



地球温暖化について考える

集中豪雨と台風の大型化は続く？

キャリアデー(2021年10月14日)の講義
於 須坂高等学校

公立諏訪東京理科大学・小越澄雄





本日の内容

1. ノーベル物理学賞受賞真壁淑郎氏と副題への回答
 2. 地球温暖化による文明の崩壊(例マヤ文明等の崩壊)
 3. 過去の温暖化(気候変動)等
 4. 地球温暖化に関する見解
 5. 対応策と緩和策
- 



本日の内容

1. ノーベル物理学賞受賞**真壁真鍋淑郎氏**と副題への回答
 2. 地球温暖化による文明の崩壊(例マヤ文明等の崩壊)
 3. 過去の気候変動等
 4. 地球温暖化に関する見解
 5. 対応策と緩和策
- 

ノーベル物理学賞受賞 真鍋淑郎



2021年10月6日日経新聞より引用

授賞理由

地球温暖化を確実に予測
する気候モデルの開発な
ど

地球温暖化が人間活動に
よることを示す根拠を与え
た。

真鍋先生は研究にとっても熱
心に取り組んでいたと言わ
れています。

夢中になれたからと言って
超一流になれるわけではな
いが、夢中になることなしに
超一流になった例を私は知
らない。何か夢中になれるこ
とを見つけてください。

集中豪雨と台風の大化は続く？

	2℃上昇シナリオに上る予測J パリ協定の2℃目標が達成された世界	4℃上昇シナリオによる予測 現時点を超える追加的な緩和策を取らなかった世界
日降水量200 mm以上の年間日数	約1.5倍に増加	約2.3倍に増加
1時間降水量50 mm以上注)の頻度	約1.6倍に増加	約2.3倍に増加
日降水量の年最大値	約12% (約15 mm)増加	約27% (約33 mm)増加
日降水量1.0 mm未満の年間日数	(有意な変化は予測されない)	約8.2日増加

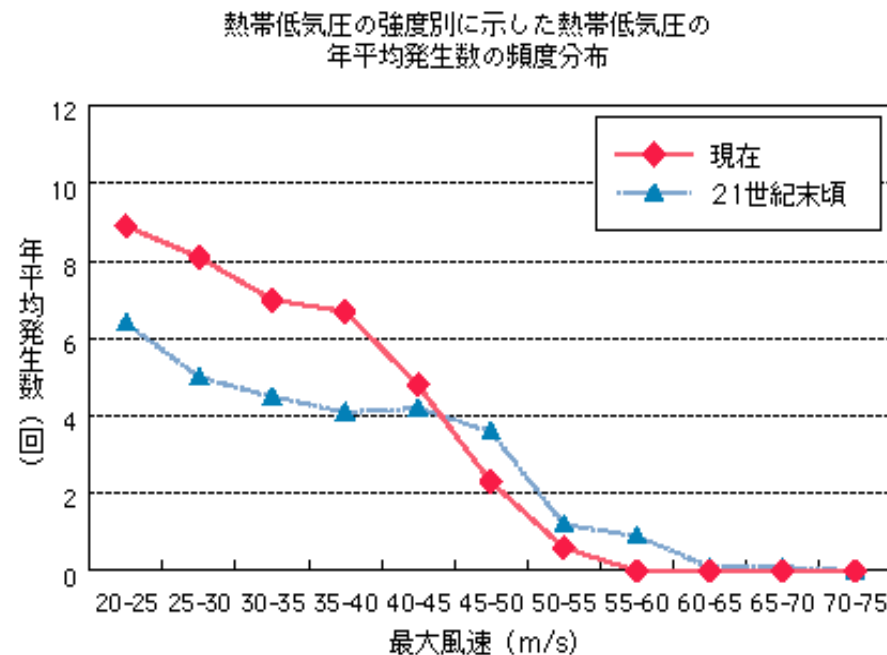
現在までに観測されている変化

- ・大雨及び短時間強雨の発生頻度は有意に増加し、雨の降る日数は有意に減少している。
- ・一方、年間又は季節ごとの降水量(合計量)には統計的に有意な長期変化傾向は見られない。

集中豪雨と台風的大型化は続く？

台風の大型化・・・気象庁気象研究所等

「21世紀末頃、全球的な熱帯低気圧の発生数30%程度減少、一方、海上(地上)の最大風速が45m/sを超えるような非常に強い熱帯低気圧の出現数については、地球温暖化に伴って増加する傾向」



台風に関しては
一致がまだみら
れていない

(注) 実線は現在気候再現実験、破線は温暖化予測実験の結果を示す。
資料) 気象庁「異常気象レポート2005」

異例豪雨、大気の流れ停滞 梅雨末期に類似



日本の広い範囲が記録的な大雨に見舞われている。インド洋東部など熱帯海域の高い水温、上空の偏西風の大きな蛇行などの複合要因で「梅雨末期の豪雨」に近い形が続いているためだ。長期的な温暖化の影響もあるとみられる。

集中豪雨と台風の大規模化は続く？

現在までに観測されている変化

- ・台風の発生数や日本への接近数・上陸数には、**長期的な変化傾向は見られない。**
- ・「強い」以上の勢力となった台風の発生数や全体に占める割合にも、**長期的な変化傾向は見られない。**
- ・**日本付近の台風の強度が生涯で最大となる緯度は、北に移動している。**

将来予測

- ・多くの研究から、**日本付近における台風の強度は 強まると予測**されている（台風のエネルギー源である大気中の水蒸気量が増加するため）
- ・4℃上昇シミュレーションの結果などから、日本の南海上においては、非常に強い熱帯低気圧（「猛烈な」台風に相当）の存在頻度が増す可能性が高いことが示されている。



本日の内容

1. ノーベル物理学賞受賞真鍋淑郎氏と副題への回答
 - 2. 地球温暖化による文明の崩壊(例マヤ文明等の崩壊)**
 3. 過去の気候変動等
 4. 地球温暖化に関する見解
 5. 対応策と緩和策
- 

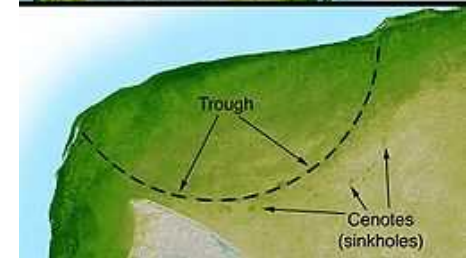
マヤ文明

マヤ文明(マヤぶんめい)とは、メキシコ南東部、グアテマラ、ベリーズなどいわゆるマヤ地域を中心として栄えた文明である。

大建造物が、紀元前400年以降に建てられた。古典期後期(A.D.600-900)の終わり頃の人骨に栄養失調の傾向があったことが判明している。

特徴

1. 数学を発達させた(二十進法を用い、零の概念を発明)
2. 文字種が4万種に及ぶマヤ文字を使用していた
3. 高度な建築技術を持っていた
4. 極めて正確な暦を持っていた(火星や金星の軌道も計算)
5. 多くの文明は河川の水の恵みにより発展してきたが、マヤ文明はセノーテとよばれる天然の泉により発展した



小惑星の大きさは直径10-15km、衝突速度は約20km/s、衝突時のエネルギーは広島型原子爆弾の約10億倍、衝突地点付近で発生した地震の規模はマグニチュード11以上、生じた津波は高さ約300メートルと推定されている。セノーテは落下地点の周辺に存在する。

マヤ文明の崩壊

入手可能な資源量 < 人口増加による必要な資源量
文明崩壊

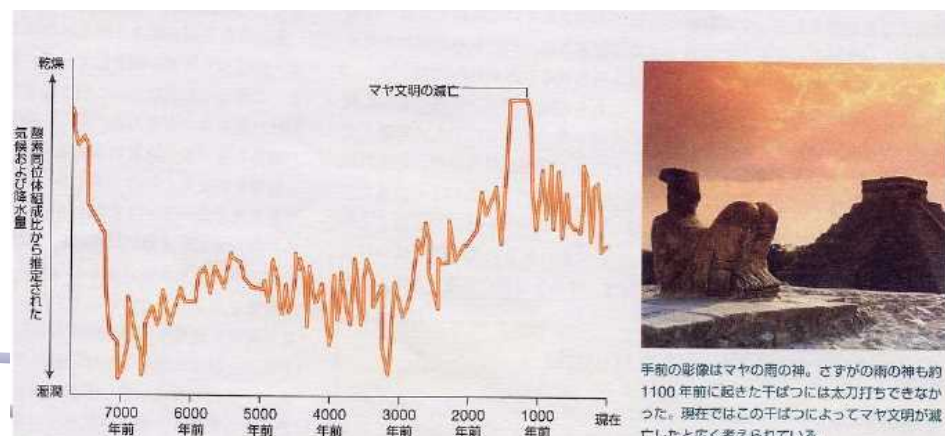
原因1 森林破壊と丘陵の浸食

原因2 減少した資源を巡る紛争

原因3 気候変動(干ばつ)

原因4 指導者(王、貴族)の無関心

皆さんが指導者ならどのようにしてマヤ文明の崩壊を防ぎますか？答えは一つではない。





本日の内容

1. ノーベル物理学賞受賞真鍋淑郎氏と副題への回答
 2. 地球温暖化による文明の崩壊(例マヤ文明等の崩壊)
 - 3. 過去の気候変動等**
 - 3.1 地球の年代と氷河期**
 - 3.2 過去の気候変動とその要因**
 - 3.3 地球の平均気温(平均気温はどのように決まる?)**
 4. 地球温暖化に関する見解
 5. 対応策と緩和策
- 



過去には多数の氷期と間氷期（暖かい時期）があった。

何故？



地球の3つの安定な気候状態

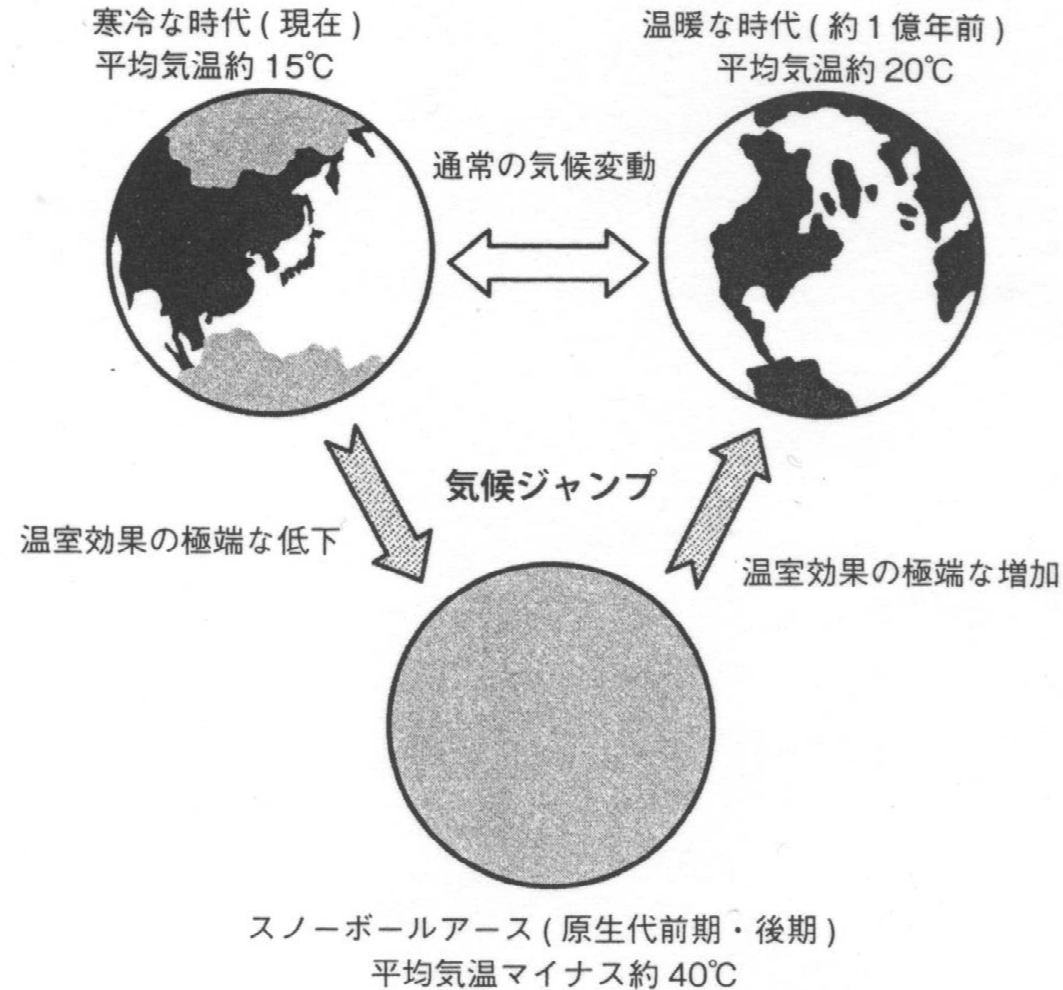
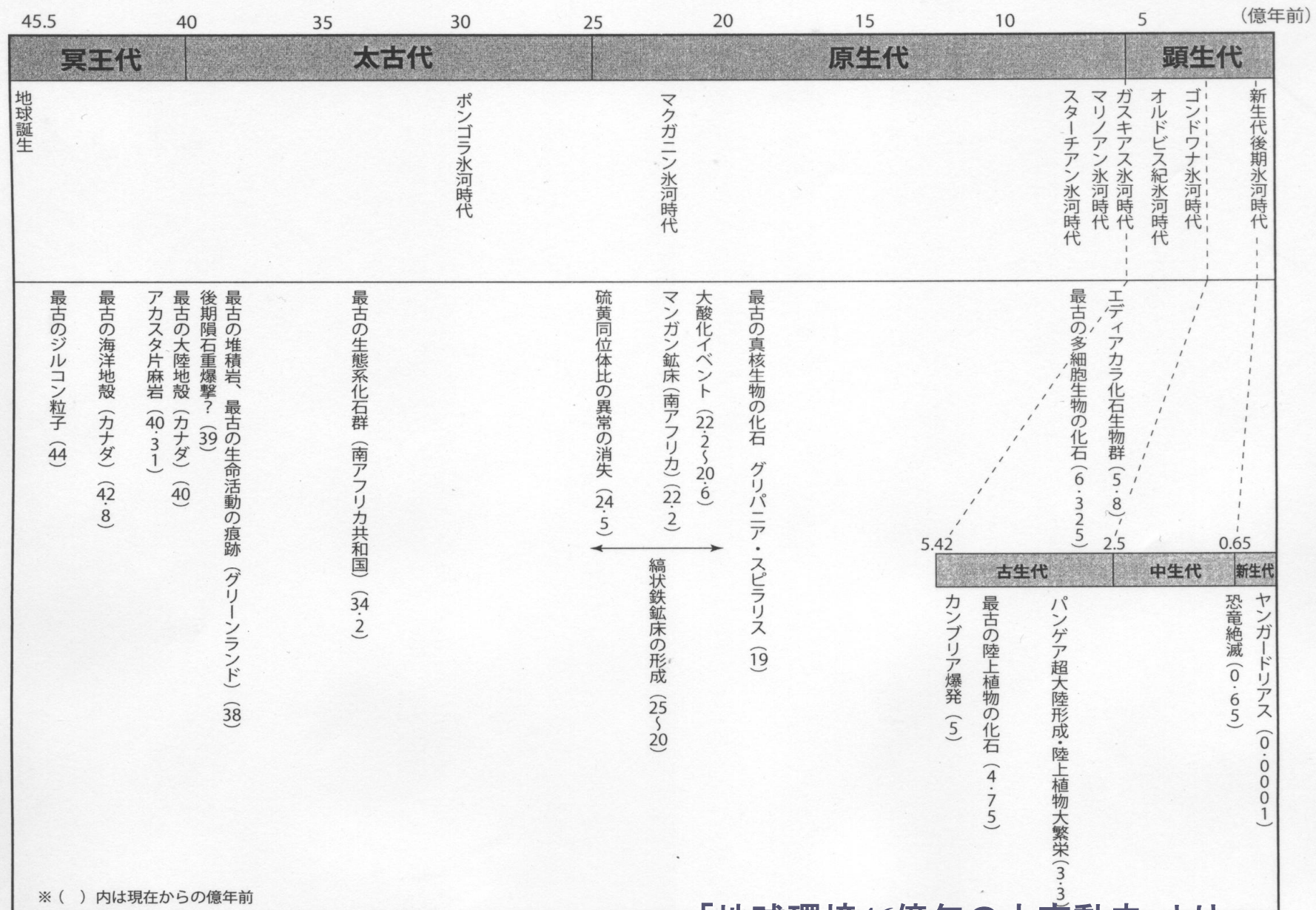


