

地球温暖化と成層圏オゾン層破壊

地球温暖化

成層圏オゾン層破壊

関連する大気領域	対流圏	成層圏
主要な関与物質	H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O	O_3 , O_2 , CFC
電磁波との相互作用	分子が赤外線を吸収すると、は振動して熱エネルギーを地球に戻す。	分子が紫外線を吸収すると、分子は分解して小さな破片になる。
問題の性質	温室効果ガスの濃度が増加すると地球の平均温度が上がる。	O_3 の濃度が低下すると紫外線への曝露が増える。
問題の発生源	化石燃料の燃焼による CO_2 の放出、森林破壊、家畜からの CH_4 、自然界の H_2O 源。	溶媒、発泡剤、空調設備で過去に使われた長寿命CFC類の放出；CFC類からのCl・が O_3 を破壊する。
起こり得る結果	気候と農業生産力の変化。海面の上昇、健康への影響。	皮膚ガンの増加、植物プランクトンの損傷。
可能な対策	化石燃料の使用制限、森林破壊の規制、農作業の仕方の変更。	CFC類の使用停止と代替品の開発。
国際的対応	京都議定書、1997年およびその後の修正。	モントリオール議定書、1987年およびその後の修正。

環境科学概論 第6回

地球環境問題

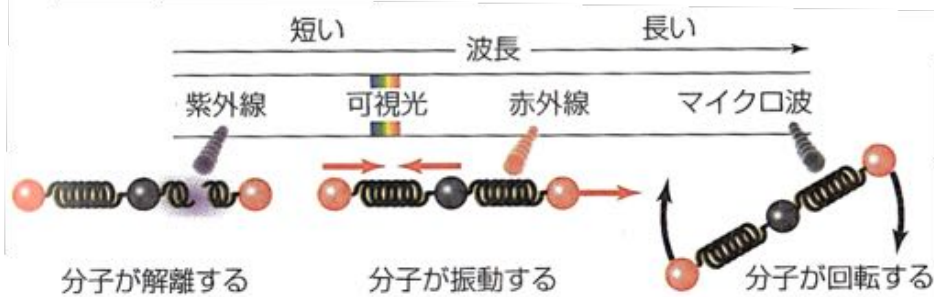
