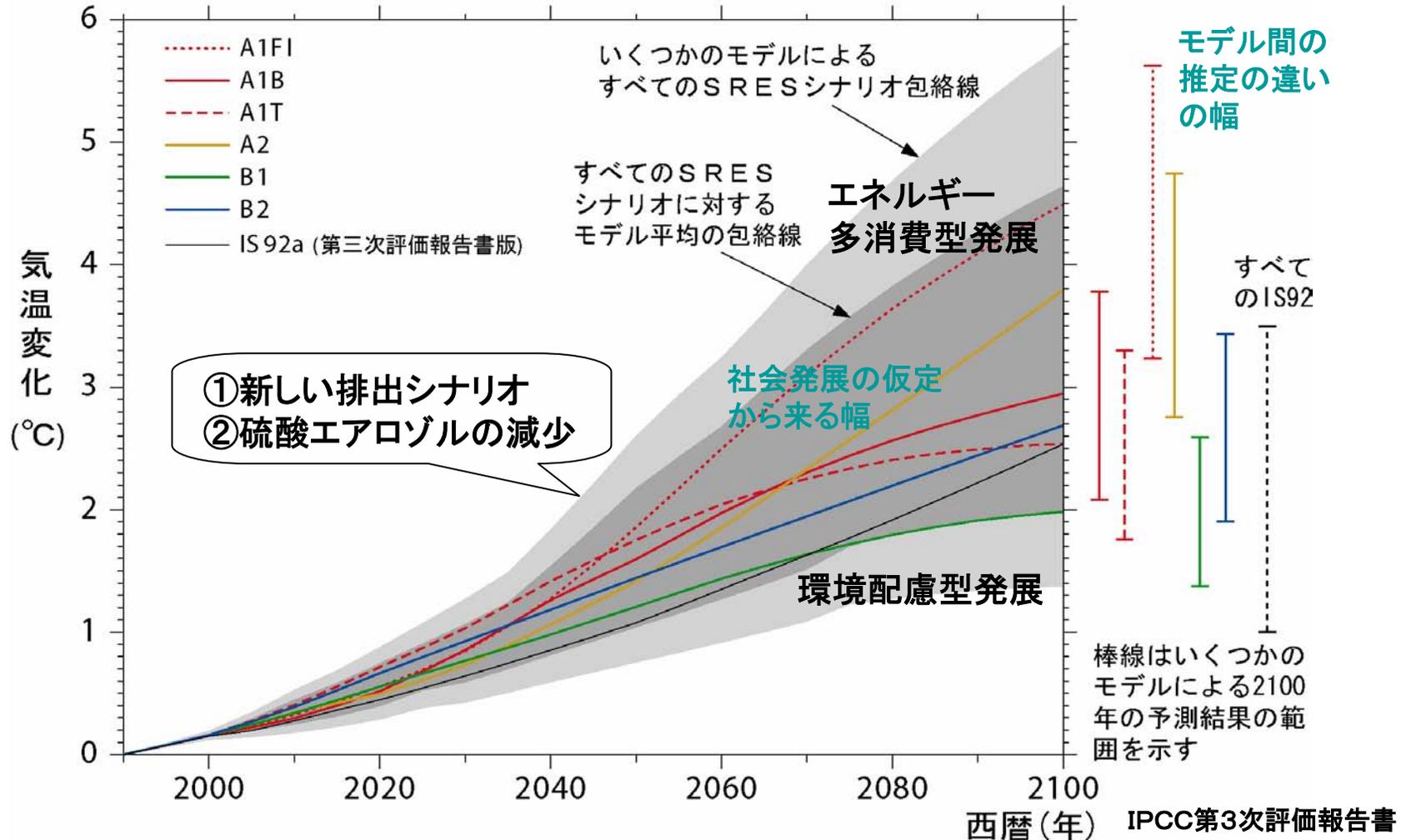
気温の偏差°C(1990年における値との比較)



今後の気候変化は緊急重大な悪影響をもたらすか？

気温上昇予測：将来社会のあり方で異なる。モデルでも幅

将来の社会・経済的要因を考慮した多様なシナリオを採用・その排出量で気候変化予測



科学的不確実性が増大し、予測幅がひろがったか？

報告書	公表時期	シナリオ名	シナリオセット数	1990～2100年の 気温上昇
第3次評価報告書	2001年	SRESシナリオ	35個	1.4～5.8℃
第2次評価報告書	1995年	IS92シナリオ	6個	1.0～3.5℃

IPCC第3次評価報告書では第2次評価報告書に比べて、
気温上昇が高く、予測幅が大きい？



主な原因

- ① 多様な世界を描いている (予測幅 = 社会の動き + 気候モデル精度)
- ② SO2排出量高め推定を補修正 (高い気温上昇)



科学的不確実性が増加したわけではない

地球温暖化に関わる不確実性の要因は何か？

人間活動と気候システム(現象と相互作用)が主要な要因

1. 人間活動

- ・人口、経済、技術革新などの将来予測
- ・土地利用変化や温室効果ガスの排出量の将来予測

2. 気候システムの要素

- ・放射強制力(エアロゾルやすすなど)
- ・物理過程(とくに雲、水蒸気、氷)