図 6-3 地球の 3 つの安定な気候状態。

「地球環境46億年の大変動史」より

地球の年代と氷河期

地球の年代と氷河期



「地球環境46億年の大変動史」より

質問

地球の平均気温

質問： 過去において地球全体が氷結(全球凍結)したことがあると考えられています。

その根拠は？また全球凍結ではアルベドAが大きくなるため平均気温が低下したままになると考えられますが、それが溶けた理由は何？

平均気温の算出式

$$T^4 = \frac{P(1-A)}{4\varepsilon\sigma}$$

気温はエネルギーバランスで決まる
：地球に入ってくるエネルギー＝出ていくエネルギー

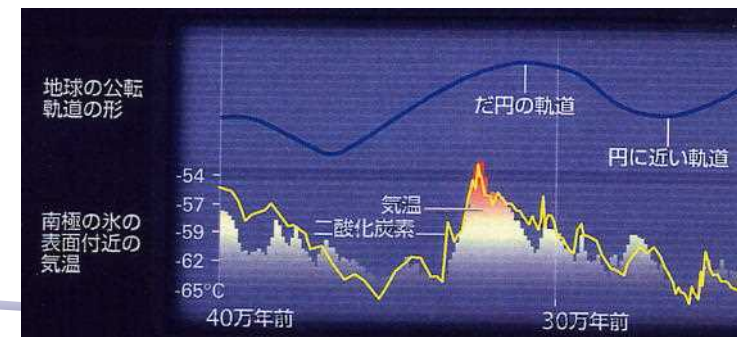
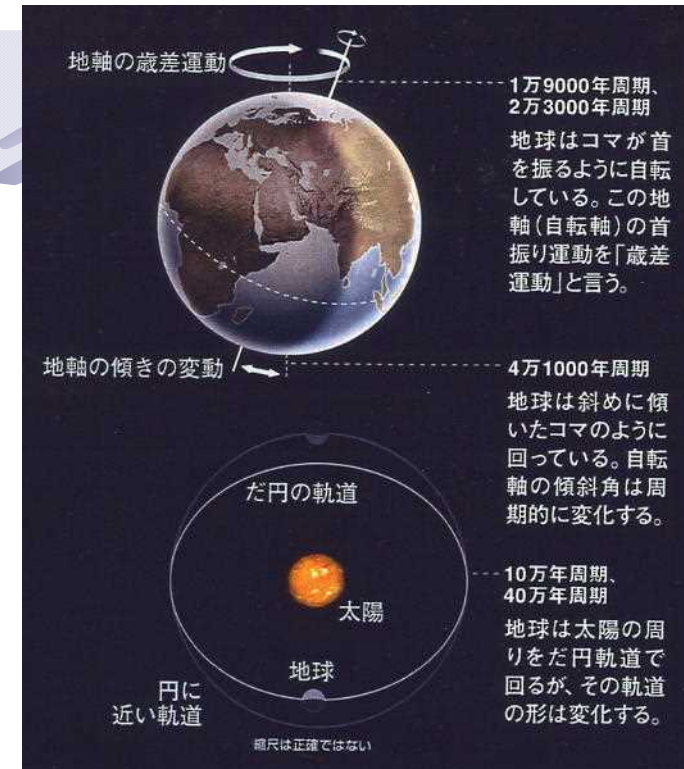
氷期・間氷期の原因

直近の50万年の気候

約10万年サイクルの氷期と間氷期の交代、この大きな寒暖の変動の上に、約4万年と2万年の変動がのっている。

これは、ミランコビッチによる地球の公転軌道の変化(離心率の変化:約10万年サイクル、自転軸の傾き約4万年サイクル、歳差運動の周期約2万年)を基にした予測と一致する。

1000年単位の自然な気候変動は、木星、土星、金星の重力の影響による地球軌道の変動が引き起こす





今まで・・・地球軌道の変化が温暖化
の主因

現在の温暖化は温暖化ガスによる温室効果だと言われています。
温暖化ガスによってどのように地球の平均気温が決まるのでしょうか？



地球の平均気温の導出

地球の平均気温

熱バランスの式(右辺はステファン・ボルツマンの法則)

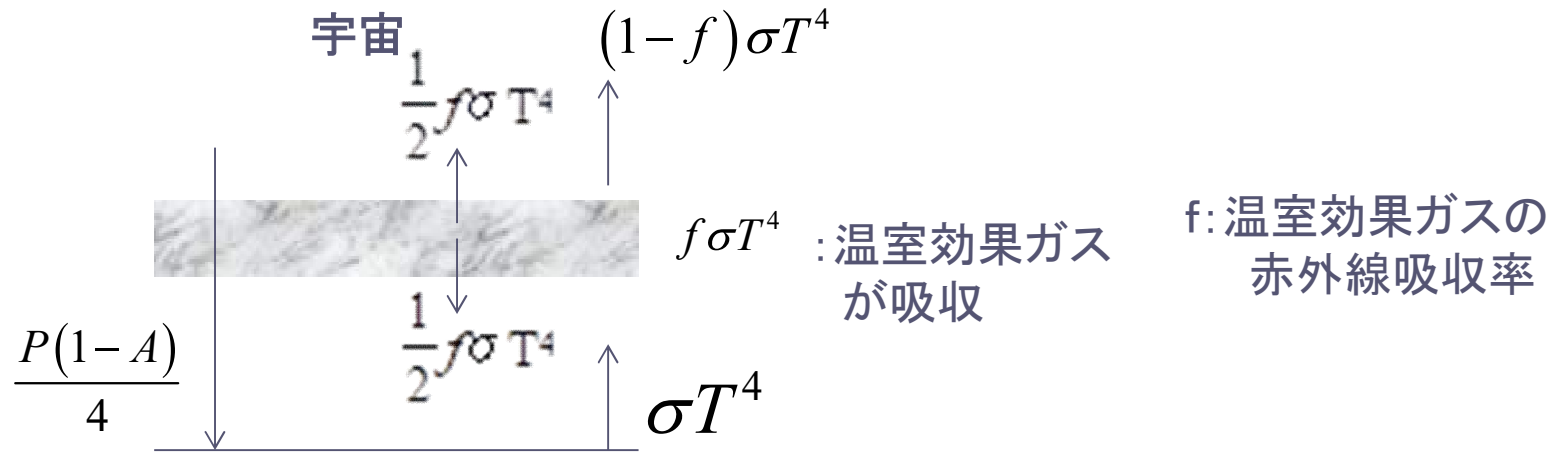
$$\pi R^2 P(1-A) = 4\pi R^2 \epsilon (\sigma T^4) \text{ より}$$

$$T^4 = \frac{P(1-A)}{4\epsilon\sigma}$$

地球の半径 $R \sim 6400\text{km}$ 、太陽の照射パワー
 $P = 1367\text{W/m}^2$ 、地球の全球反射率アルベド $A = 0.3$ 、赤
外線放射の大気圏外への通過率 $\epsilon = 1$ 、 $\sigma = 5.76 \times 10^{-8}\text{W/m}^2\text{K}^4$ より $T = 253\text{K} = -18^\circ\text{C}$

(温暖化ガスが増加すると ϵ が小さくなる。 $\epsilon = 0.61$ (現在の
値)で 15°C 、 $\epsilon = 0.58$ で 19°C)

簡単な温室効果モデル



地表

単位面積当たりのエネルギーバランスの式

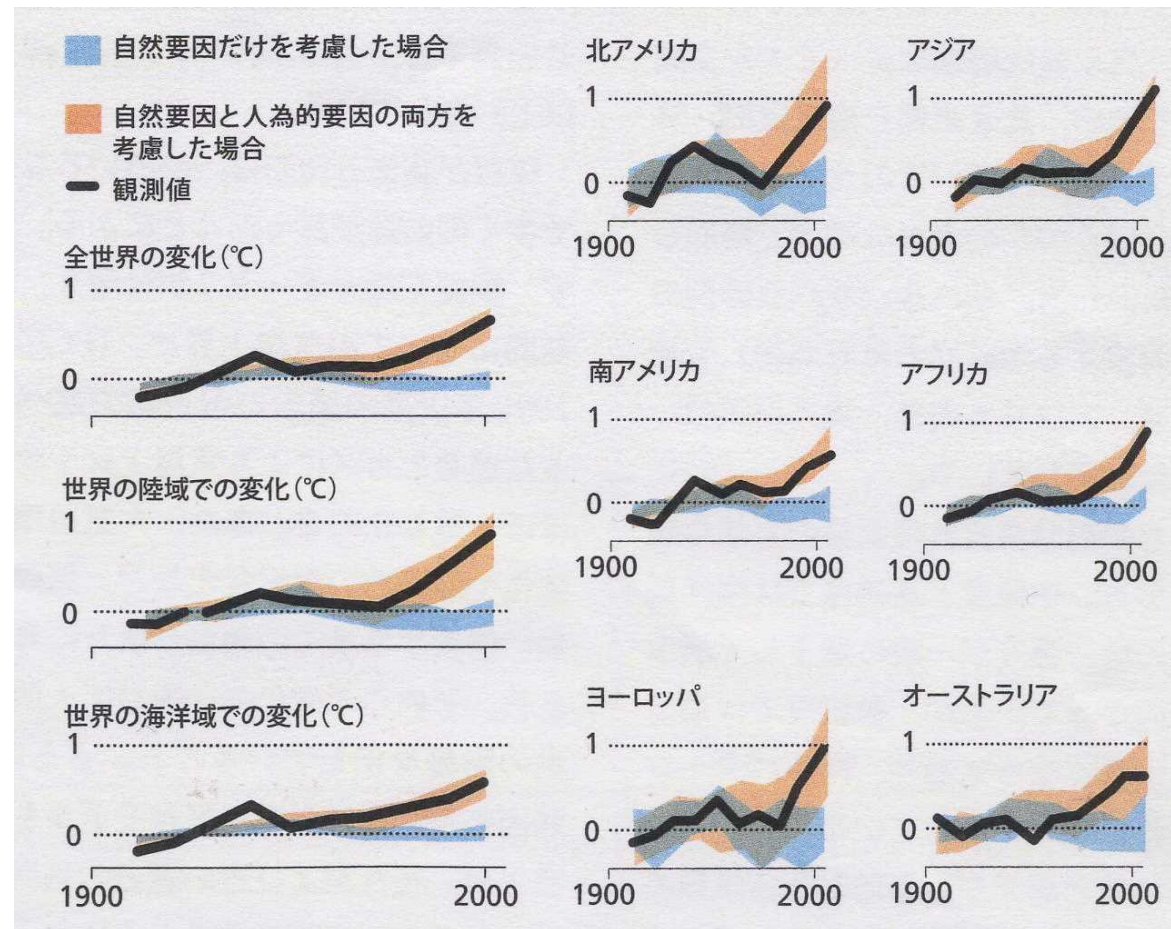
$$\frac{P(1-A)}{4} = (1-f)\sigma T^4 + \frac{1}{2}f\sigma T^4 = \left(1 - \frac{f}{2}\right)\sigma T^4$$

$$\therefore T = \left(\frac{P(1-A)}{4\sigma \left(1 - \frac{f}{2}\right)} \right)^{\frac{1}{4}}$$

参考

$$\varepsilon = 1 - \frac{f}{2}$$

20世紀半ば以降の温暖化が過去の気候変動と違い、人為的要因によると考える根拠



(出展: 日経サイエンス2007. 10)