地球温暖化&オゾン層破壊



1

電磁波と物質の相互作用：分子の応答

- ・波長の短い電磁波：分子を解離
- ・波長の長い電磁波：分子を振動・回転

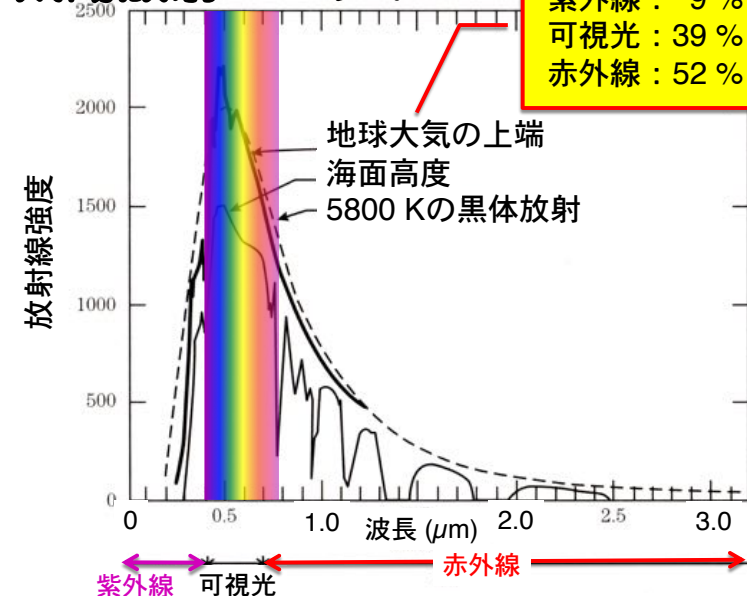


なぜ電子レンジで食品が暖まるのか？

水分子：マイクロ波を吸収して回転

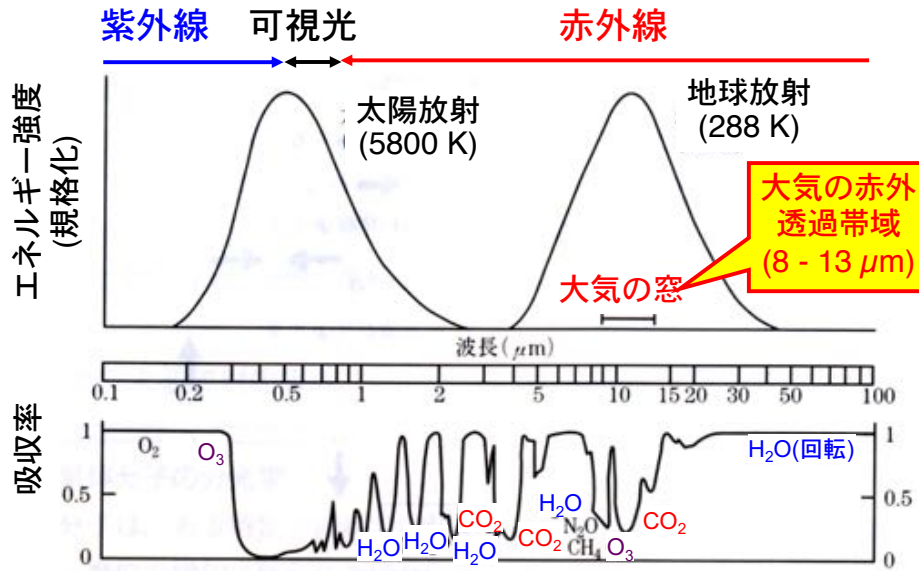
→ 摩擦により周囲を加熱

太陽放射スペクトル





太陽放射と地球放射の吸収率



6



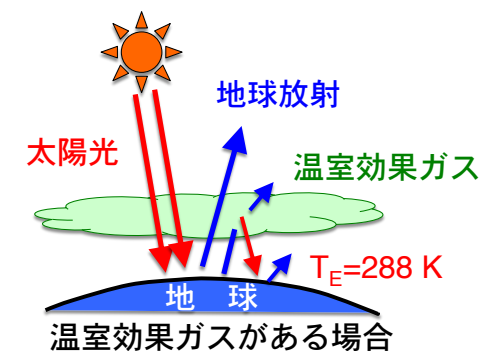
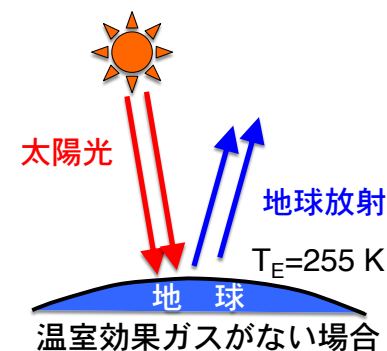
地球温暖化は“茹でガエル”か？



温室効果

地球放射の一部が、温室効果ガスによって吸収され、地球に向かって放射されることにより、下層大気と地表の気温を上昇させる効果

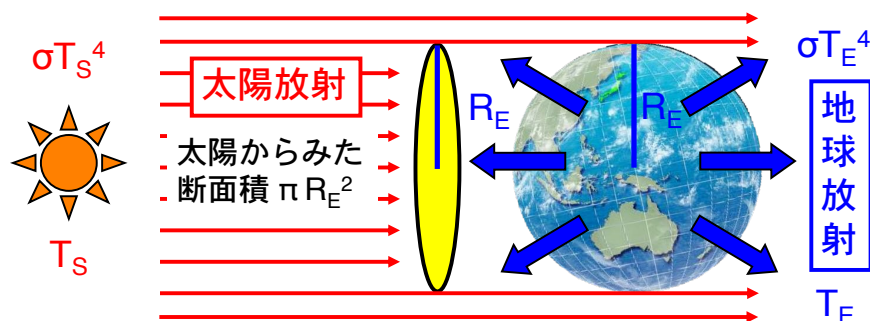
温室効果 = 地球を 33 K 暖める効果



地球の放射平衡温度

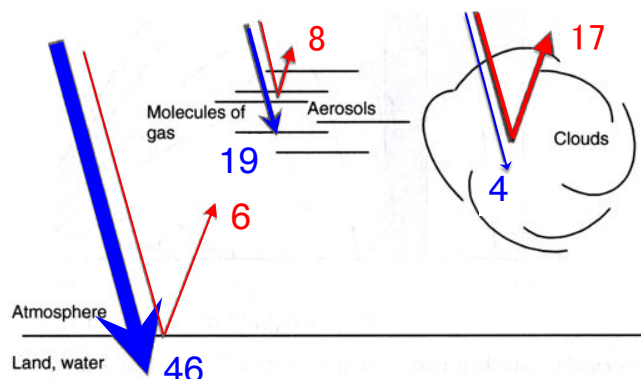
放射平衡 安定した気候条件

地球が太陽から受け取る放射(**太陽放射**)
= 地球から宇宙空間に放出する放射(**地球放射**)