3. 気候システムの相互作用

- ・炭素循環のフィードバック

1) 温度上昇による陸域生態系によるCO₂吸収の低下

例 植物や土壌微生物の呼吸の活性化

森林の成熟に伴う吸収量の減退、CO₂肥沃化や窒素沈着効果が飽和
高温障害や森林火災の増加

2) 水温上昇による海洋のCO₂吸収の低下

例 溶解度低下や深さ方向の成層化

4. 気候感度

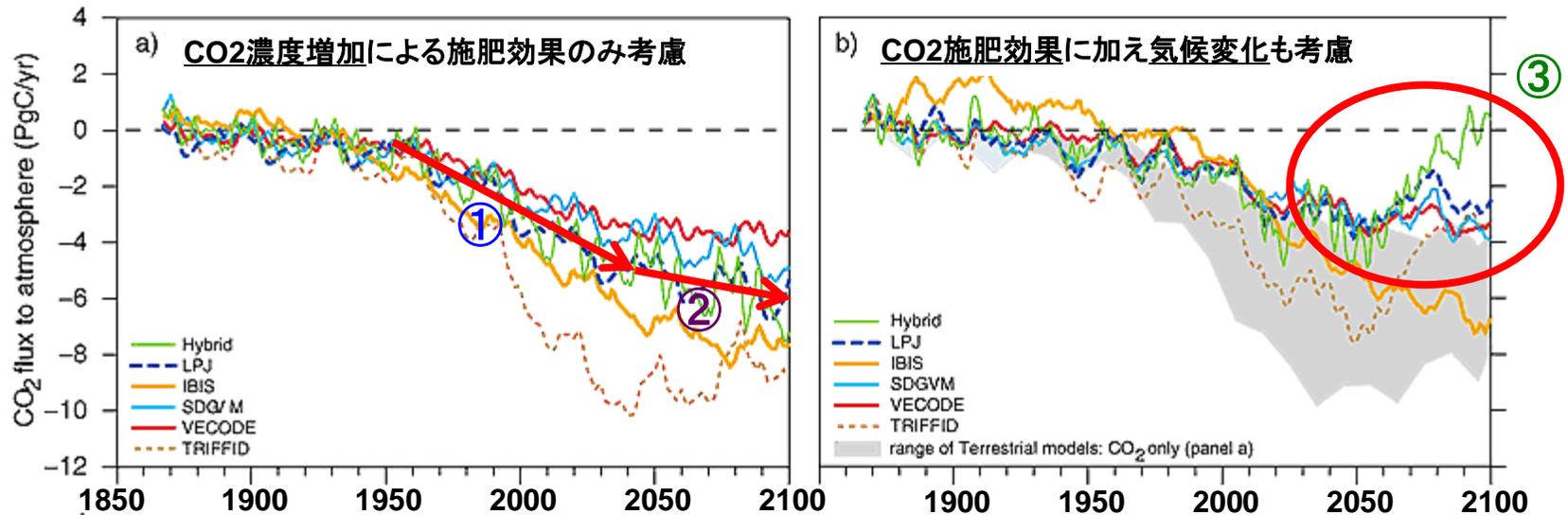
- ・気候モデルの不確実性を表す指標として用いられる

21世紀前半、陸域植生はCO₂の吸収源だが、後半に吸収量は減少する

陸域⇔大気の炭素交換量(陸域からの純炭素排出量)推計

(a) CO₂濃度増加による施肥効果のみ考慮

(b) CO₂濃度増加による施肥効果に加え気候変化も考慮



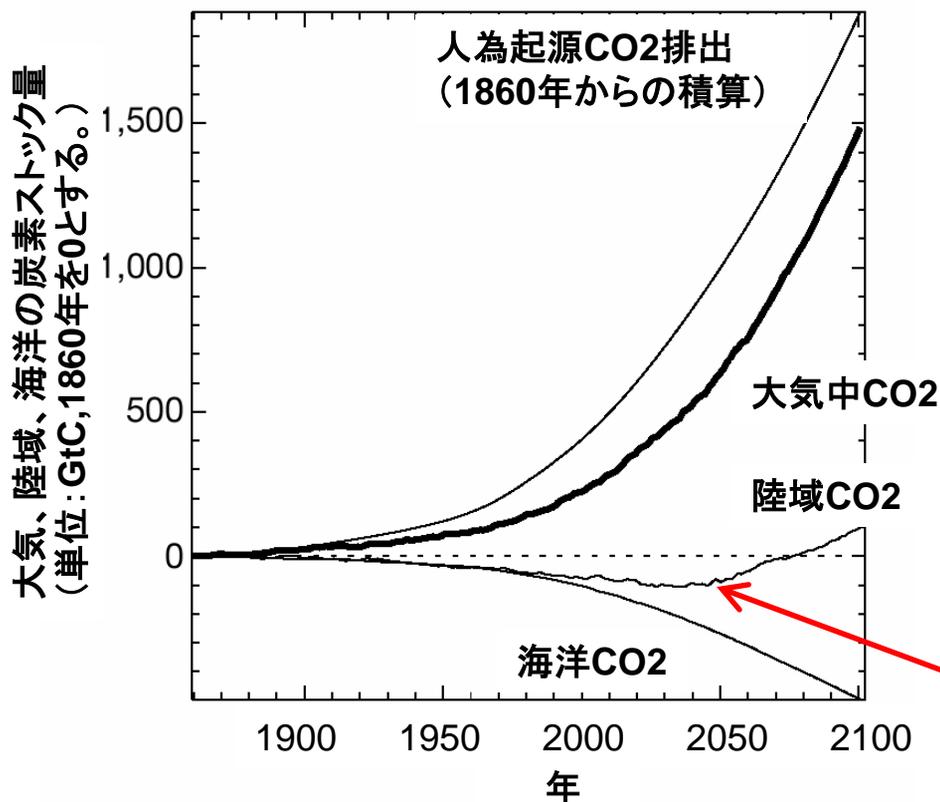
① 21世紀前半、大気中CO₂濃度増加に伴い、CO₂施肥効果のため、陸域炭素吸収量は増加する。

② 21世紀中ごろ以降、CO₂施肥効果の頭打ちにより、炭素吸収速度は低下。

③ 大気中CO₂濃度変化に加え気候変化の影響を考慮した場合、気温上昇により植物や土壌微生物の呼吸が活性化するため、炭素吸収量の減少が大きくなる。また一部地域では気候変化による森林消失のため、やはり吸収量減少が見込まれる。