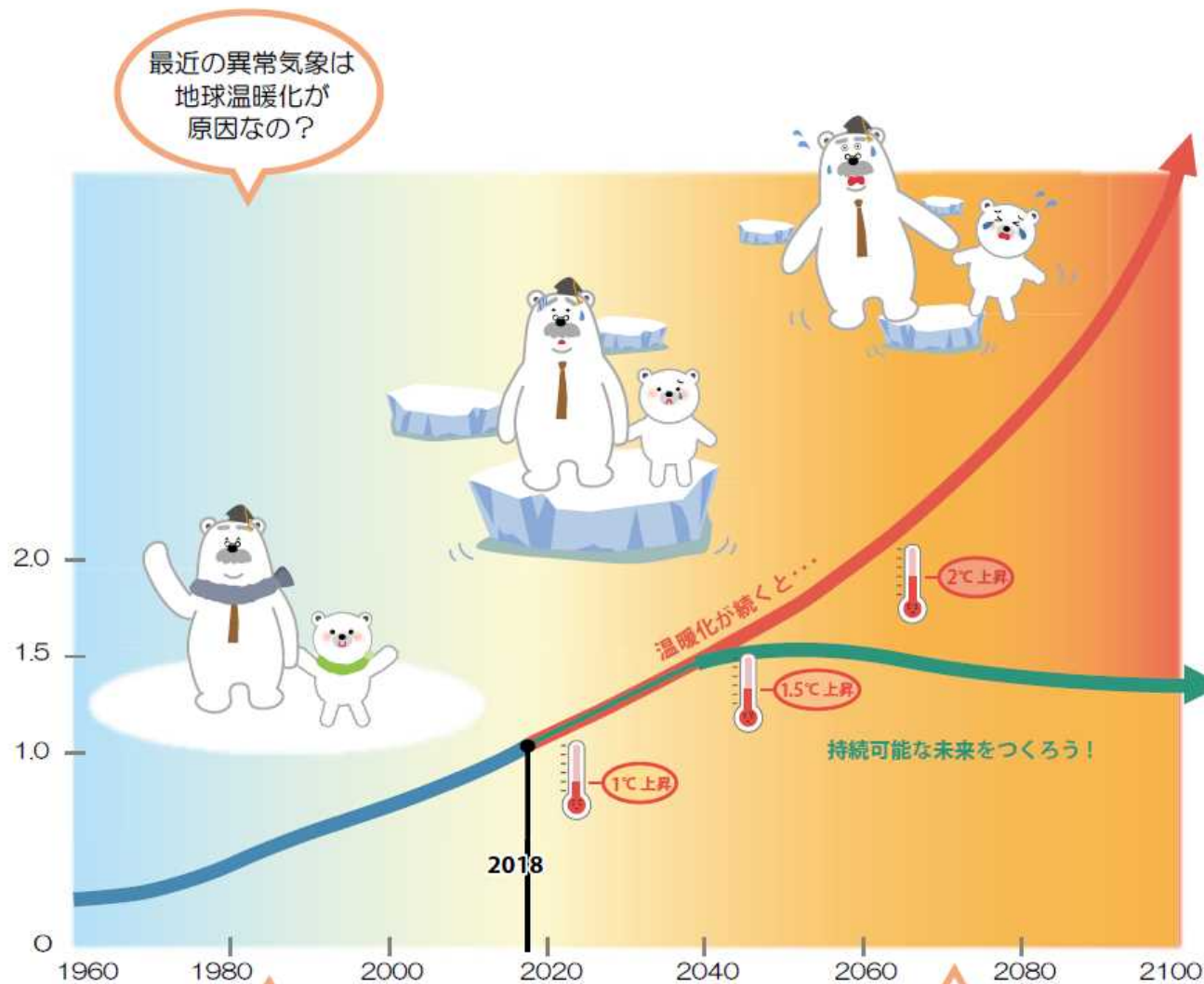
気温の実測値は人為的要因と自然要因を含めたシミュレーション結果とよく一致



本日の内容

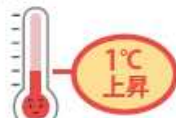
1. ノーベル物理学賞受賞真鍋淑郎氏と副題への回答
 2. 地球温暖化による文明の崩壊(例マヤ文明等の崩壊)
 3. 過去の気候変動等
 - 4. 地球温暖化に関する見解**
 5. 対応策と緩和策
- 

工業化（1750年頃）以降の気温上昇 °C



工業化以降の気温上昇は1°C、2015年12月に合意したパリ協定では気温上昇を2°Cより十分低く(1.5°C以下)にすること、そのためには21世紀後半には温室効果ガスの実質的排出量をゼロにする目標を立てた。何故か？

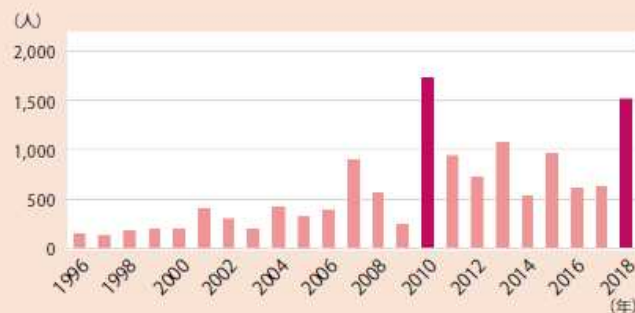
工業化(1750年頃)
前に比べて



今、**日本**ではどんな影響が出ているの？

■ 暑熱による死亡リスク、熱中症

- ・熱中症搬送者数や死亡者数が増加傾向。救急搬送者のうち65歳以上の高齢者が半数近くを占める。
- ・死亡者の多かった2010年と2018年は記録的な高温の日が続いた。



熱中症死者数 注:2018年は概数
出典:厚生労働省 人口動態統計より作成

■ 自然生態系

- ・野生生物の分布の変化



ニホンライチョウの生息域減少
写真:環境省HP



東京湾に南方系魚類(チョウチョウウオ)
出典:環境省HP 串本海域公園 串本海中公園

日本固有の動植物が減って、日本にはいないはずの動植物が定着しているのじゃ。



- ・サンゴの白化現象



一度白化すると自然に元に戻ることはないのじゃ。



サンゴの白化
出典:環境省

■ 農業

- ・水稻:高温による品質の低下



身近な食べ物に
影響が出ているのじゃ。

白未熟粒は
芯のデンプンが
少ない



正常粒は
芯までデンプンが
たっぷり

白未熟粒(左)と正常粒(右)の断面

出典:農林水産省 平成29年地球温暖化影響調査レポート(2018)

- ・果樹:りんごやぶどうの着色不良、うんしゅうみかんの浮皮や日焼け、日本なしの発芽不良などの発生



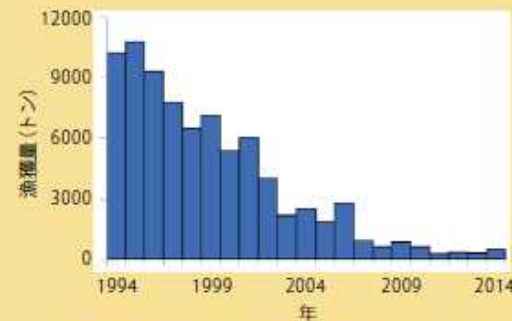
色付きが良くない

高温によるりんごの着色不良

出典:農林水産省 平成26年地球温暖化影響調査レポート(2015)

■ 水産業

- ・日本海でブリ、サワラの漁獲量増加の一方、スルメイカ減少



スルメイカ

日本海沿岸における8~11月のスルメイカ漁獲量の変化

※漁獲量の変化には、地球温暖化以外の要因も考えられる

出典:農林水産省 気候変動適応計画(概要)(2015)

■北極海の海氷が減少

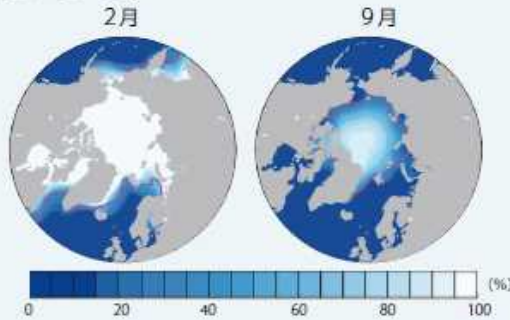
- ・気温上昇により海氷面積が減少
→ホッキョクグマやアザラシなどの生息地がなくなるといった生態系への影響が出ている。

仲間のすみかが
減って困っているんだ。



- ・近年は春季から夏季にかけて海氷が急激に減少し、海氷全体が薄くなっている。

2012年9月に
海氷面積の最小を
記録したのじゃ。



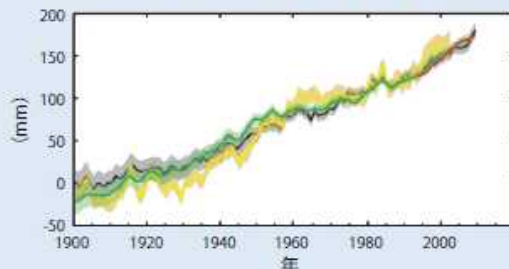
1986～2005年の海氷面積平均分布図(2月と9月)

出典:IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会 第12章(2013)

■海面水位上昇

- ・国土消失の危機
→特に小さな島に住む人々は上昇する水位に脅かされている。

このまま上昇が
続いたら大変だ



世界平均海面水位の変化

いくつかのデータセットを1993年で同じ値になるように表示。陰影は不確実性の幅。
出典:IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会 政策決定者向け要約(2013)

■極端現象、災害

- ・降雨パターンの変動
- ・水害、森林火災、ハリケーン、熱波の発生数増加や干ばつの長期化による被害が増加



森林火災

出典:環境省HP



タイ国チャオプラヤ川で発生した大洪水による影響

出典:国土交通省 平成23年度国土交通白書(2012)

2019～2020年
オーストラリア
の山火事、3ヶ
月間で約7億
1500万トンの
CO2発生、し
かし、海の植
物性プランク
トンが約95%を
吸収 日経

2021_10_24

■食料

- ・小麦の収量が減少し、世界的な需要増加も影響して、小麦を使った製品の価格が上昇傾向
- ・農作物が育ちにくい地域が拡大

■感染症

- ・蚊を媒介とする感染症(マラリア、デング熱等)が拡大



蚊にとって住みやすい環境が
増えてしまっているんじゃない。

- ・水を媒介とする感染症(コレラ、サルモネラ等)が拡大

水質が悪化して、
安全な飲み水の確保
が難しくなるせいじゃな。



海面上昇

	2°C上昇シナリオによる予測（パリ協定の2°C目標が達成された世界）	4°C上昇シナリオによる予測（現時点を超える追加的な緩和策がとらなかった世界）
日本沿岸の平均海面水位	約0.39m上昇	約0.71m上昇
世界の平均海面水位	約0.39m上昇	約0.71m上昇

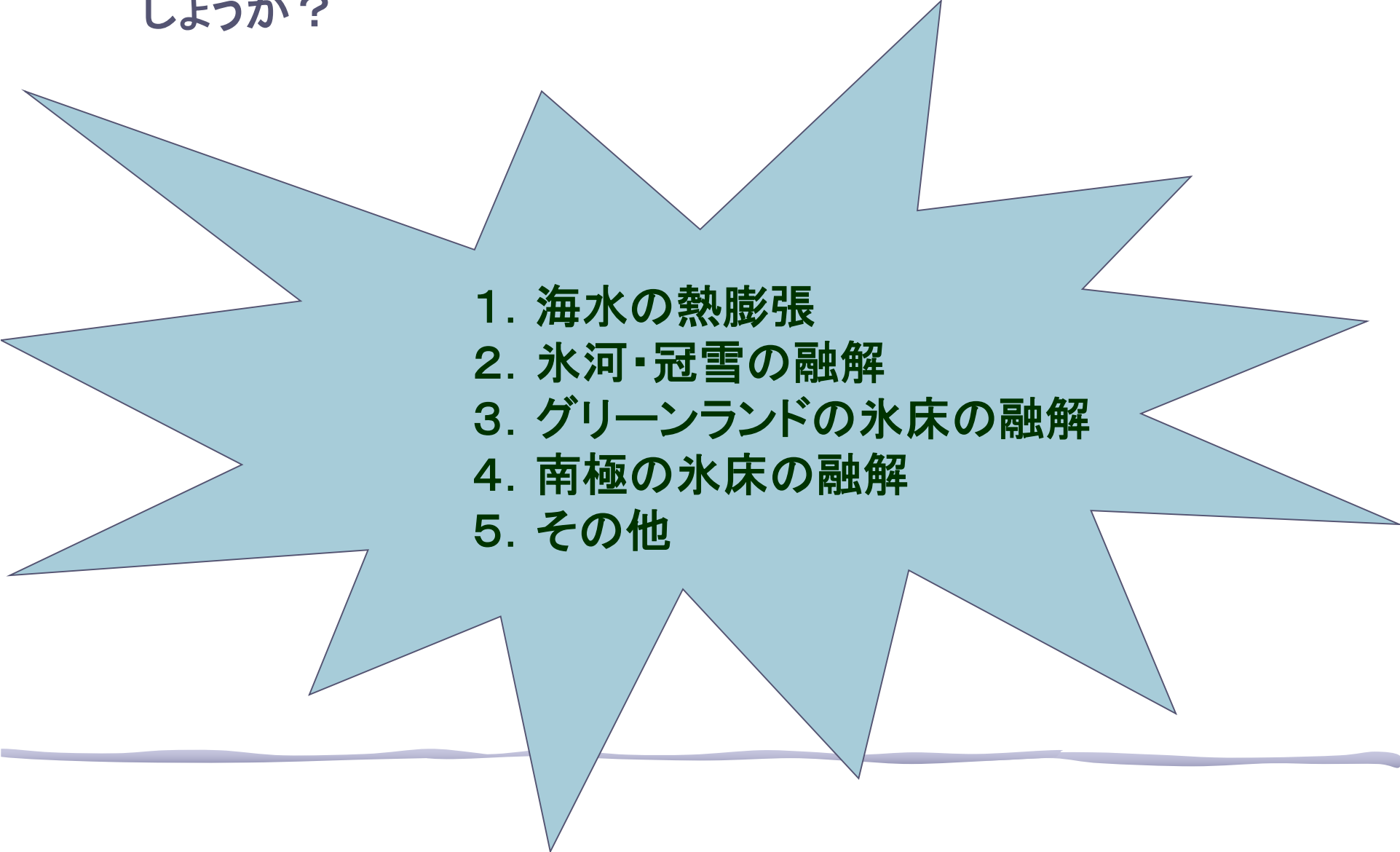
現在までに観測されている変化

- ・日本近海の平均海面水温は、**1900～2019年**の間に、**100年当たり1.14℃**の割合で上昇している。
- ・これは世界平均（**0.55℃/100年**）よりも大きい。一般に、陸地が温まりやすいことや暖流の影響で、大陸に近い海域は上昇率が大きくなると考えられている。
- ・昇温の度合いは、季節や海域により異なる。