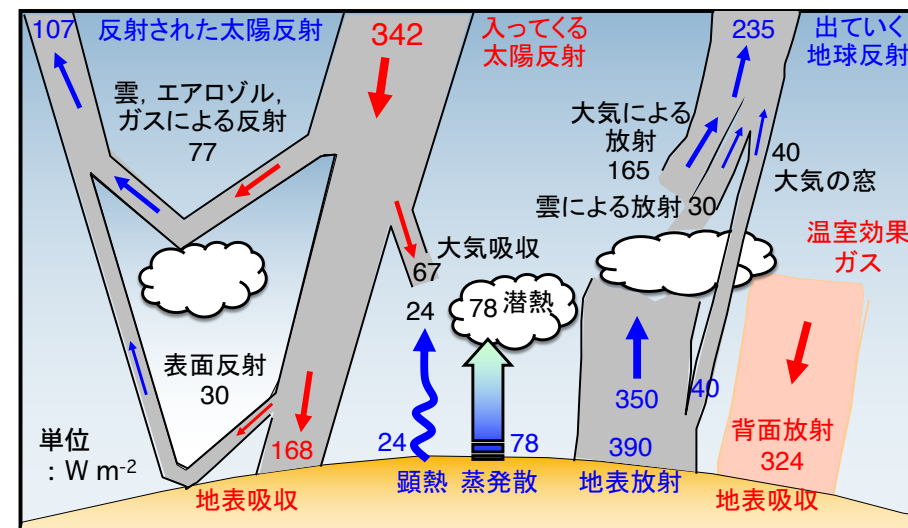


地球表層における太陽放射の反射と吸収

▶ 反射率: 31 % ▶ 吸収率: 69 %
 地表面: 6 % 地表面: 46 %
 雲: 17 % 雲: 4 %
 エアロゾル: 8 % エアロゾル・ガス: 19 %



地球大気システムの放射収支



アルベド(albedo)

地球に入射した太陽放射: 散乱, 反射, 吸収

$$\text{アルベド} = \frac{\text{反射された太陽放射量}}{\text{入射した太陽放射量}}$$

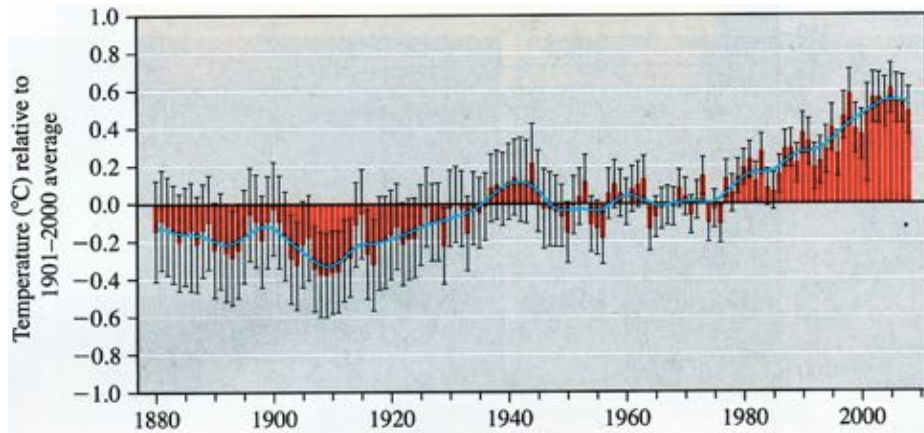
	太陽からの平均 距離(天文単位)	入射放射量 (W m^{-2})	アルベド	放射平衡 温度	平均表面 温度(K)	表面気圧 (気圧)
金星	0.72	2.60×10^3	0.78	224	735	90
地球	1.00	1.37×10^3	0.30	255	288	1
火星	1.52	0.58×10^3	0.16	216	230	0.006
木星	5.20	0.05×10^3	0.73	88	130*	2*

* 雲の表面における値.