陸域の炭素吸収量低下を気候モデルに反映すると、さらに温暖化が加速

動学的植生モデルを気候モデルに連結し、陸域炭素吸収量変化による気候へのフィードバックを考慮したシミュレーション研究も行われつつある(Coxら, 2000)。



- ・ 気温上昇による陸域炭素吸収量の減少がさらに気候変化を加速し、2050年付近で陸域炭素吸収量が0となり、それ以降、陸域は炭素の吸収源ではなく排出源になる。

- ・ フィードバックを考慮しない場合と比較して、2100年時点の大気中CO₂濃度ならびに全球平均気温が、それぞれ250ppmならびに1.5°C高くなる。

2050年付近で、 $d(\text{陸域CO}_2\text{ストック})/dt=0$ 、つまり陸域の純炭素吸収量が0となる。

IPCCにおける気候感度の取り扱い

・気候感度とは？

大気中の二酸化炭素濃度が2倍になったときの、地球の年平均気温の長期間（平衡状態）の変化を指す。

・気候感度と不確実性

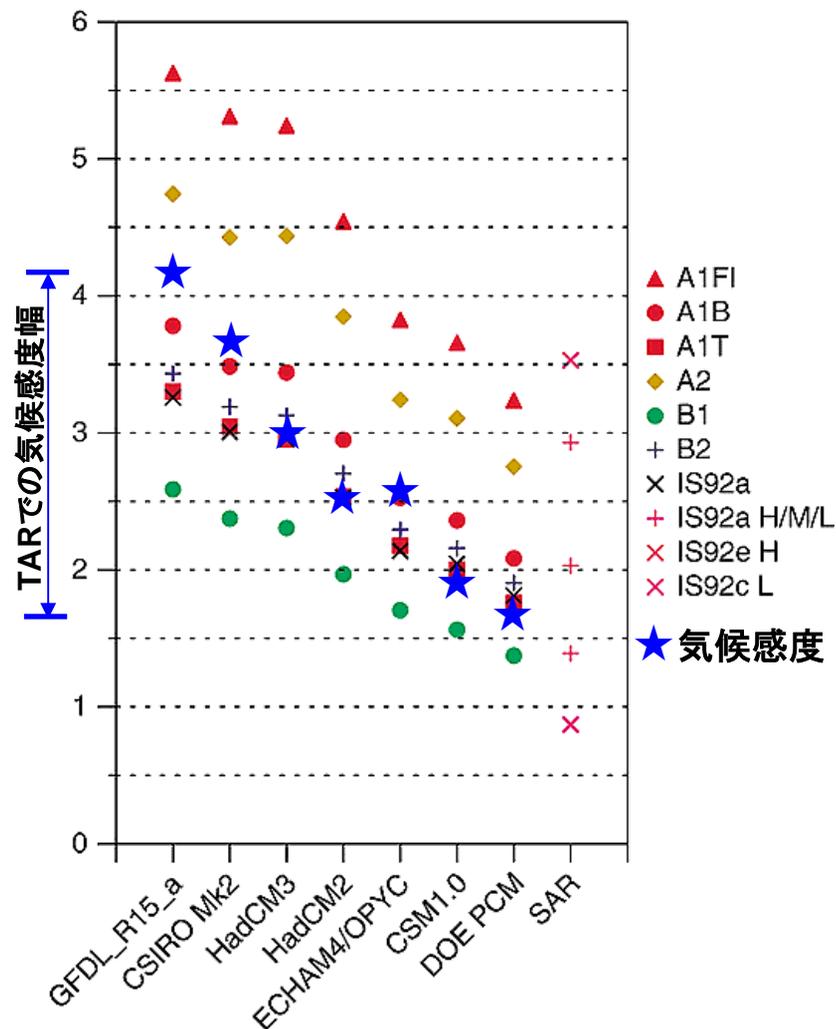
気候モデルを構成する物理過程や相互作用（フィードバック）の不確実性を総合的に表している。

・IPCCの第三次評価報告書

1.7～4.2°Cと評価。

・最近の研究

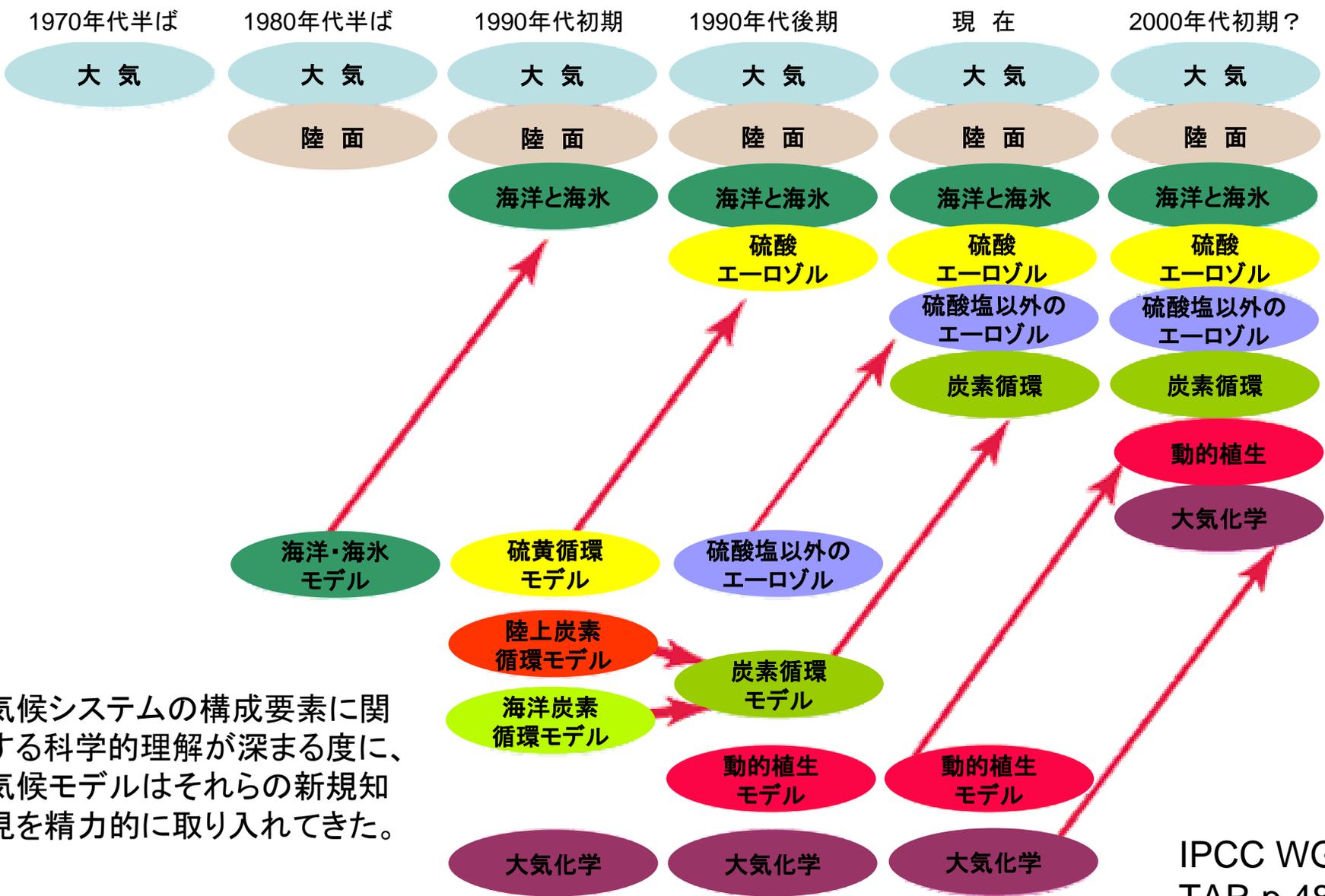
気候感度の確率分布の研究が進むとともに、IPCC等がワークショップを開催している。