質問

海面上昇

質問: 海面上昇が続いています。その最大の原因はどれでしょうか？

- 
1. 海水の熱膨張
 2. 氷河・冠雪の融解
 3. グリーンランドの氷床の融解
 4. 南極の氷床の融解
 5. その他

海面上昇



1993～2003年の間、
1年間の海面上昇速
度は $3.1 \pm 0.7\text{mm}$ で
あった。

各部の観測内訳

海水熱膨張 1.6 ± 0.5
氷河・冠雪 0.77 ± 0.22
グリーンランドの氷床
 0.21 ± 0.07 南極の氷床
 0.21 ± 0.35 合計
 2.8 ± 0.7

「全国地球温暖化防止活動推進
センターホームページより

(<http://www.jccca.org/>)」

フチフチ島では海面上昇の影響で満潮時には地面が水没する

質問

質問： 12.5万年前の最後の
間氷期は20世紀の平均気温
より3～5℃高く、海面は4～6
m高かった。これはIPCCの予
測と違う。何故か？

IPCC: 2.0-6.1℃,
海面上昇 0.18-0.59m

温暖化による影響の例1

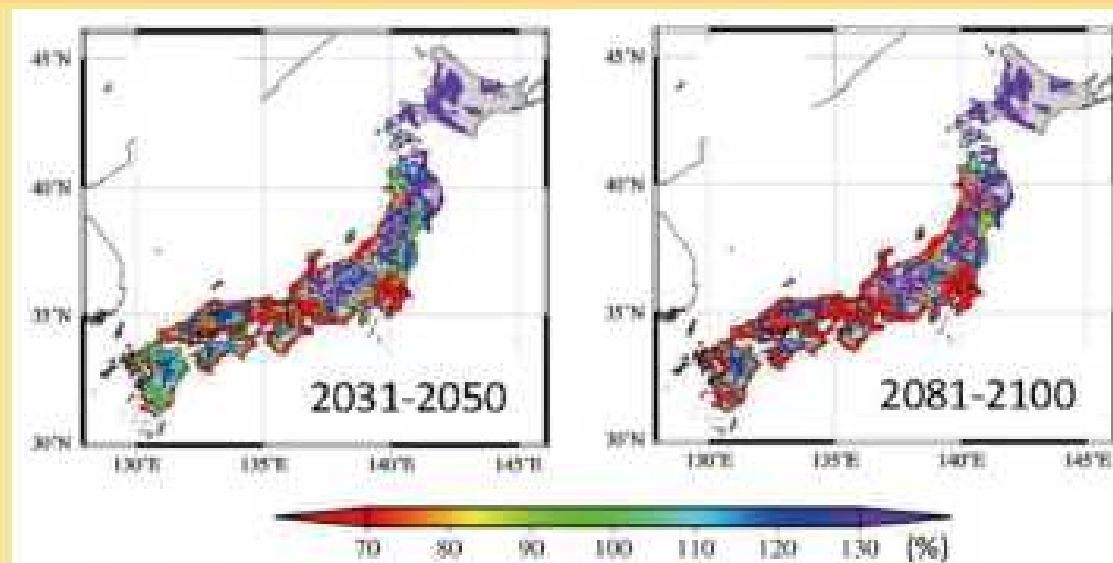
■ 農業

・コメの収量【RCP4.5】

21世紀半ば(2031~2050年)と21世紀末(2081~2100年)

北日本、中部地方以西の中山間地は増加、
関東・北陸以西の平野部は減少

品質の高いコメの収量が、赤色に近いほど少なくなり、紫色に近いほど増える。



品質の高いコメの収量の変化率分布 (適応策をとらない場合の20年平均値で、
1981~2000年平均の値を100とした相対値) 出典: Ishigooka, Y. et al. (2017)

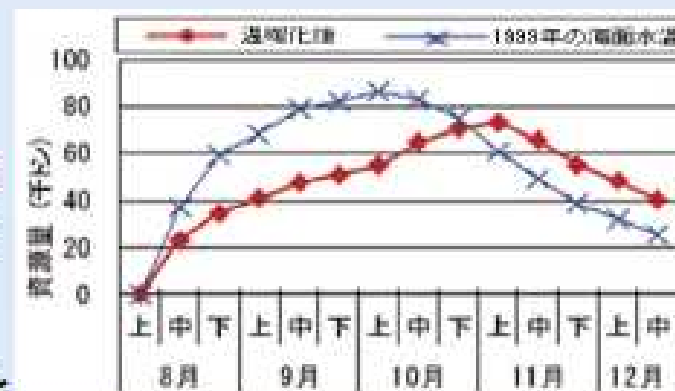
温暖化による影響の例2

■水産業

水温の変化により、漁場や漁期が変化(例:スルメイカ、サンマ)

・サンマの南下の遅れ

道東海域では、温暖化後、サンマの来遊ピークが10月上旬～11月上旬に遅れると予測。



サンマの海域別資源量推定値の変化

(本図は1999年の海面水温データを用いた例)

道東海域来遊資源量

出典:農林水産省農林水産技術会議事務局(2016)を一部改変

■自然生態系

・ライチョウ

年平均気温が3℃上昇した場合、御嶽山と乗鞍岳では絶滅、南アルプスでも絶滅に近い状態になる。

・サンゴ

海水温の上昇と海洋酸性化で、熱帯・亜熱帯サンゴ礁は2030年以降、日本近海から消滅する。

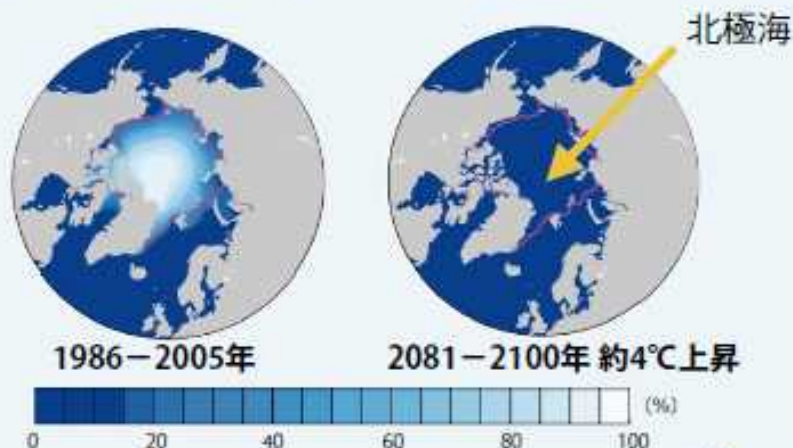
温暖化による影響の例3

■北極海の夏の海氷

温暖化とともに北極海の海氷面積が縮小し厚さが薄くなり続ける可能性が非常に高い。

【1.5℃】100年に1回程度、夏に海氷が消失する(H)。

【2℃】少なくとも10年に1回、夏に海氷が消失する(H)。



海氷面積分布図(9月)※CMIP5による

出典:IPCC 第5次評価報告書 第1作業部会 第12章 (2013)

シロクマの危機じゃ



■洪水

主要河川の洪水の影響を受ける割合は、温暖化とともに増加する。

洪水の影響を受ける人口は、1976-2005年を基準として、

【1.5℃】100%増加(M)。

【2℃】170%増加(M)。

今よりかなり洪水が増えるぞ



■食料

20世紀末の水準より4℃以上上昇すると、食料需要の増大と組み合わせ、世界的、地域的な食料安全保障に大きなリスクがもたらされうる(H)。そのリスクは低緯度地域でより大きい。

【1.5℃】2℃に比べ、サハラ以南、東南アジア、ラテンアメリカで、穀物の減収と質の低下を抑えられる(H)。

【2℃】1.5℃に比べ、サヘル、アフリカ南部、地中海、中央ヨーロッパ、アマゾンで食料の入手可能性がより減少(M)。

VH:確信度が非常に高い H:確信度が高い M:確信度が中程度



本日の内容

1. 一ベル物理学賞受賞真鍋淑郎氏と副題への回答
 2. 地球温暖化による文明の崩壊(例マヤ文明等の崩壊)
 3. 過去の気候変動等
 4. 地球温暖化に関する見解
 - 5. 対応策と緩和策**
- 

対応策と緩和策1



どれだけ影響を受けるかは、たとえば大雨や高温などの現象に加え、どれだけの防災設備があるか、高齢者などの弱者がいるかといった要素や、どれだけの人や建物があるかといったさまざまな要素がからみあって決まる。

ダメージを受けんようにするためには、**危害に耐える力をつけること、危害を回避すること**、どちらも重要なことじゃ。



例えば：
大雨、洪水
高温、熱波

- 河川、砂防、下水道などの整備により河川の氾濫や土砂災害を防ぐ。
- 災害リスクの高い地域を提示する。
- 警戒情報で早めに避難する。

- 水分・塩分補給で熱中症を防ぐ。
- エアコンやクールスポットを設置する。



こまめに水分補給したり、エアコンを適切に使い熱中症予防をする。



温暖化で強くなった危害の影響を受けないようにするのが**適応策**なんだね。



温暖化を利用する**適応策**もあるぞ

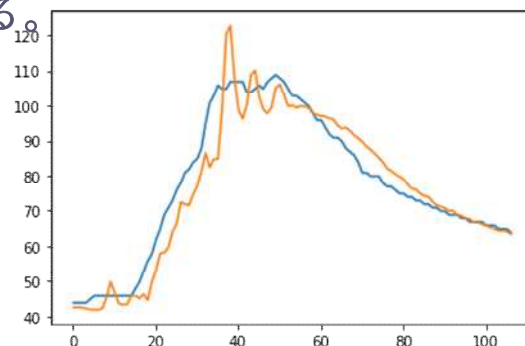


タロッコ

出典：農林水産省 平成 25 年
地球温暖化影響調査レポート(2014)

たとえば、愛媛県では、うんしゅうみかんの高温障害の多発を受けて、夏場の高温に強いブラッドオレンジの一つ「タロッコ」を導入し、産地化を進めているところじゃ。

河川の氾濫を予測し、早めに避難することも有意義と考えている



茅野市上川の銭場観測地点の水位の60分前予測値と実測値、青は実測、だいたい予測、横軸は時間(分)、縦軸は水位(cm)、公立諏訪東京理科大

環境省パンフ

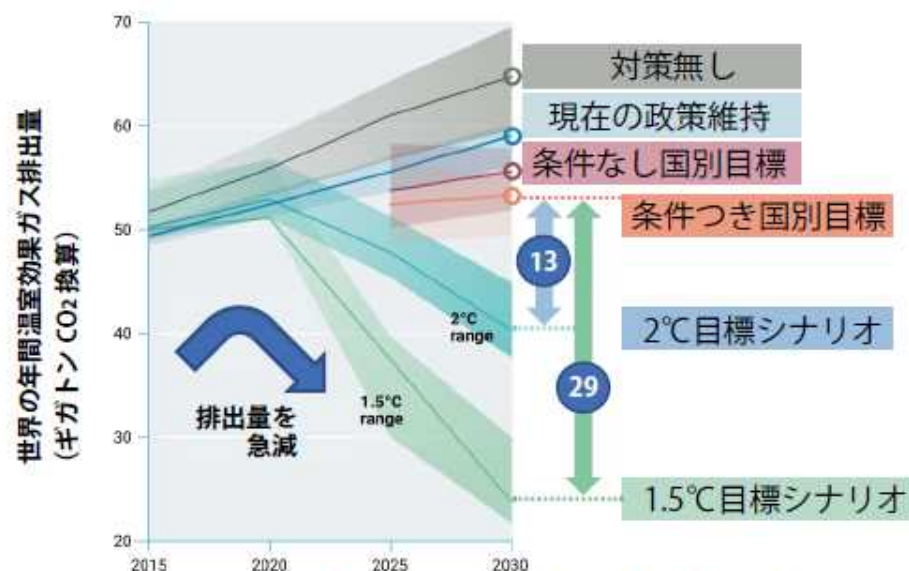
対応策と緩和策2

緩和策

温室効果ガス(主にCO₂)の排出削減と吸収



★ 温暖化を1.5℃あるいは2℃に抑えるには、温室効果ガスの排出量を大きく減らさなければならないじゃ。
★ 2020年に始動するパリ協定で、各国はそれぞれ2030年までの削減目標を提出するんじゃが、すべての国が目標を達成したとしても、2℃目標には13ギガトン、1.5℃目標には29ギガトンも削減が足りん。
世界中の努力と多くの分野での急速な変革が必要じゃ。



1.5℃、2℃目標シナリオと国別目標とのギャップ

出典：国連環境計画 2018 年排出ギャップ報告書 (2018)

ぼくたちはどうすればいいの？



CO₂の排出を減らして
吸収量を増やすんじゃ



できること、いろいろあるね



すべての1.5℃経路でCDRが利用される

- オーバーシュートしないまたは限られたオーバーシュートを伴って地球温暖化を1.5℃に抑える全ての[排出]経路は、二酸化炭素除去(CDR)を利用すると予測する。
- CDRは、残存する排出量の相殺に使われ、ほとんどの場合、気温がピークに至ったのち地球温暖化を1.5℃に戻すために正味の負の排出量を実現するだろう(確信度が高い)。

(IPCC SR1.5 SPM C3.)