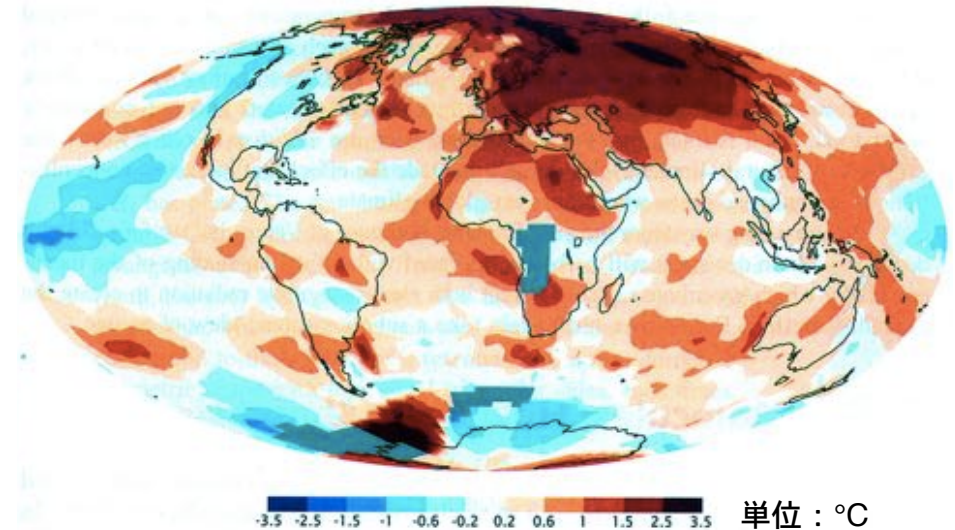
地球は温暖化しているのか？

1901-2000年の平均気温に対する気温変化



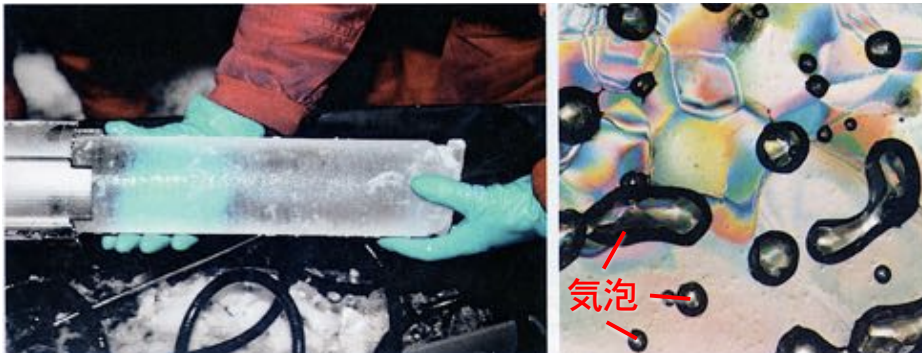
2006年における地表面温度分布

1951-1980年の平均気温に対する気温分布

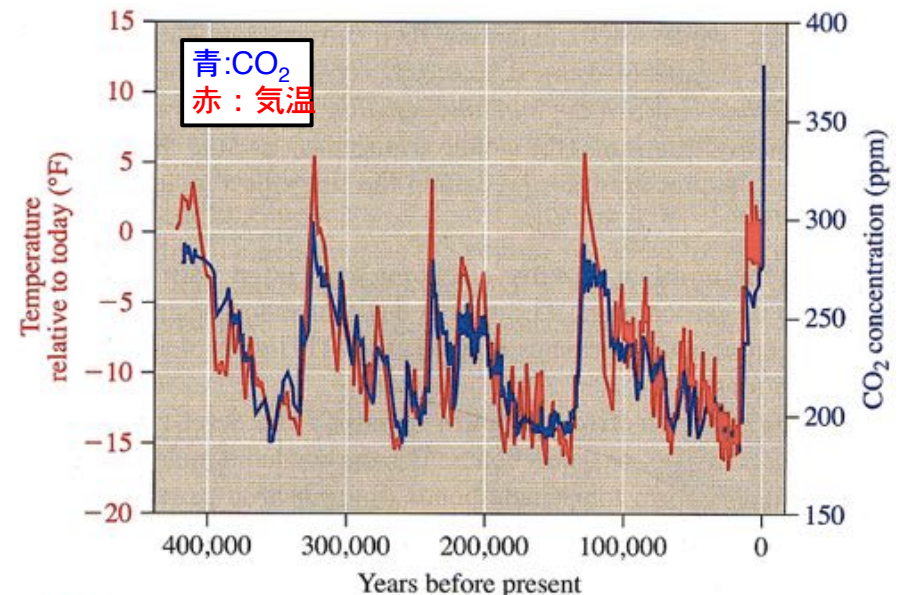


氷床コア：タイムカプセル

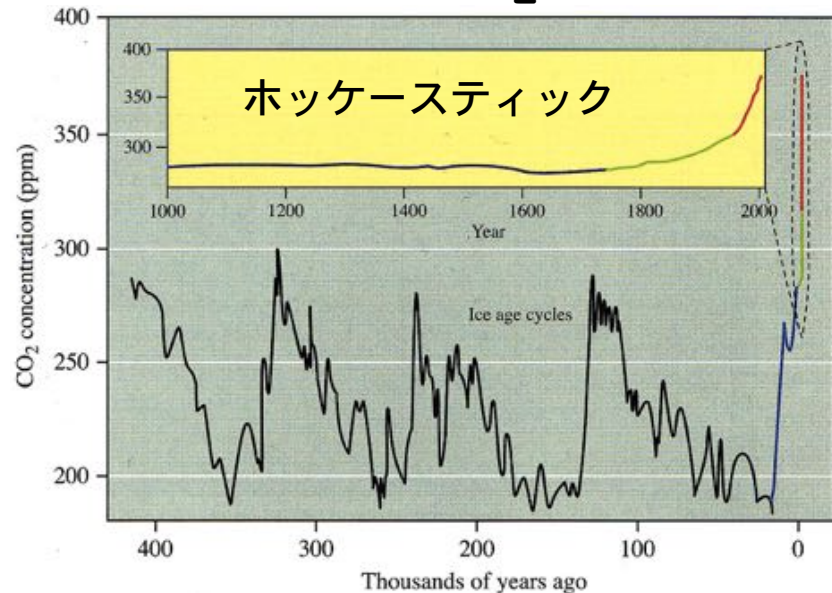
- ・氷の $^2\text{H}/^1\text{H}$ 比 → 気温を推定
- ・氷の気泡(過去の大気) → CO_2 濃度を推定