1990～2100年の全球平均気温変化推計

科学的知見の進歩の例：気候モデルは進歩したのか？

1990年代以降、気候モデルは大きく進歩した。



気候システムの構成要素に関する科学的理解が深まる度に、気候モデルはそれらの新規知見を精力的に取り入れてきた。

今後の科学的知見の見通し

- 計算機資源の進歩(地球シミュレータ研究)
 - 時間・空間解像の高い温暖化実験を通じた、気候システムの理解の向上(異常気象発生メカニズムなど)
 - 気候モデル予測能力の向上(気候の地域性や変動性の再現性の向上)
- 観測情報の充実
 - 温室効果ガス、陸域・海洋の吸収・排出源の観測モニタリングや衛星観測の強化・充実、測定精度の向上
 - より充実した観測情報に基づく、気候モデルパラメータの改善(不確実性減少)や、モデルパフォーマンスの検証・向上
- プロセスの更なる理解
 - 雲、氷、エアロゾル、すず、植生フィードバック等のプロセス解明と、それら新規の科学的知見の気候モデルへの反映

IPCC第4次評価報告書(第一次作業部会)の目次

気候変化2007: 物理的な科学的基礎 Climate Change 2007: Physical Scientific

Basis

- 第 1章 気候変化の科学に関する歴史的概観
- 第 2章 大気組成及び放射強制力の変化
- 第 3章 観測: 大気圏および表面での気候変化
- 第 4章 観測: 雪氷及び凍土の変化
- 第 5章 観測: 海洋気候変動および海面水位
- 第 6章 古気候
- 第 7章 気候システムの変化と生物地球科学との結合
- 第 8章 気候モデルとその評価
- 第 9章 気候変化の理解とその原因特定
- 第10章 地球規模の気候予測
- 第11章 地域の気候予測

気候は変化しているのか？/気候変化の影響がみられるか？

近年気象・生物物理システムの変化が顕在化している

指標	観測された変化
平均気温	20世紀中に約0.6°C上昇
平均海面水位	20世紀中に10~20cm上昇
暑い日(熱指数)	増加した可能性が高い
寒い日(霜が降りる日)	ほぼ全ての陸域で減少
大雨現象	北半球の中高緯度で増加
干ばつ	一部の地域で頻度が増加
氷河	広範に後退
積雪面積	面積が10%減少(1960年代以降)
(気象関連の経済損失)	10倍に増加(過去40年間)

気候は変化しているのか？/気候変化の影響がみられるか？

ヒマラヤの氷河の融解

1978年

写真については著作権の関係上
掲載しておりません

1998年

写真については著作権の関係上
掲載しておりません

山岳氷河は20世紀後半、大幅に後退した

気候は変化しているのか？/気候変化の影響がみられるか？

世界各地で頻発する異常気象

写真については著作権の関係上
掲載していません

○2003年欧州熱波

フランス

→熱波による死者1万人以上

写真については著作権の関係上
掲載していません

○干ばつ
エチオピア

→2002年の穀物収穫量は平年の20%

2003年夏、欧州を襲った熱波により、多くの人々が死亡した

表 熱中症による死亡者数の推定値(暫定値)

国	過剰死亡者数 (%),全年齢	期間	ベースラインとなる死亡者数の推 定方法
英国	2045 (16%)	8月4～13日	1998～2002年の同時期の平均 死亡者数
フランス	14802 (60%)	8月1～20日	2000～2002年の同時期の平均 死亡者数
イタリア	3134 (15%)	6月1日～8月15日	2002年の同時期の死亡者数
ポルトガ ル	2099 (26%)	8月1～31日	1997～2001年の死亡者数
スペイン	集計中		-

注1: 正確な数字をまとめるには、1年かかる。

注2: 熱中症による被害。大気汚染(対流圏オゾン)も悪化したことが確認されて
いる。

欧州の熱波は過去500年でみても最大規模の熱波であった

研究事例1 (右図)

— 2003年6月、7月の欧州大陸の気温は40°Cまで上がった。

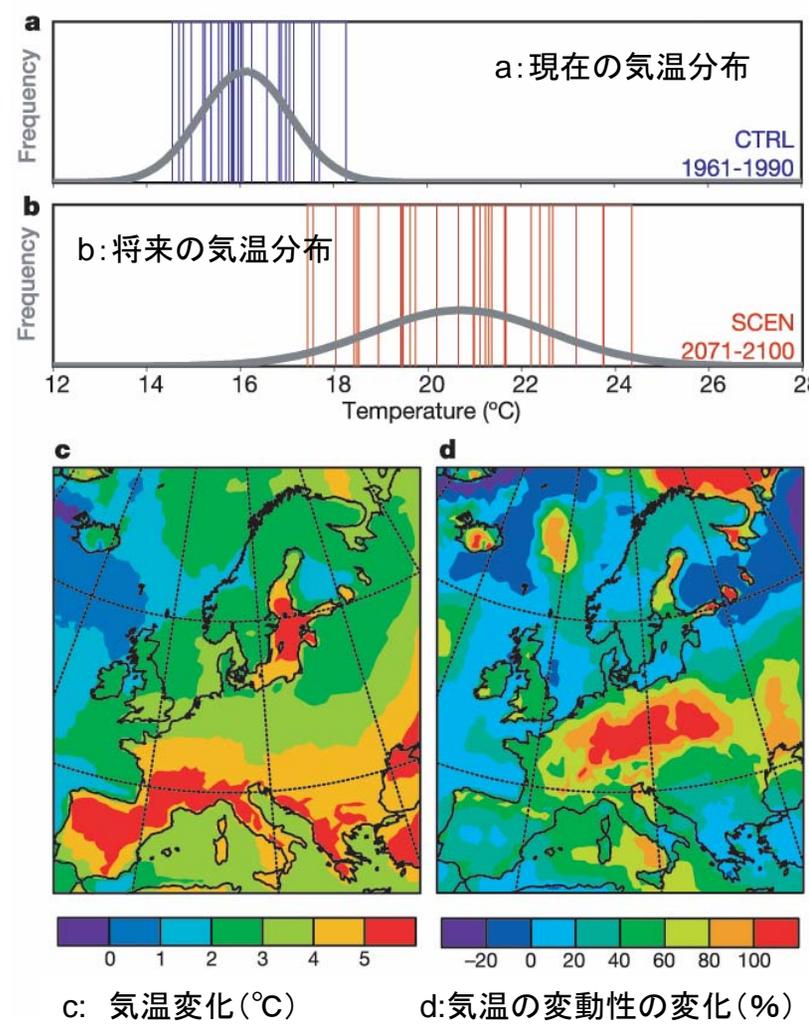
— 地域気候モデルの将来予測から求めた気温分布から、2003年の熱波は46000年に1度の非常に稀なものであることがわかった。