- 既存の及び潜在的なCDR手法には、再植林及び新規植林、土地再生及び土壌炭素貯留、BECCS、炭素直接空気回収・貯留(DACCS)、風化作用の強化、並びに海洋のアルカリ化が含まれる。これらは、成熟度、潜在的可能性(ポテンシャル)、費用、リスク、副次的便益(コベネフィット)及びトレードオフの面で大きく異なる(確信度が高い)。
- 今日までに、植林及びBECCS以外のCDR手法を含む経路について書かれた文献は限られている。

(IPCC SR1.5 SPM C3.1.)

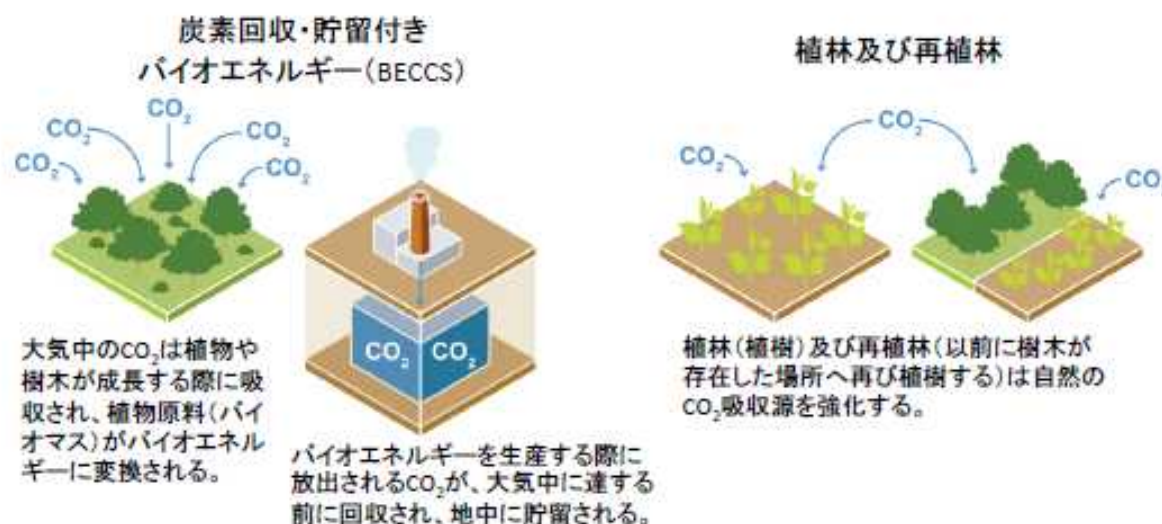


図 一部のCDR/負の排出技術及び経路の例

CDRとは(再掲)

- CO₂を大気から除去し、地下、陸域もしくは海域の貯留層(リザーバ)または製品中に永久的に貯留する、人為的な活動。既存の及び潜在的な生物学的または地球化学的吸収源の人為的な強化、並びに直接空気回収・貯留も含むが、人為的な活動が直接的な原因にならない自然のCO₂の吸収は含まない。

(IPCC SR1.5 SPM Box.1)

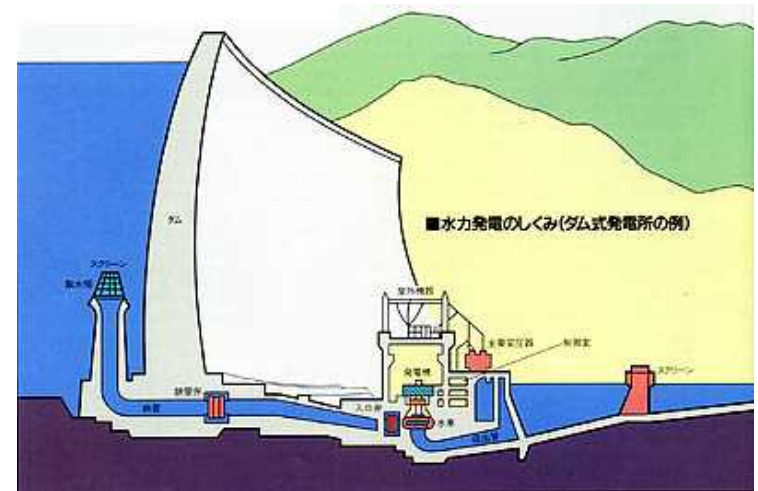
CO₂を出さない再生可能な電力への転換



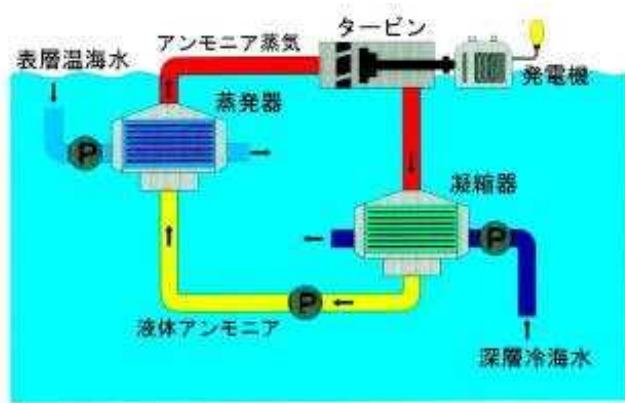
風力発電



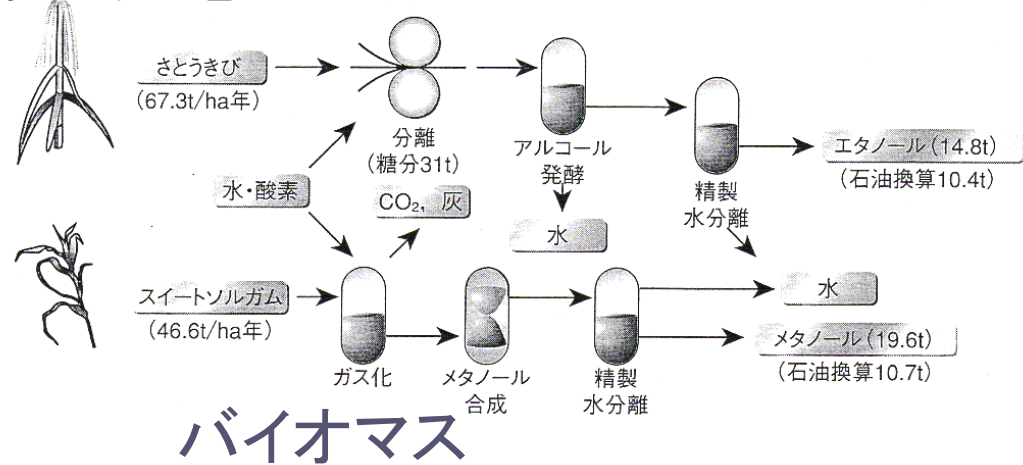
太陽光発電



水力発電



海洋温度差発電



バイオマス

世界の再生可能エネルギー源

Table 1.3 Estimates of global renewable energy resources (at the surface of the earth)

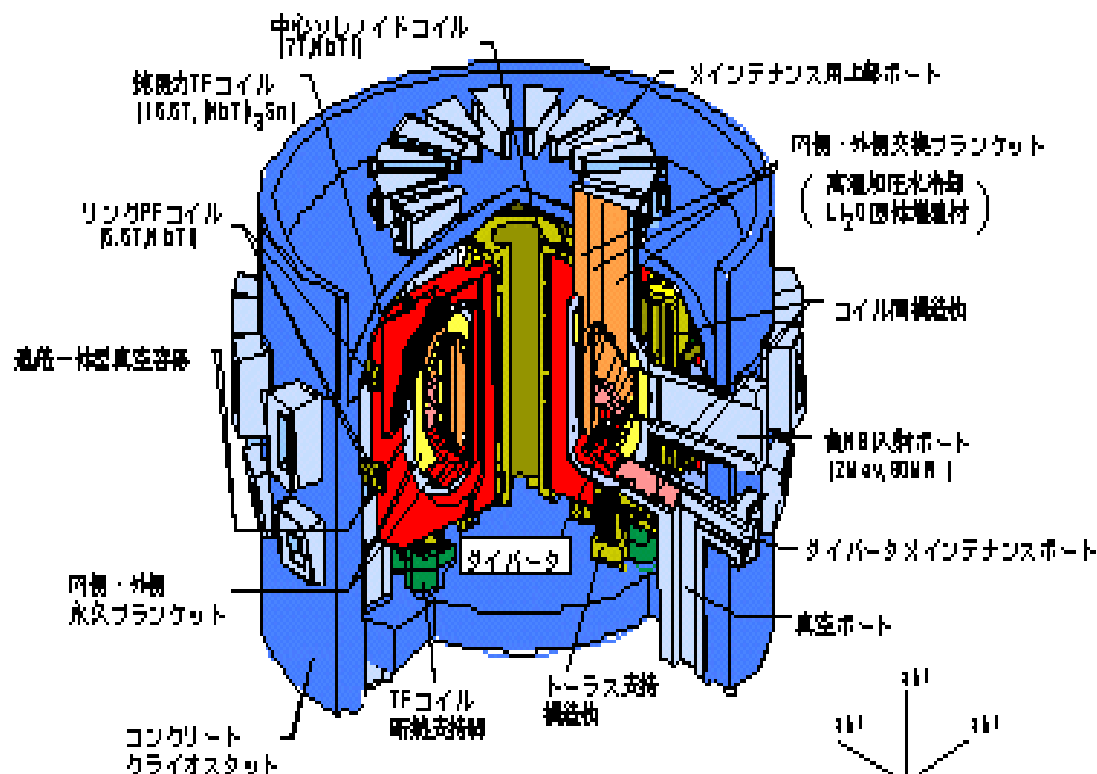
<i>Resources</i>	<i>Estimated as recoverable</i>	<i>Resource base</i>
Solar radiation	1000 TW	90 000 TW
Wind	10 TW	1200 TW
Wave	0.5 TW	3 TW
Tides	0.1 TW	30 TW
Geothermal flow	–	30 TW
Biomass standing crop	–	450 TW years
Geothermal heat stored	>50 TW years	10^{11} TW years
Kinetic energy stored in atmospheric and oceanic circulation	–	32 TW years

Note: As these energy resources are renewable, they are described in terms of energy flow (i.e. power) in terawatts (TW), except for the standing crop of biomass, and geothermal and kinetic energy stored, which are described in terawatt years, (1 TW year = 3.16×10^{19} joules).

(Source: based on Sørensen, 1991)

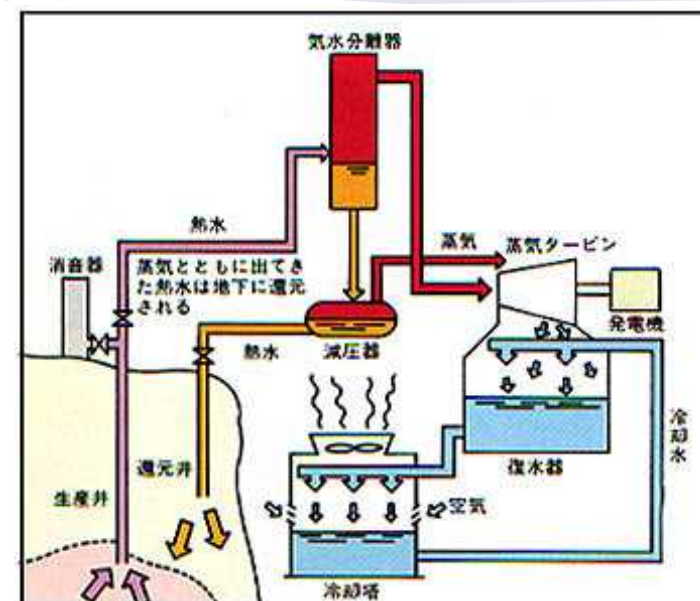
2025年のエネルギー消費予測: 640 EJ/年 $1 \text{ EJ} = 10^{18} \text{ J}$