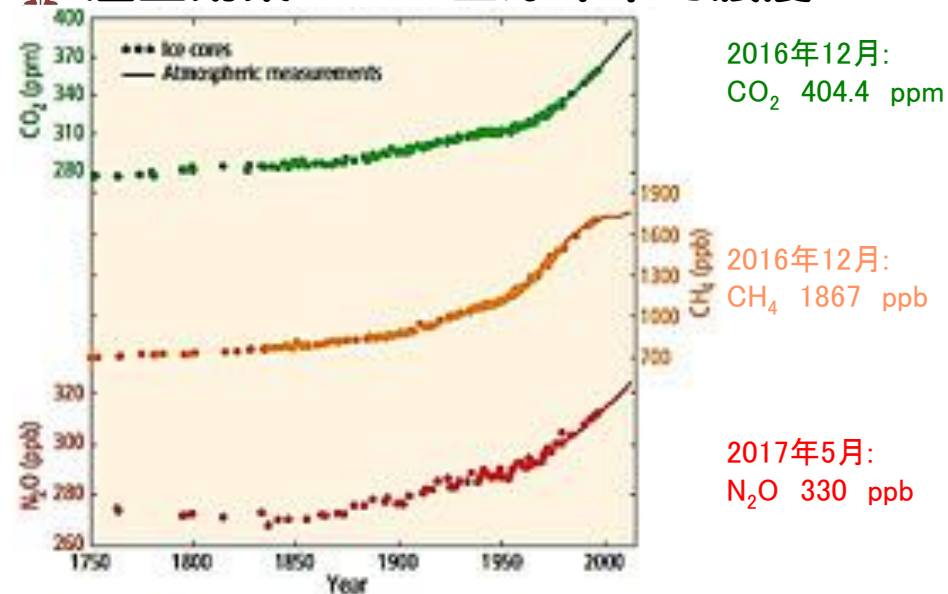
過去40万年の大気中 CO_2 濃度と平均気温



過去40万年間のCO₂濃度変化

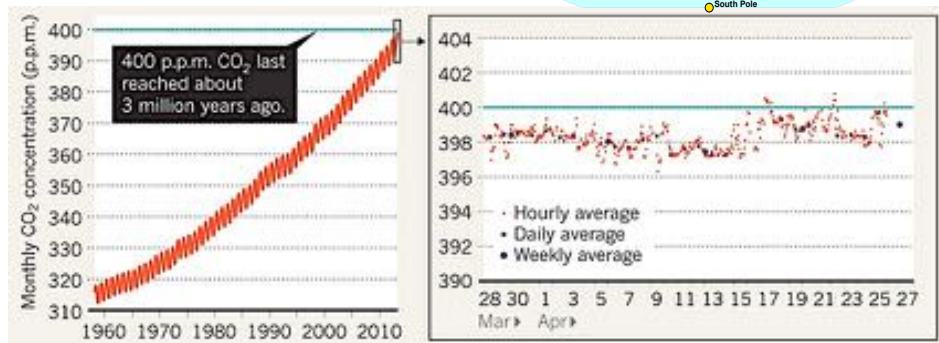


温室効果ガスの全球年平均濃度



大気中CO₂濃度が400 ppmを越えた

局地的排出源の影響を受けないマウナロア山で、大気中CO₂濃度が400 ppmvを越えた(2013年5月9日の1日平均濃度: 400.03 ppmv)



IPCCの地球温暖化論

温室効果ガス、特に人類活動由来のCO₂により下層大気と地表の気温が上昇する現象

多量のCO₂が放出

産業革命

大気中に蓄積

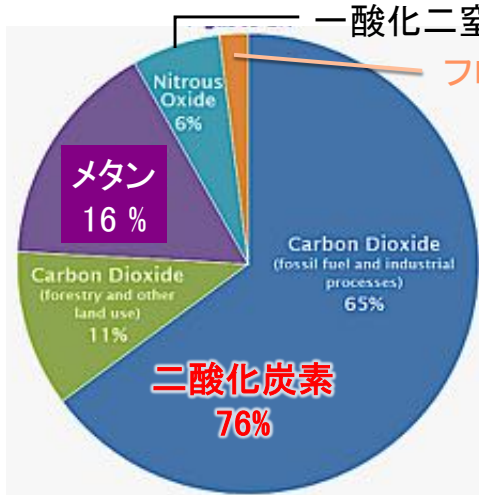
地球温暖化

IPCC
気候変動に関する政府間
パネル(Intergovernmental
Panel on Climate Change)