— 温暖化は気温上昇をもたらすだけでなく、気象の変動性(すなわち異常気象の発生)を増す可能性がある。

研究事例2

— 夏(6~8月)の平均気温は1901~1995年の平均気温に比べて2°C高かった。1500年以降の記録でみても最高気温となった(文献1)。

a, b: スイス北部、夏の月平均気温
c, d: 欧州の気温変化と変動性の変化



出典 1) Schar, C. et al., Nature, 2004
2) Luterbacher, J. et al, Science, 2004:

気候は変化しているのか？/気候変化の影響がみられるか？

世界各地で増加する森林火災

2003年夏:猛暑と干ばつによる記録的な森林火災

2003年の森林火災面積

国名	2003年1～8月	特記事項
ロシア	23,710,000 ha	日本の国土面積の約6割
アメリカ	2,888,738 ha	東京都の面積の約14倍
ポルトガル	417,000 ha	国土面積の8%焼失

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)

写真については著作権の関係上
掲載しておりません

ポルトガル
過去100年で最悪の山火事

今後の気候変化は緊急で大きな悪影響をもたらすものであるか？

気候変化に伴う様々な影響が予測されている

対象	予測される影響
平均気温	1990年から2100年までに1.4~5.8℃上昇
平均海面水位	1990年から2100年までに9~88cm上昇
気象現象への影響	洪水、干ばつの増大、(台風?)
人の健康への影響	熱ストレスの増大、マラリア等の感染症の拡大
生態系への影響	一部の動植物の絶滅 生態系の移動
農業への影響	多くの地域で穀物生産量が減少。当面増加地域も。
水資源への影響	水の需給バランスが変わる、水質へ悪影響
市場への影響	特に一次産物中心の開発途上国で大きな経済損失