CO2排出量が少ない太陽エネルギー以外のエネルギー源の例

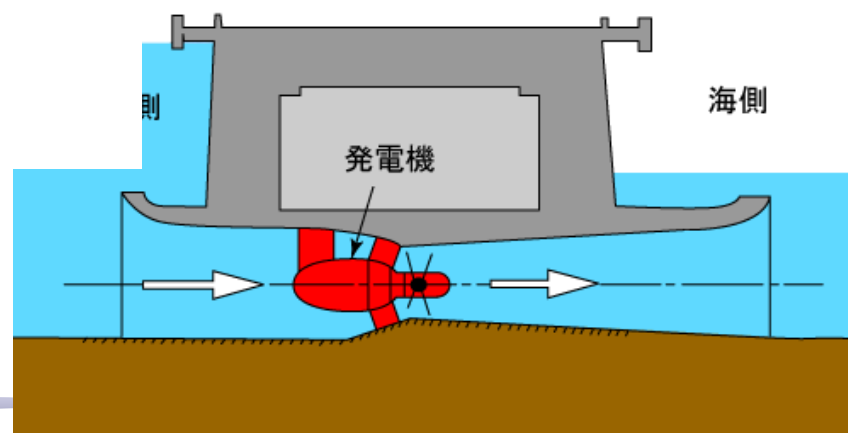


SSTRの鳥瞰図

核融合発電

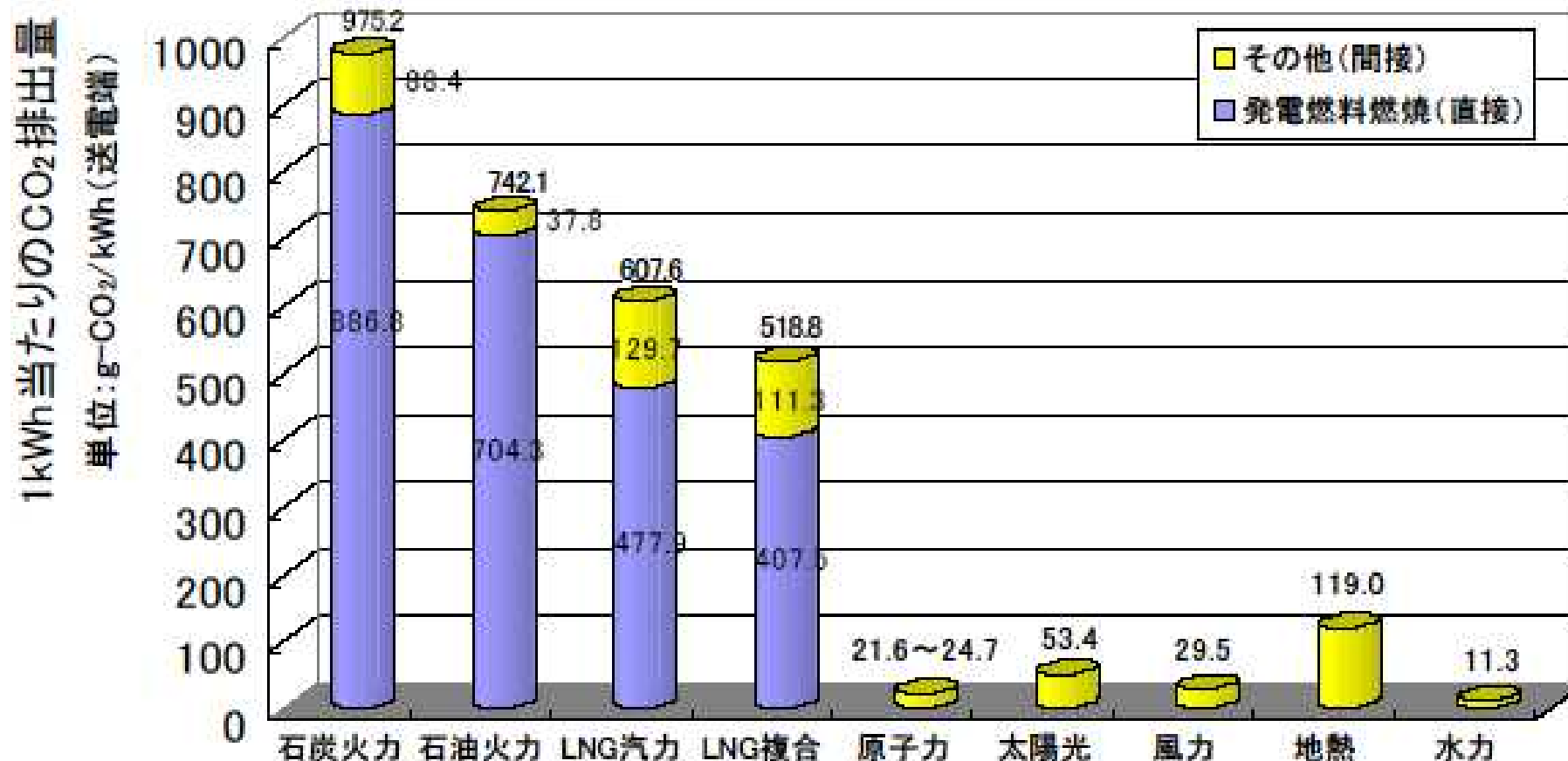


地熱発電



潮汐発電

各種電源の二酸化炭素排出原単位





終わりの言葉

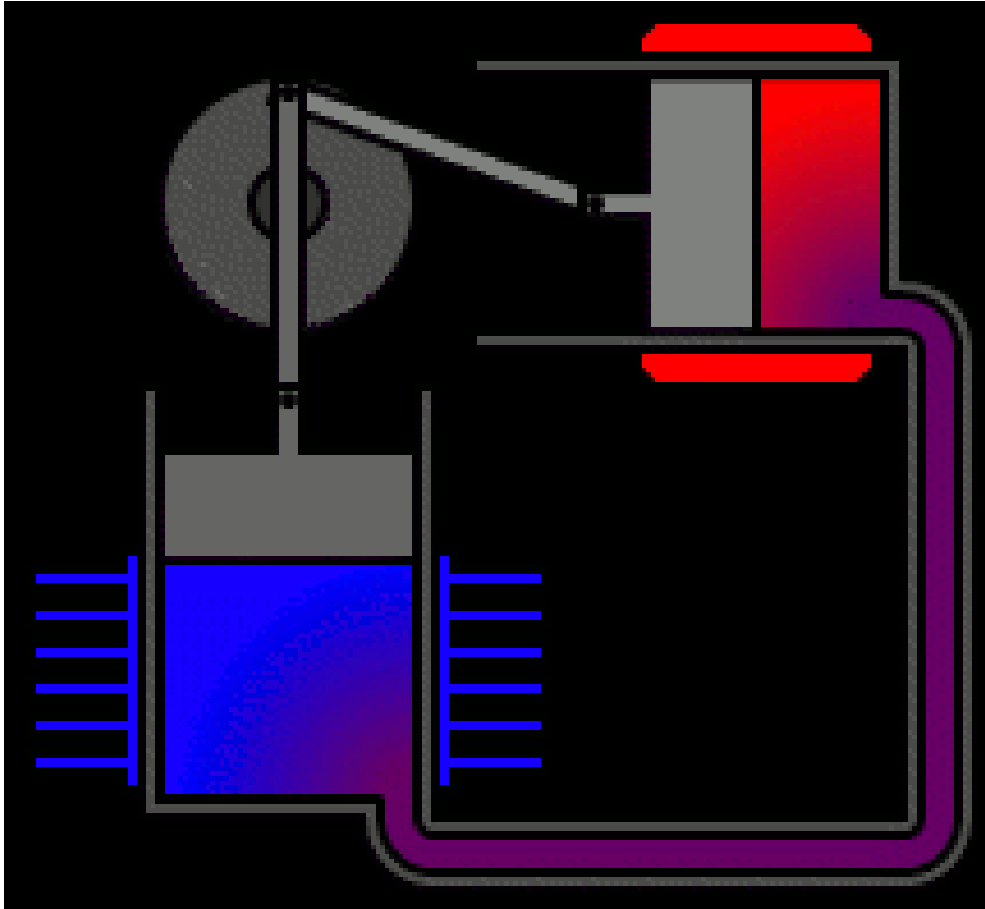
温暖化を克服し、持続可能社会へ移行しなければ人類文明が危機にさらされます。

持続可能な社会への道は一つではありません。どのような道を選ぶかは我々皆が今後、選択することになります。

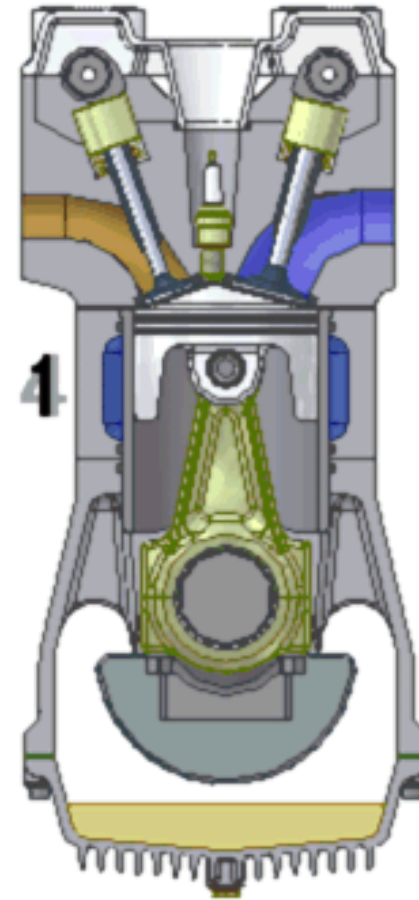
本講座がその選択の基盤となる知識を少しでも提供できたとしたら幸いです。



スターリングエンジンはエンジンの中で最も効率が良くと期待されているが、実用化はほとんどされていないまだである。



スターリングエンジン(外燃機関)



内燃機関

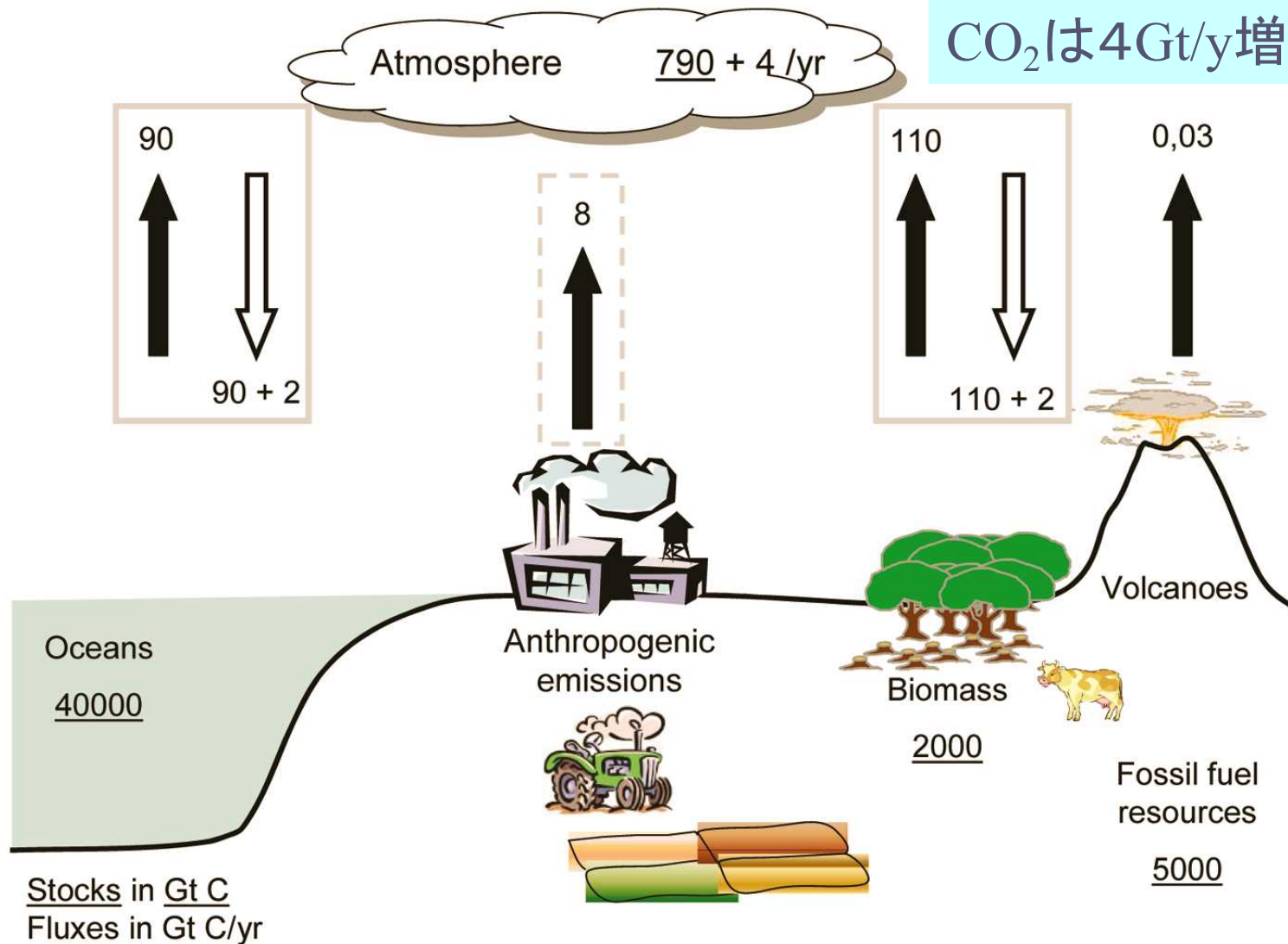
from Wikipedia

地球における炭素サイクル

(二酸化炭素の流れと貯留, 2005)

地球の平均気温

CO₂は4Gt/y増加中



From 「Sustainable Energy Technologies」

Edited by K. HANJALIĆ, R. VAN DE KROL and A. LEKIĆ

温暖化による影響の例4

■ 海面水位上昇



【1.5℃】2100年までの海面水位上昇は0.26~0.77mと予測され(M)、2℃の場合に比べると約0.1m低く(M)、リスク人口を最大1000万人減少できる(M)。

【1.5~2℃】南極氷床の不安定化、グリーンランド氷床の不可逆的消失が引き起こされる可能性がある。そうなれば、数百~数千年にわたり海面水位が数m上昇する。

VH:確信度が非常に高い H:確信度が高い M:確信度が中程度

■ 生態系

温暖化により海洋生物種の世界規模の分布が変化。影響されやすい海域では生物多様性が低減(H)。多くの生物種は、中~高の気候の変化速度で生息に適切な気候を追従できないだろう(M)。

【1.5℃】サンゴ礁の70~90%が減少(H)。

昆虫の6%、植物の8%、脊椎動物の4%が生息域の半分以上を失う。

【2℃】サンゴ礁の99%以上が消失(VH)。

海の生態系の不可逆的消失リスクが大きくなる(H)。昆虫の18%、植物の16%、脊椎動物の8%が生息域の半分以上を失う。

CO₂回収と貯蔵

CO₂回収

排ガスからのCO₂回収・・・モノエタノールアミンと結合させ、後で回収する(1例)

CO₂の封じ込め・・・地中や深海に封じ込める(環境への影響が問題?)

発電所でCO₂を分離・回収するコスト・・・現行の50－100%、電気料金の30－50%

参考：発電所のSO_x、NO_x対策費1kWh当たり0.1-0.6円

D5. 1.5℃の地球温暖化によるリスクを抑制するシステムの移行

イノベーションの強化によるシステムの移行

- 1.5℃の地球温暖化に適応し、その水準に抑えることに整合するシステム移行には、新規の、場合によっては[現行と根幹から異なる]破壊的な技術・慣行、及び気候変動によるイノベーション※の強化を、幅広く採用することが含まれる。これらは、産業部門及び金融部門を含む技術イノベーションの能力の強化を意味する。
- 国レベルのイノベーション政策及び国際協力の両方が、緩和及び適応の技術の開発、商業化、並びに幅広い導入に貢献しうる。イノベーション政策は、研究開発への公的支援と技術を普及させるためのインセンティブを与えるポリシーミックスと組み合わせたものの方が、効果的かもしれない。
(確信度が高い)

(IPCC SR1.5 SPM D5.5.)