温室効果ガスとは？

地球放射の大部分が放出される $5 - 50 \mu\text{m}$ の赤外線を吸収する気体

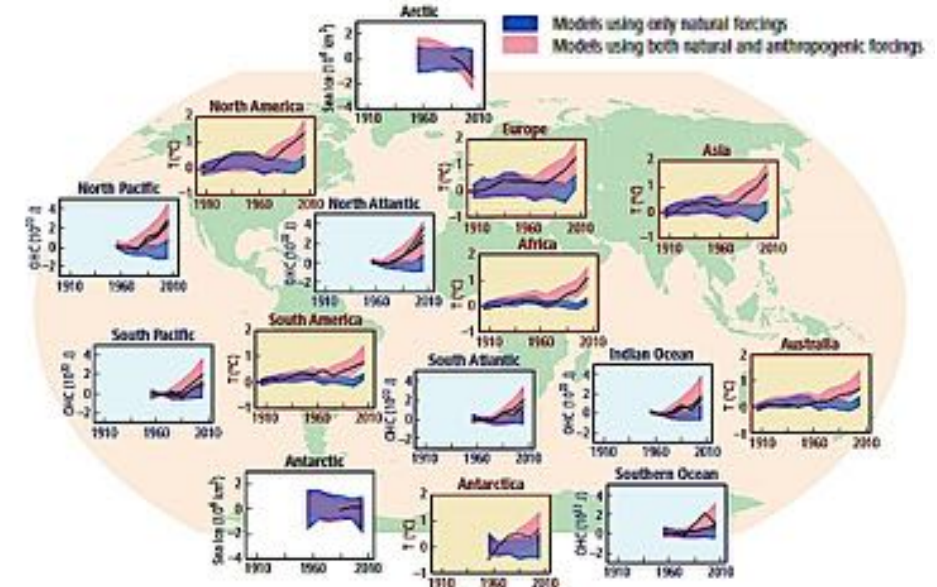


地球大気で最も重要な温室効果ガス: **水蒸気**
(温室効果全体の約 **95%**)

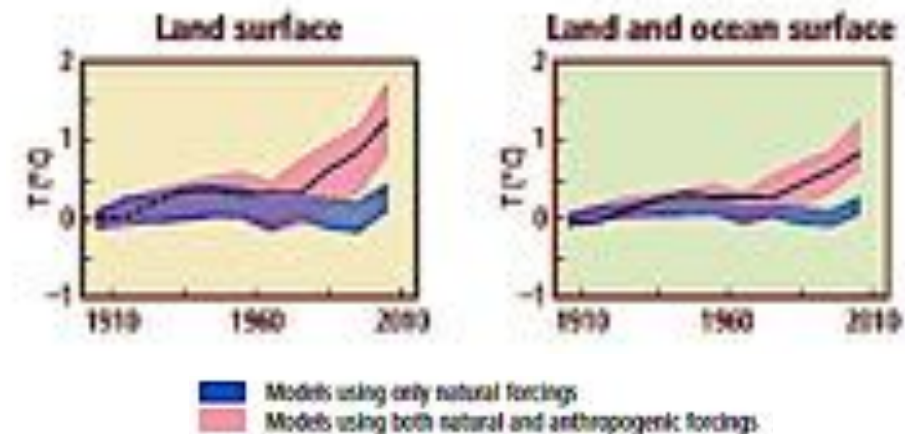
温室効果ガスの寄与率
(水蒸気、オゾン除く)



IPCCの地球温暖化論



IPCCの地球温暖化論



IPCCの研究成果を受け入れますか？



Climategate (クライメートゲート) 事件

ウォーターゲート事件*になぞらえた名付けられた**気候(climate)変動**に関する**メール流出事件**

*ニクソン共和党政権が野党・民主党本部のあるウォーターゲート・ビルに盗聴器を仕掛けた事件

<経緯>

- ・ 2009年11月17日: 英国イーストアングリア大学(UAE)気候研究ユニット(CRU)のコンピューターがクラッキングされ、電子メールと内部文章が流出
- ・ IPCCが採用した**人為的な地球温暖化の有力な証拠**とされるデータに**ねつ造の疑い**があることが発覚。

<その後>

独立レビュー組織(The Independent Climate Change Email Review)を設置して検証

- ・ 科学者としての**厳格さ**、**誠実さ**は疑いの余地がない。
- ・ IPCC評価報告書の結論を疑うような行為のいかなる証拠も見出さなかった。

温暖化予測を支持する観測

1487箇所の気象ステーションの降雨データ解析

降水量 予測・関連現象

北半球中緯度地域: 増加 温暖化予測と一致

北アフリカ・中東: 減少 サヘルで干魃増加

多くの地域: 変動大 干魃増加

長期間の降雨量データ不足

→ 衛星によるリモセン



想定される地球規模の災害

1) 海面上昇・海流の変化

沿岸部の水没、地下水の塩水化、気候変動

2) 異常気象

**集中豪雨、大規模な竜巻・台風の発生、
猛暑、異常な寒冷化**

3) 乾燥化

食糧不足、水不足、山火事発生頻度の増加

4) 生態系の変化

植生・病虫害の生息域の変化

寒冷地の動植物の絶滅

温暖化予測を支持する観測

降水量の増加 → 流出量の増加?