今後の気候変化は緊急で大きな悪影響をもたらすものであるか？

気候変動により発生する可能性のあるリスク例 —最新の知見—

○気候変動による動植物の絶滅の危機（2004年1月8日Nature）

（英国、豪州などの14の研究機関の共同研究）

地球温暖化が進むと、約50年後には動植物の18～35%の種が絶滅する恐れがあると発表

○WHO「気候変動と人間の健康」報告書（2003年12月11日）

（WHOが、WMO及びUNEPとの共同作業により報告書を作成し、COP9にて発表）

最近の地球温暖化の影響による死者が15万人に達したと報告

○温暖化によるスキー場の危機（2003年12月3日UNEP）

（UNEPが、チューリヒ大学との共同研究成果を、COP9にて発表）

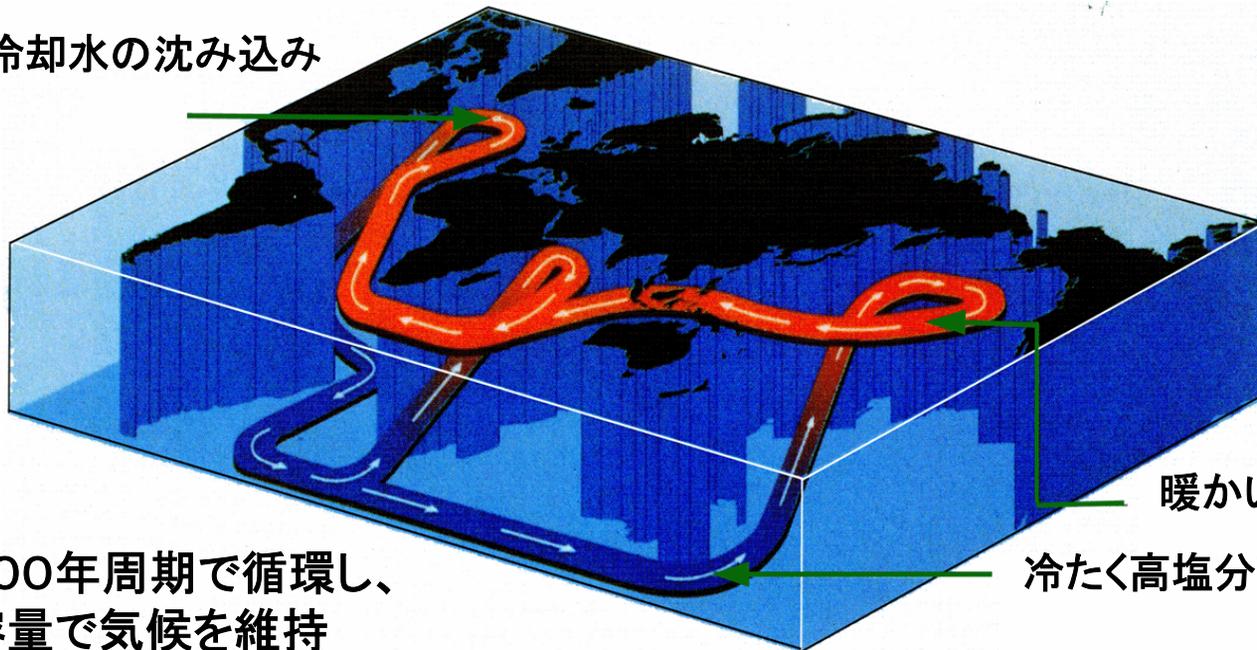
温暖化による降雪量の大幅減少により、欧州、北米、豪州などのスキー場が閉鎖の危機

今後の気候変化は緊急で大きな悪影響をもたらすものであるか？

極端な温暖化による破局的事象例：海洋大循環の崩壊

メキシコ湾流(暖流)の速度・方向が変化し、ヨーロッパが寒冷化する可能性

高塩分冷却水の沈み込み



暖かい表層流

冷たく高塩分の深層流

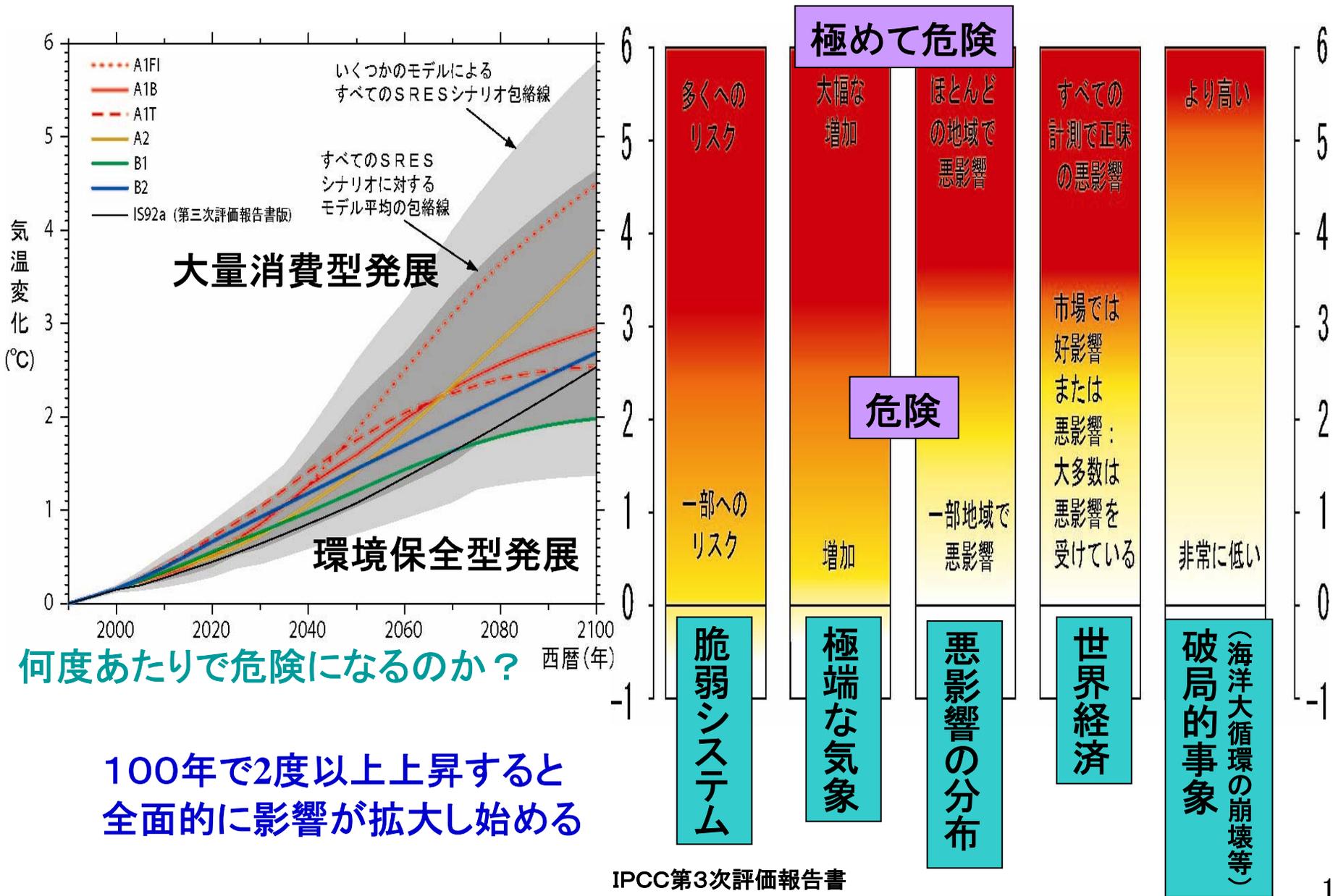
海流は2000年周期で循環し、
大きな熱容量で気候を維持

長期的に見て起こり得るその他の破局的影響

- ツンドラなどの土壤・植生からの急激な温室効果ガスの放出
- 南極及びグリーンランドの氷床の融解による海面水位の大幅な上昇

今後の気候変化は緊急で大きな悪影響をもたらすか？/対策の目標はどのようなものか？

気候変動によるリスクは気温の上昇とともに増加



どのような対策が必要か/目標はどのようなものであるべきか？

温室効果ガス濃度のある安全な「水準」で安定化する必要がある。

○気候変動枠組条約の究極目的

気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼさない水準において、大気中の温室効果ガス濃度を安定化させること