※ SR1.5 第4章 4.4.4.3(370頁)では、政府が実施しうる気候変動への対処を目的としたイノベーション政策(“mission-driven” innovation policies)として、研究開発補助金等による技術提供、エネルギー効率規制等による需要創出、既存支援の撤廃が示されている。

表. 汎用技術による1.5℃と関連した技術イノベーションの例

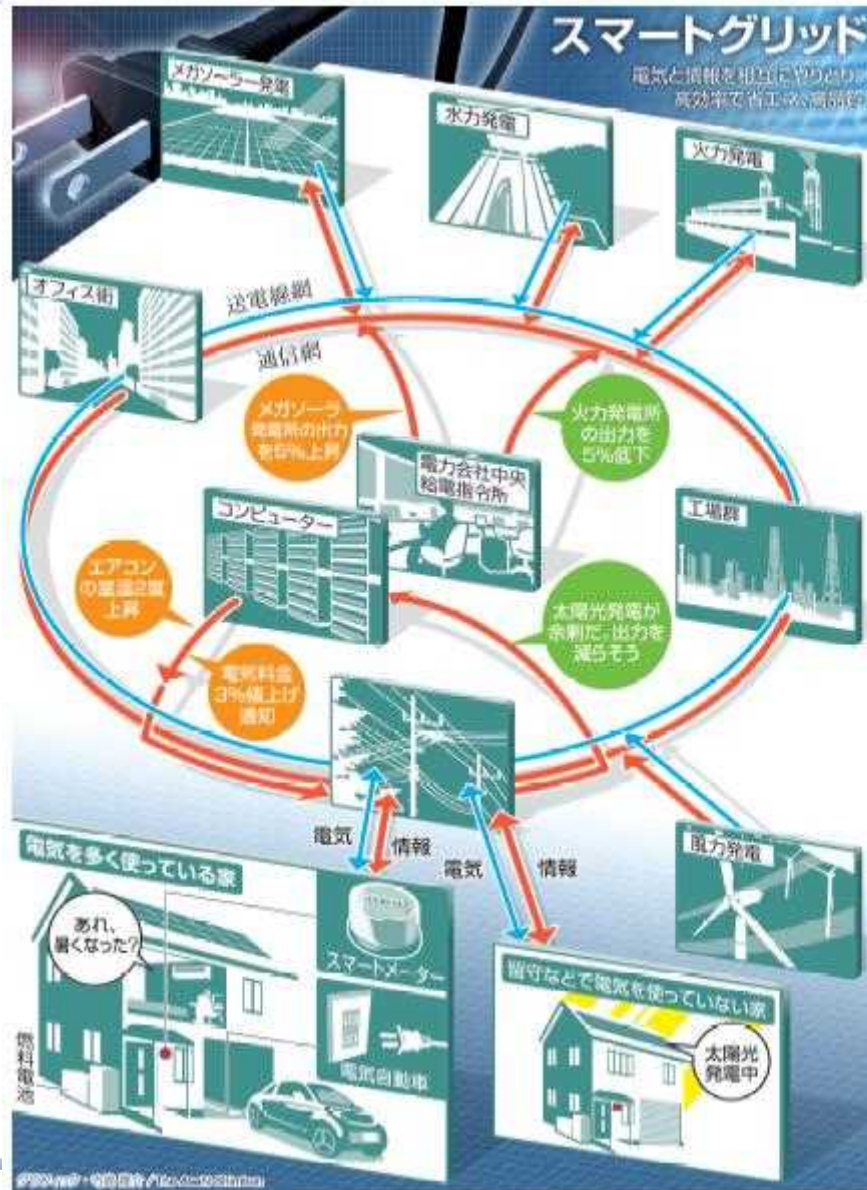
分野	緩和／適応における技術イノベーションの例
建築	物流・倉庫・商店におけるエネルギー及びCO ₂ 効率の向上、スマートな照明及び空調
産業	プロセスの最適化によるエネルギー効率の向上、バイオプラスチック、バイオマス由来の新材料
輸送	電気自動車、カーシェアリング、自動化、物流の最適化、高架線を利用した電気トラック、バイオディーゼル、CCS付きの第2世代バイオエタノール、教育・医療などの遠隔サービスによる輸送需要の低下、航空機の軽量化によるエネルギー消費の削減
電力	太陽光発電、断続的な再生可能エネルギーに柔軟性を与えるスマートグリッド、プラズマ閉じ込めによる核融合
農業	精密農業(エネルギー・資源効率の向上、施肥量の削減)、家畜へのメタン排出阻害剤(ワクチン)の投与、光合成の改良やゲノム編集
減災・適応	ユーザーが持つ情報と組み合わせた天気予報や早期警戒システム、ICTによる気候リスクの低減、災害による損害の早期評価

※ 上記の例は1.5℃と関連した技術イノベーションを網羅的に示したものではない。

IPCC SR1.5 370頁 第4章 表4.9.より作成

スマートグリッド(ICTを適用)による省エネ・再生可能エネルギー源の導入拡大

送配電



スマートグリッド:人工知能や通信機能を搭載した計測機器等を設置して電力需給を自動的に調整する機能を持たせることにより、電力供給を最適化できるようにした電力網のこと。

技術目標(朝日新聞2010.4.7)

1. スマートメータによる効率化
2. 電力系統の安定化
3. 料金調整による省エネ
4. 太陽光・風力などの利用拡大
5. 電力貯蔵
6. 次世代送電網対応の荷電導入

<https://aspara.asahi.com/blog/science/entry/riBaW9JEcd> より

海面上昇の影響

我が国における影響(1m 上昇時)
(平成9年度環境白書)

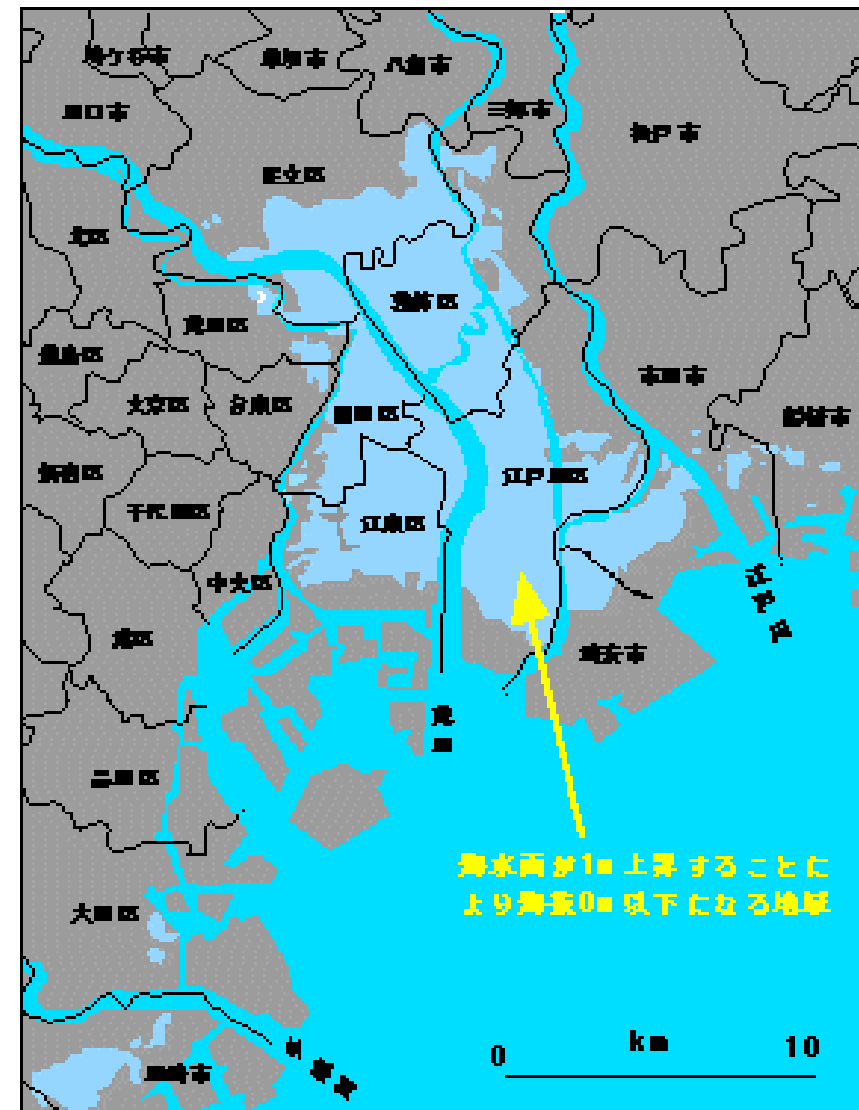
- ・ 現存する砂浜の90%が消失
- ・ 満潮位以下の国土が増加
現在: 861km^2 ,
上昇後: 2339km^2
- ・ 沿岸港湾対策費用~12兆円

海外での影響 (1m 上昇時)

(国立環境研究所,

Databook of Sea-Level Rise(1996))

- ・ 中国: 35000km^2 に影響
- ・ インド: 経済的損失~712億ドル



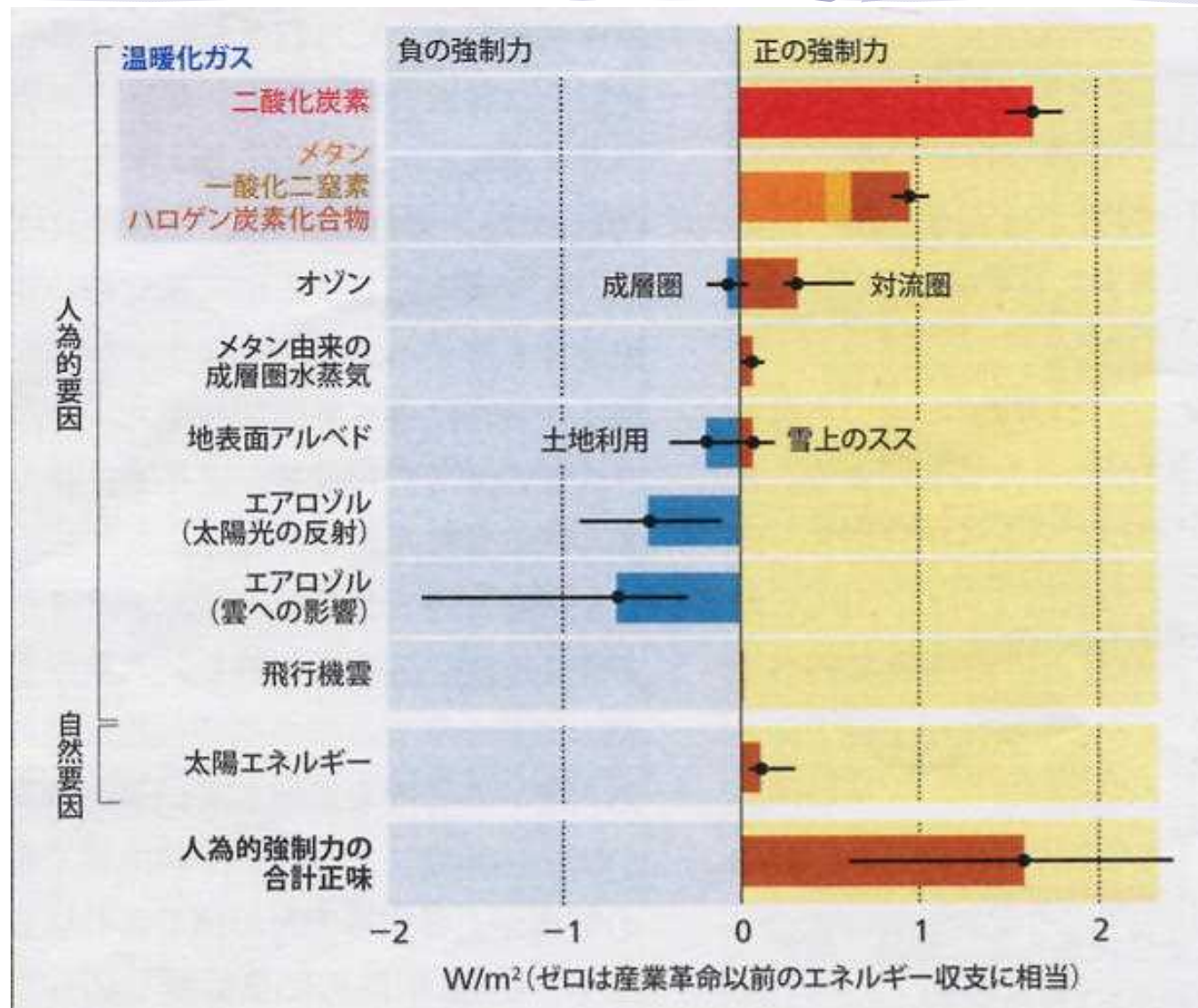
千葉県に出現したシナハマダラカ(マラリアを媒介)



「全国地球温暖化防止活動推進センターホームページより (<http://www.jccca.org/>)」

放射強制力

地球温暖化に影響を与える要因



参考:放射強制力とは、気候学における用語で、地球に出入りするエネルギーが地球の気候に対して持つ放射の大きさのこと。

正の放射強制力は温暖化、負の放射強制力は寒冷化を起こす。

(出展:日経サイエンス2007. 10)

人為的要因が自然要因を大きく上回っている

冠雪面積の縮小

ヒマラヤ氷河の後退(1978と2004)



放射強制力変化量 ΔF と温度変化量 ΔT の関係

CO₂濃度が変化 $\rightarrow$ 赤外線吸収率が変化 $\rightarrow$ 温度が変化

$$\frac{P(1-A)}{4} = \left(1 - \frac{f + \Delta f}{2}\right) \sigma (T + \Delta T)^4$$

$$\therefore \frac{\Delta f}{2} \sigma T^4 = 4 \left(1 - \frac{f}{2}\right) \sigma T^3 \Delta T$$