Probst & Tardy (1987) 世界主要河川: 流出量 3 %増加

温暖化で大河川洪水危険性4倍に

05月12日 09時46分 2018年5月12日

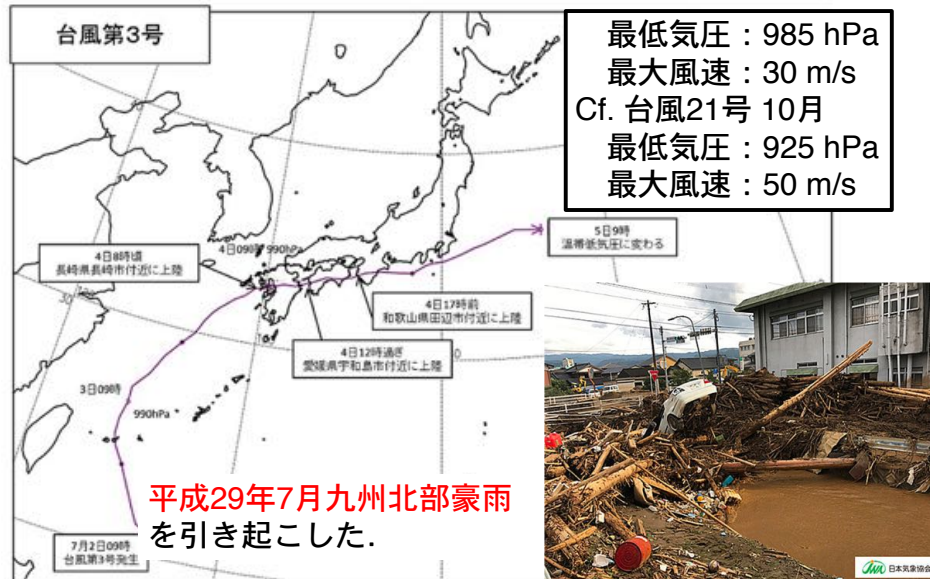


地球温暖化が進んだ場合、国が管理する大河川では洪水が発生する危険性が最大でいまのおよそ4倍となること、国土交通省の試算でわかりました。

国土交通省は、国連のIPCC = 「気候変動に関する政府間パネル」の報告書に基づいて、「1級

河川」と呼ばれる国が管理する大河川の流域の降水量や洪水の危険性を試算しました。

平成29年7月 梅雨前線×台風3号



九州北部豪雨 2017年7月5-6日

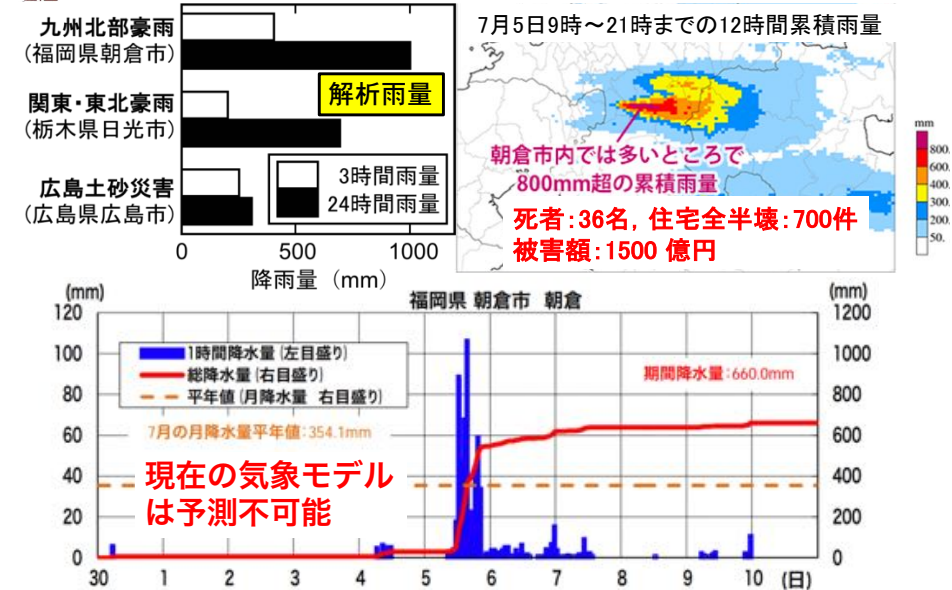
梅雨前線と台風3号による豪雨



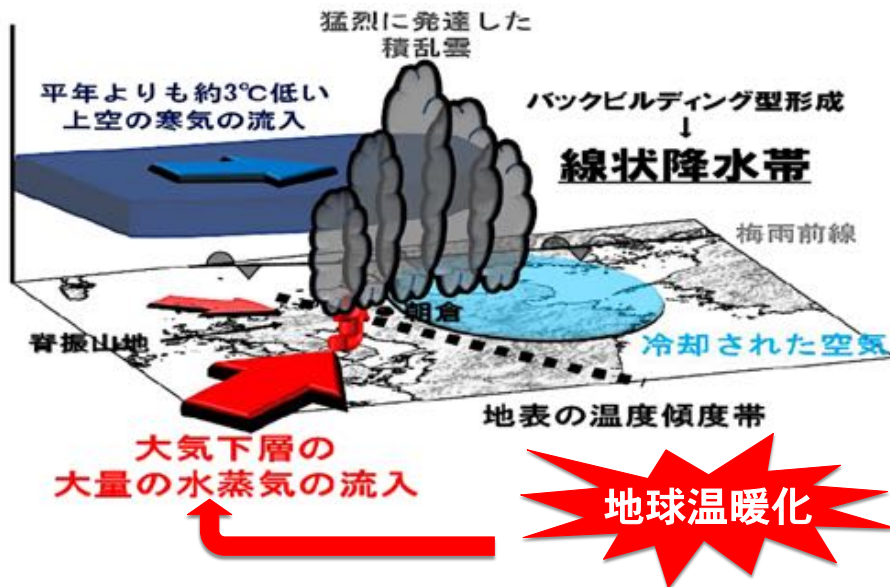
九州北部豪雨



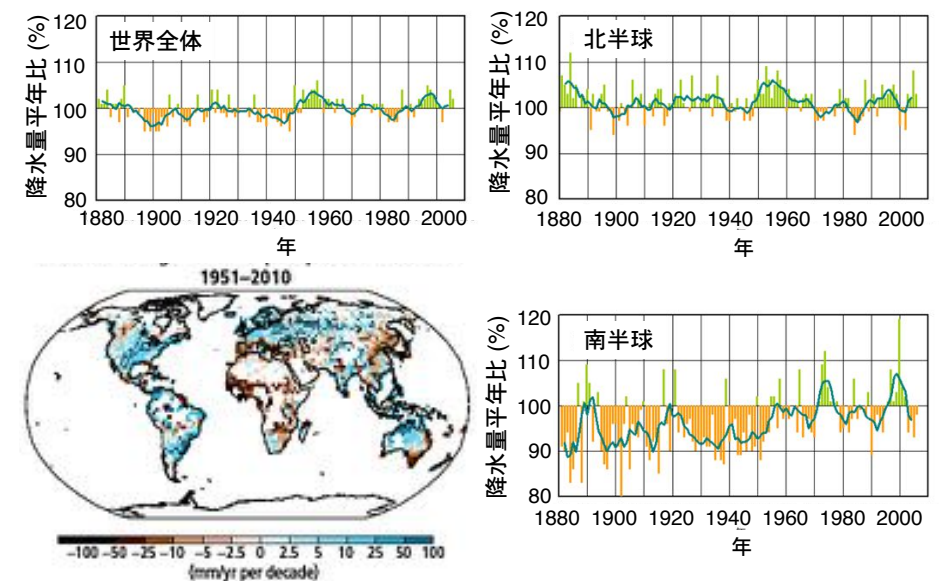