○温室効果ガス濃度を安定化させること



地球全体の温室効果ガスの
排出量と吸収量が平衡に達する状態

そのような水準は、

- ① 生態系が気候変動に自然に適応
- ② 食料生産が確保(脅かされず)
- ③ 経済開発が持続可能に進行できる期間内で達成されるべき



安定化するまでに排出される温室効果ガスの
累積排出量によって、安定化のレベルが決まる

産業革命以前280ppm, 現在370ppm, 昔の倍程度 550ppm? あるいはそれ以上?
レベルだけでなく変化の速度も問題である

対策の目標はどのようなものか？/どのような手段があるのか？
どのような手順がいいのか？

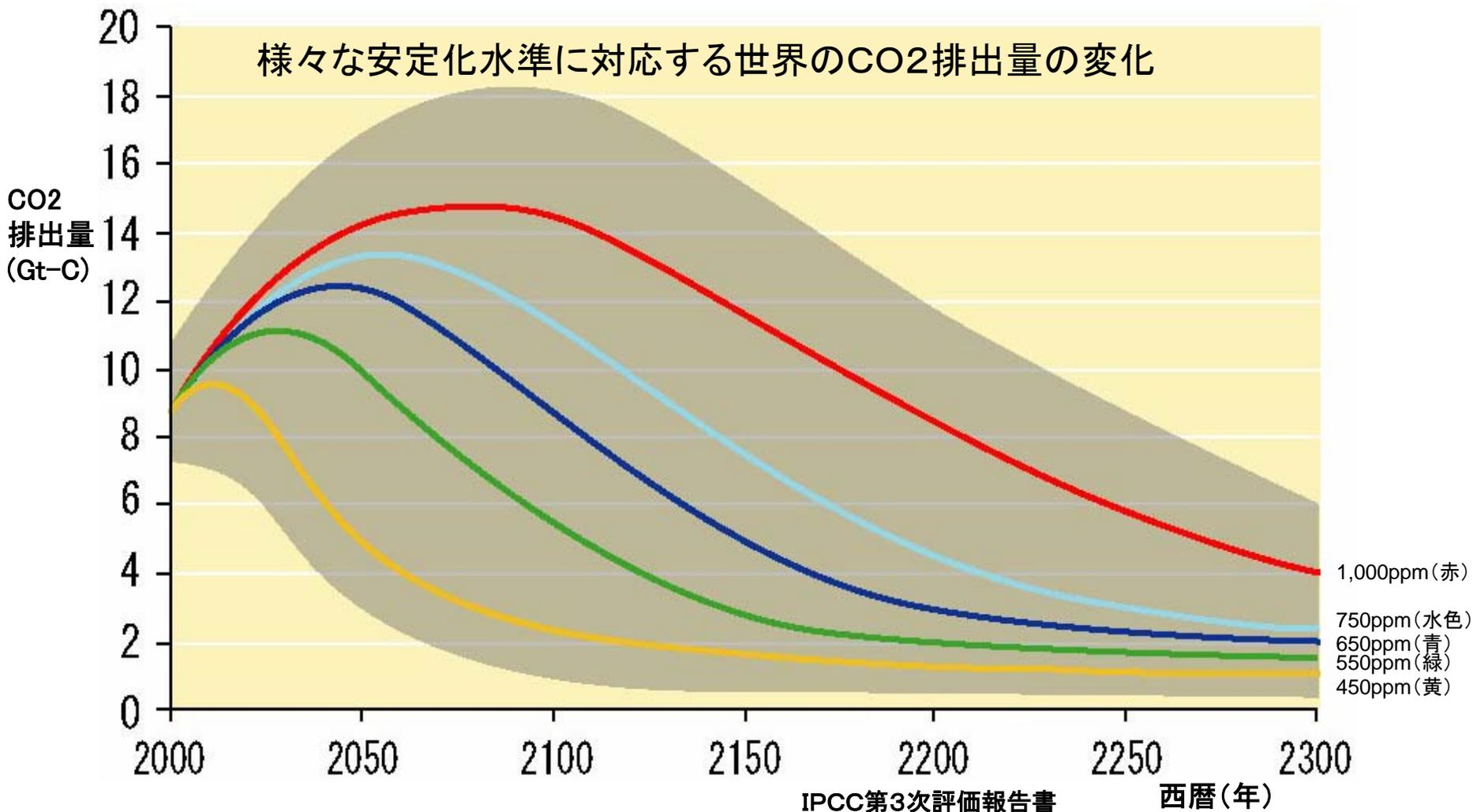
温室効果ガス濃度安定化のためには、
排出量をいつかは吸収量まで減らさねばならない



いずれにしても安定化のためには、
排出速度＝吸収速度 にする、
即ち今より絞る必要がある

対策の目標はどのようなものか？

道筋はどのようにでもかけるが、如何なる安定化水準であっても温室効果ガスの大幅な削減が必要



対策の目標はどのようなものか？

温室効果ガスを安定化させるためには、 現在の排出量の50%以下への削減が必要

安定化状態における世界の温室効果ガス排出量

安定化濃度 (ppm)	平衡に達した時の 気温上昇幅 (括弧内: 平均値) ※1	2300年における世界の GHG排出量※2		安定化する時期と CO ₂ 累積排出量※1	
		年間排出 量(t-C)	2000年総排出 量(80億t-C)比	おおむね 安定化する年	21世紀の累積 排出量(t-C)
450	1.5~4°C(2.5°C)	14億	18%	2090年	5,500億
550	2~5°C(3.5°C)	20億	25%	2150年	8,600億
650	2.5~6°C(4°C)	26億	33%	2200年	10,500億
750	3~7°C(4.5°C)	34億	43%	2250年	11,600億
1,000	3.5~8.5°C(6°C)	40億	50%	2375年	12,600億

※1: IPCC第3次評価報告書(TAR)より抜粋。

※2: 国立環境研究所(MAGICC: 簡易炭素循環モデル)による計算結果。
GHGについては、化石燃料からのCO₂排出量・土地利用変化によるCO₂及びnon-CO₂の効果を含む。

なお、1000ppmの場合の排出量についてはTARの図より推計した。

対策の目標はどのようなものか？

目標となる濃度：550ppm？

○ 安定化に向けて、どの水準を選択すべきか？

各国の濃度安定化目標(例)

- ・イギリス・・・CO₂：550ppm(エネルギー白書)
- ・スウェーデン・・・6ガス：550ppm(政府コミットメント)
- ・ドイツ・・・CO₂：450ppm(気候変動に関する審議会勧告)