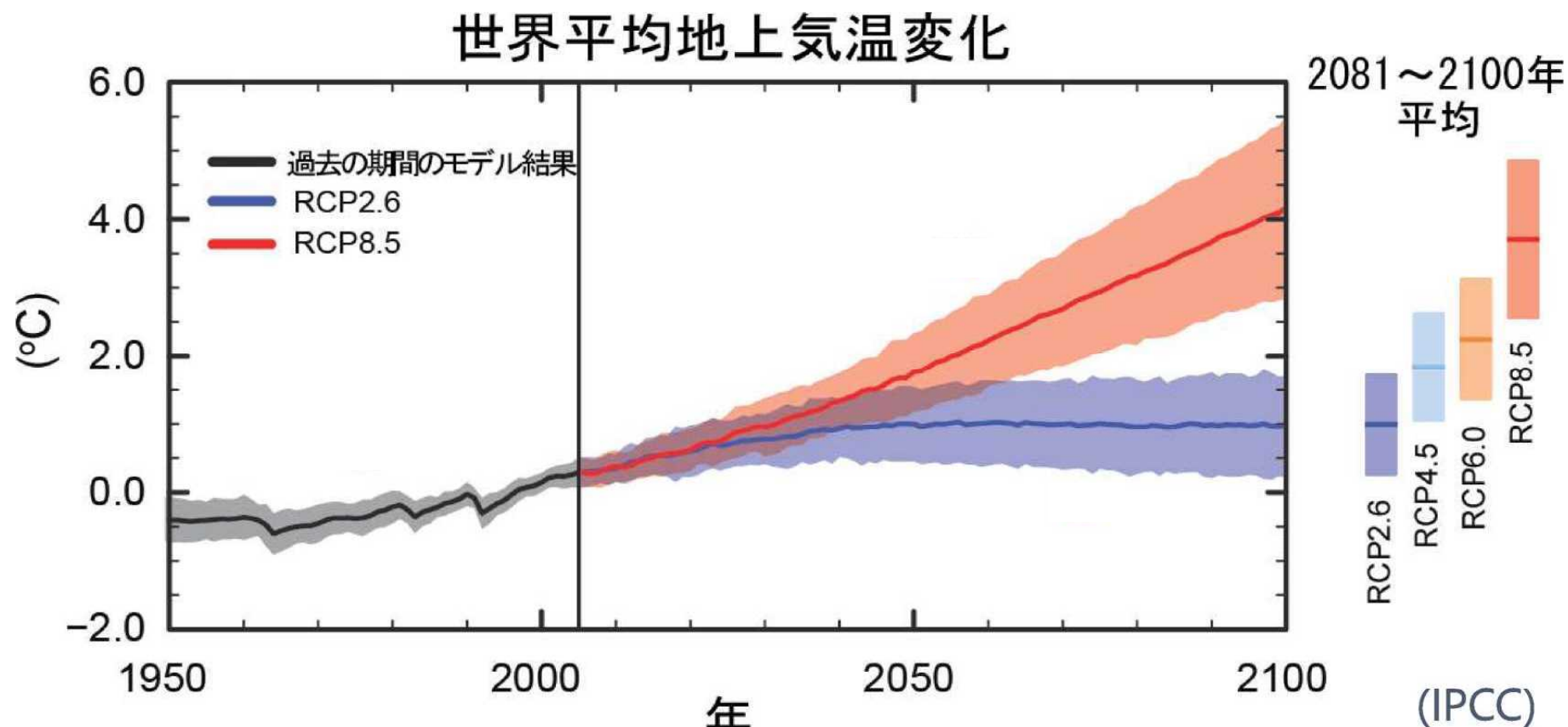
ここで、放射強制力変化量を ΔF を次式で定義

$$\Delta F = \frac{\Delta f}{2} \sigma T^4$$

$$\Delta T = \frac{1}{4 \left(1 - \frac{f}{2}\right) \sigma T^3} \Delta F = \lambda \Delta F$$

参考 近似的には λ は0.3、 ΔF はCO₂の場合、300ppmがXppmに濃度変化した場合で $\Delta F = 5.35 \times \ln(X/300)$

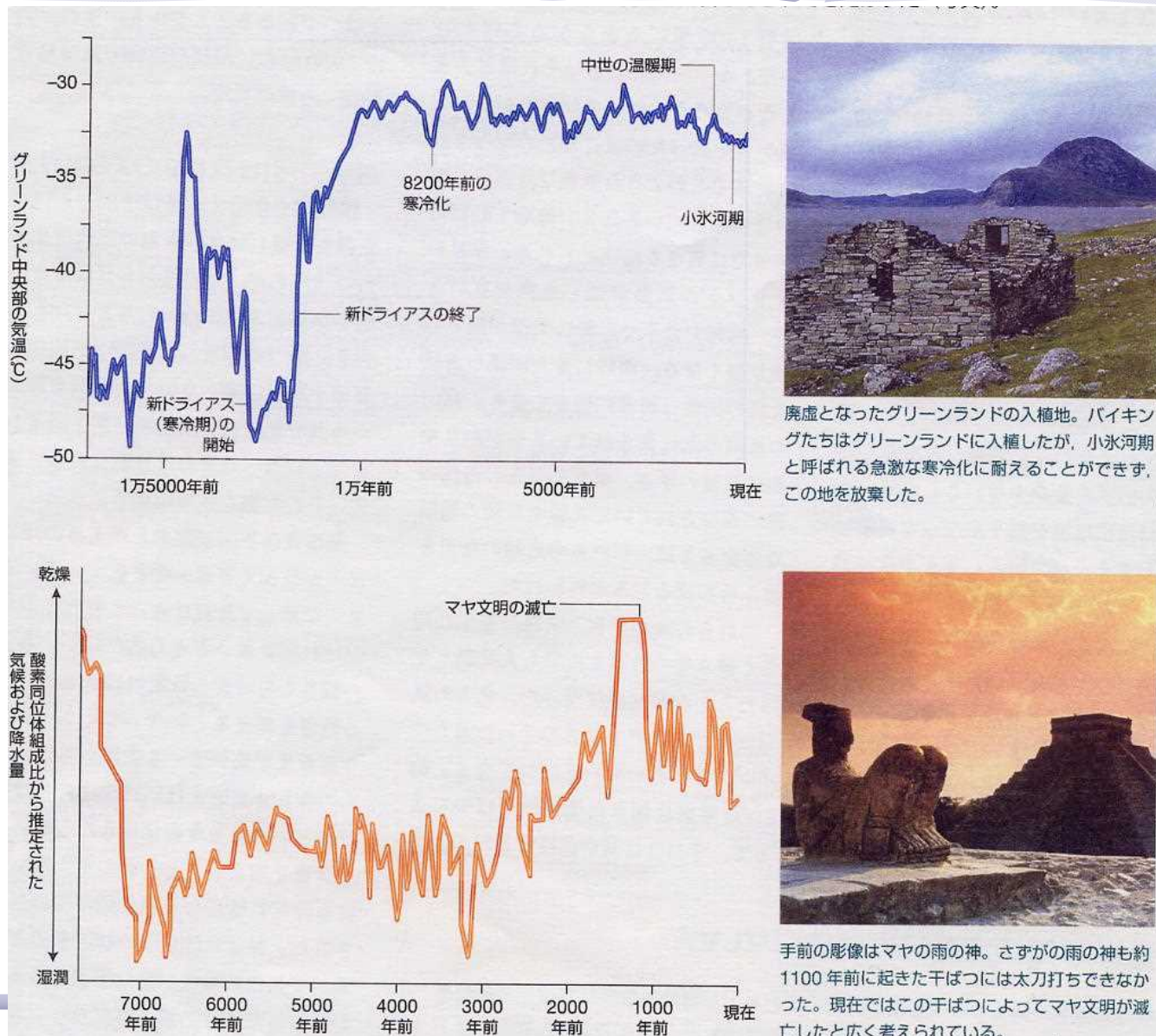
2℃上昇シナリオ(RCP2.6)及び4℃上昇シナリオ(RCP8.5)



・2℃上昇シナリオ(RCP2.6)は、21世紀末の世界平均気温が、工業化以前と比べて0.9～2.3℃ (20世紀末と比べて0.3～1.7℃) 上昇する可能性の高いシナリオ

・4℃上昇シナリオ(RCP8.5)は、21世紀末の世界平均気温が、工業化以前と比べて3.2～5.4℃ (20世紀末と比べて2.6～4.8%) 上昇する可能性の高いシナリオ

短期間の小氷河期と温暖化の文明への影響



廃墟となったグリーンランドの入植地。バイキングたちはグリーンランドに入植したが、小氷河期と呼ばれる急激な寒冷化に耐えることができず、この地を放棄した。

寒冷化
バイキング・
グリーンラ
ンドを去る



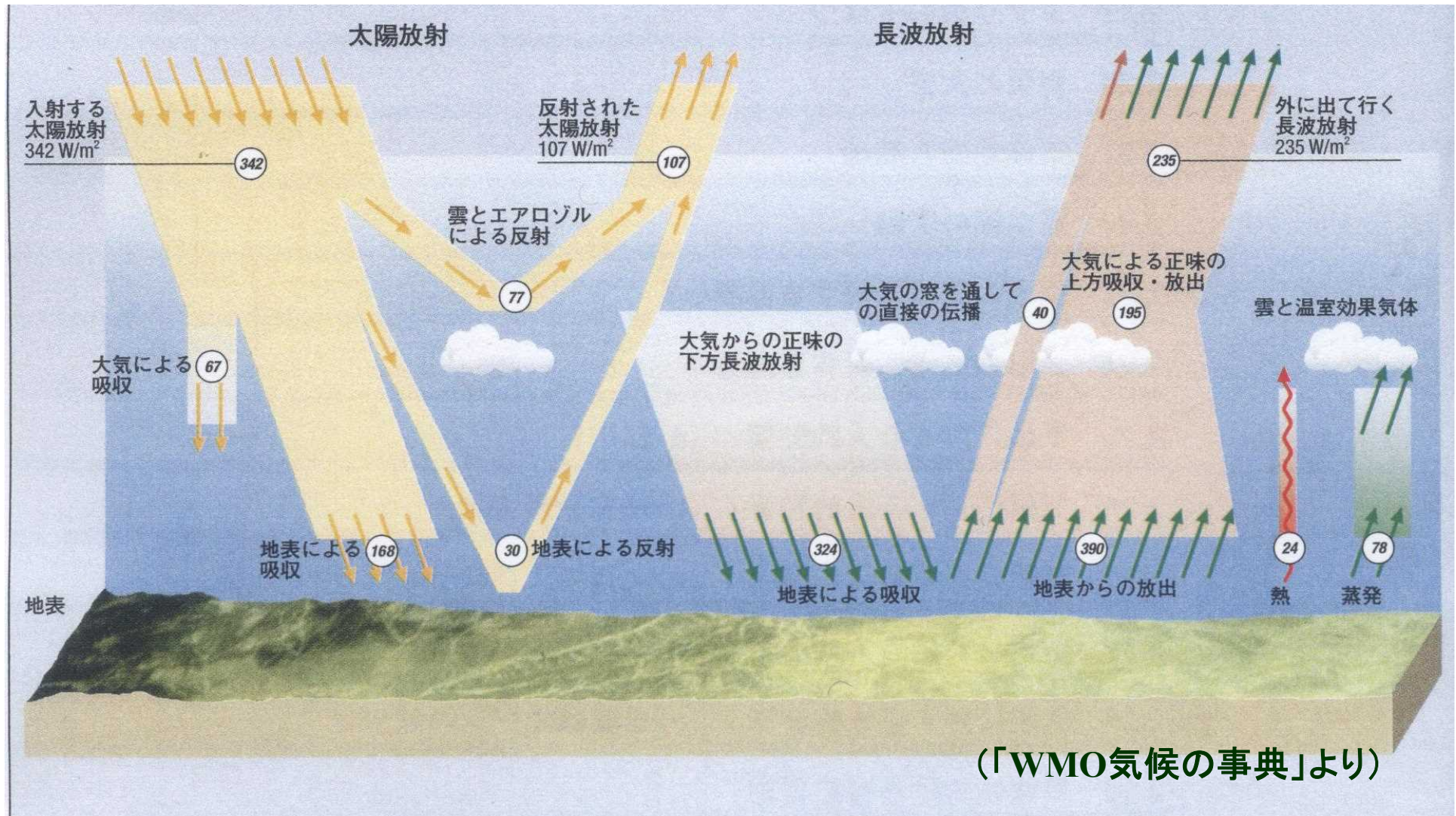
手前の彫像はマヤの雨の神。さすがの雨の神も約1100年前に起きた干ばつには太刀打ちできなかった。現在ではこの干ばつによってマヤ文明が滅亡したと広く考えられている。

干ばつ
マヤ文明の
滅亡

(出展: 日経サイエンス2005. 2)

地球の平均気温

地球の平均気温は太陽光の放射エネルギーと地球の放射エネルギーのバランスで決まる



(温暖化ガスなし -18°C 、あるので 15°C)



自己紹介

- ・1949年 東京都の生まれ

(両親は長野県出身です)

- ・1977年 工学博士(東京大学)

- ・1977年～現在(概略)

オックスフォード大学研究員、

東京大学助手・講師

東京理科大学 助教授・教授

公立諏訪東京理科大学 副学長・学長

専門 エネルギー工学・環境工学



氷期・間氷期の原因(2)

1000年単位の自然な気候変動は、木星、土星、金星の重力の影響による地球軌道の変動が引き起こす(引き金となる)が、気候変動は大気や地表、つまり地球のエネルギーバランスが変化した結果である。(J.Hansen、「日経サイエンス2006. 6」)

参考： 地球軌道の変動は地球に降り注ぐ年間の平均太陽エネルギー量にほとんど影響しない。しかし地域や季節ごとの日射量は約20%変化する。この日射量の変化が気候変動を起こす？