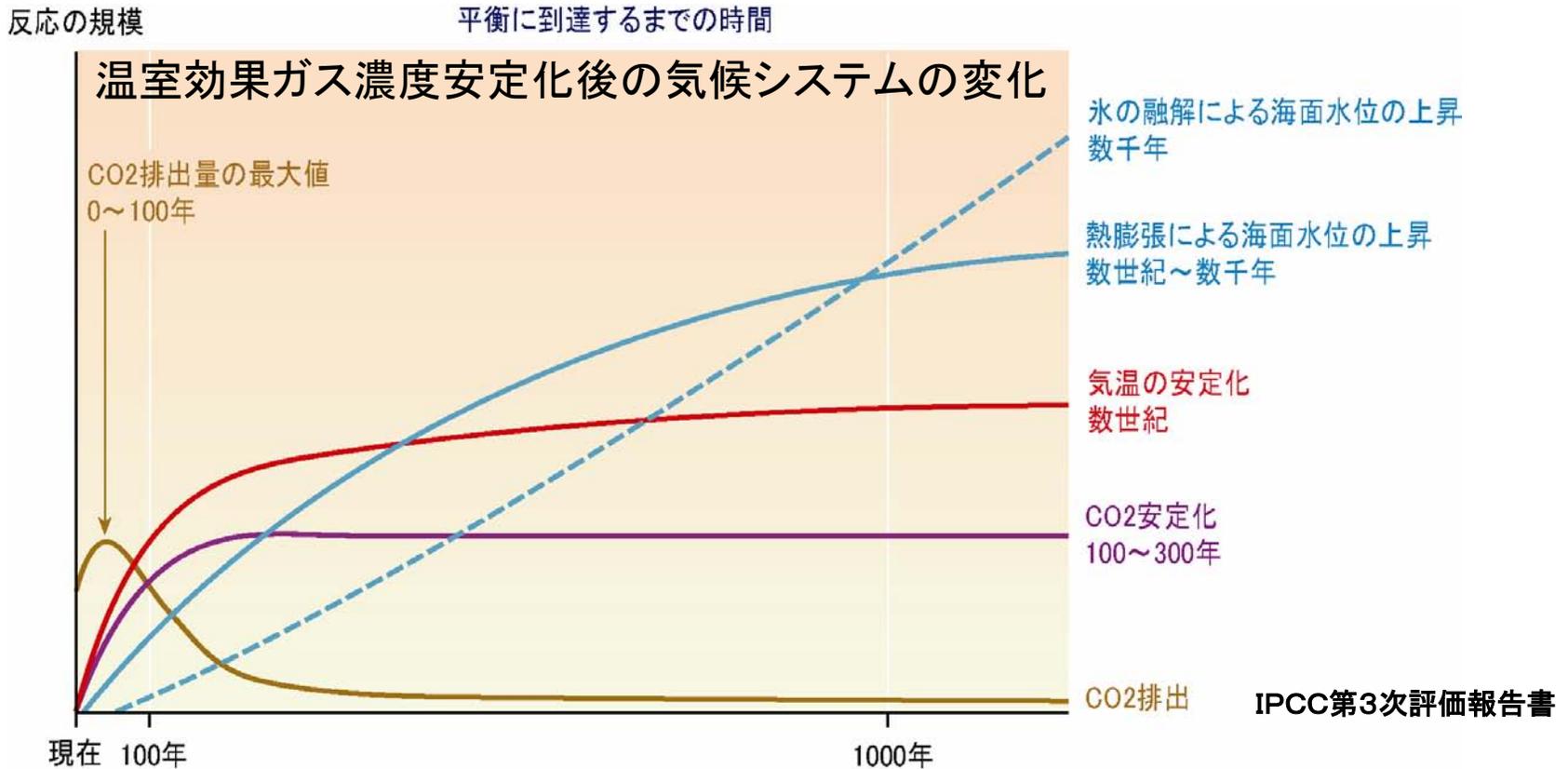
○ いずれの水準であっても、
世界全体で大幅かつ早期の削減が必要



我が国にとるべき道筋は？

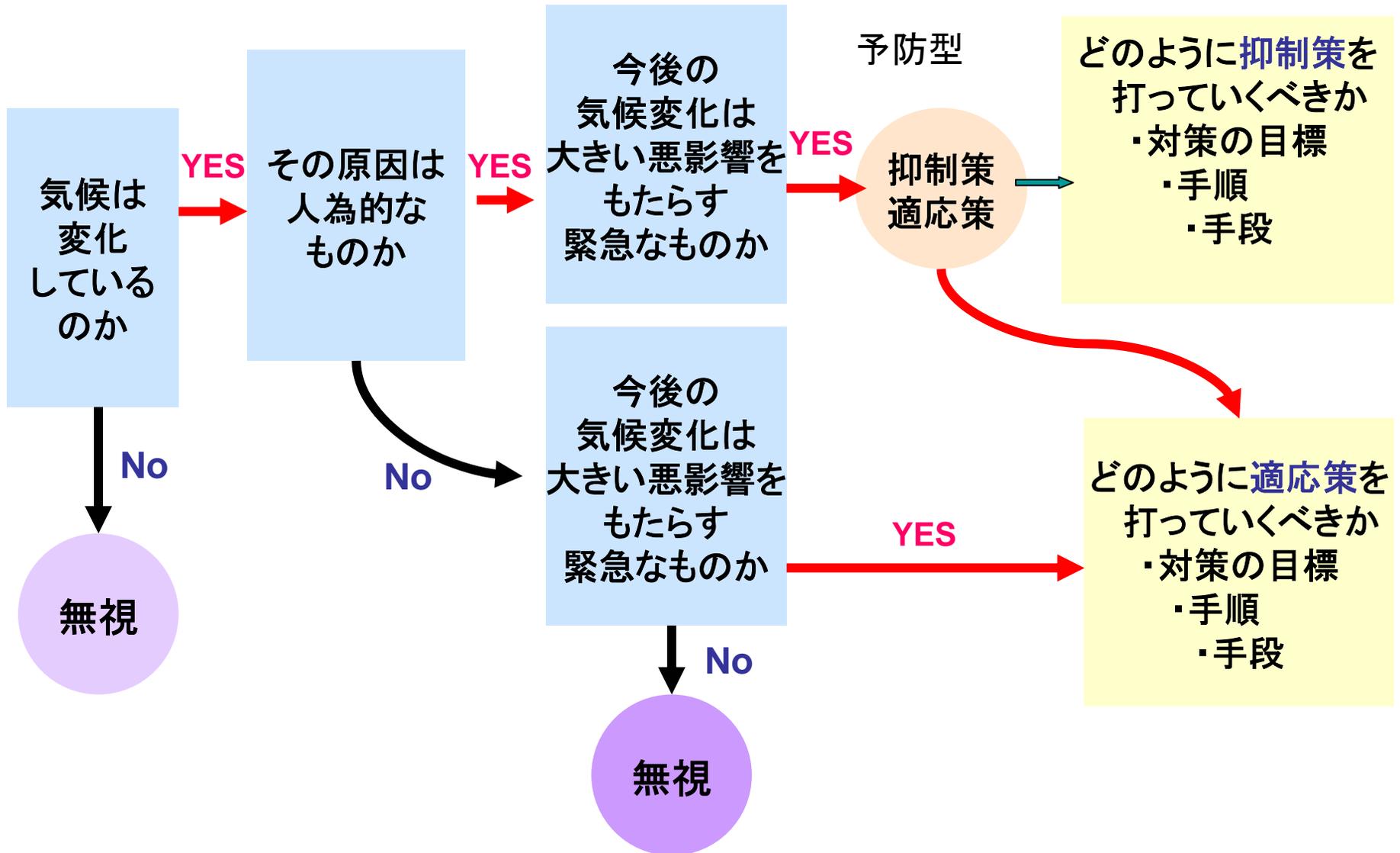
緊急で大きな悪影響をもたらすものであるか？/対策の目標はどのようなものか？
どのような手順(いつから)が必要か？

排出を減らした後も気候はすぐには安定化しない。
早めの対策が必須。



- CO2排出が大幅に削減された後、
- ①CO2濃度: 100~300年後に安定化
 - ②気温: 1世紀以上上昇、数百年後に安定化
 - ③海面水位: 数百~数千年後に安定化

気候政策検討に必要な科学的知見



気候政策にかかる科学的知見の示すところ

- 科学的観測、知見の集約が組織的に行われて来て、科学的不確実性は狭まりつつある。
- 気候は変化しつつあり、生物物理化学的現象として観測されている。
- 変化は人為起源とみられる。
- 変化による影響はまだPin-pointでは推定できないが、生存基盤を脅かす可能性が大。
- 気候を安定化するには、いずれにしてもいつか温室効果ガス排出量を今より大幅に削減しなければならない。
- 気候の慣性を考慮すると、危険を避けるには早めの対策が有効である。