九州北部豪雨による被害



九州北部豪雨の想定メカニズム

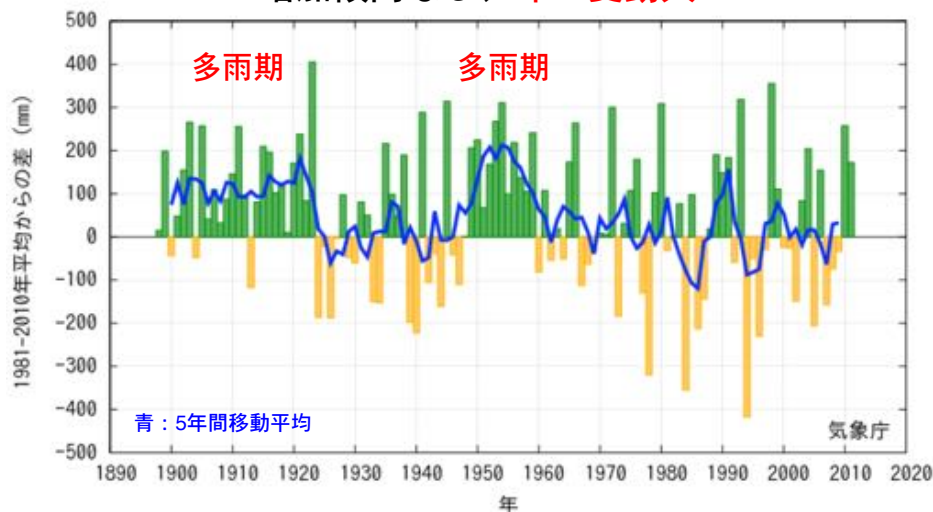


世界の平均降水量



日本の年降水量変化

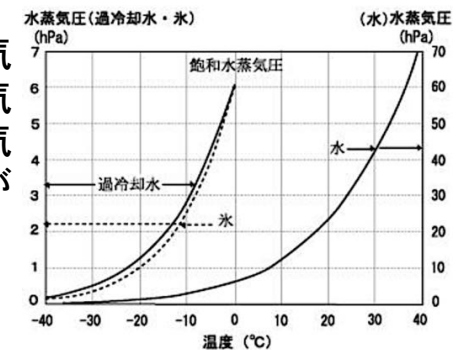
増加傾向なし、年々変動大



http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/temp/an_jpn_r.html

温暖化に伴う降水量の地球規模変化

- (1) 大気中水蒸気量の増大
気温上昇により大気中水蒸気量が増大するので、同じ低気圧が通過しても大量の水蒸気量が集められ、大量の降水がもたらされる。



- (2) 大気循環の変化

気温上昇により低気圧の強さや頻度が変化し、降水量が変化する。

シミュレーション (JAMSTEC)による将来予測

(2081年～2100年の平均値) - (1981年～2000年の平均値)
(1981年～2000年の平均値)



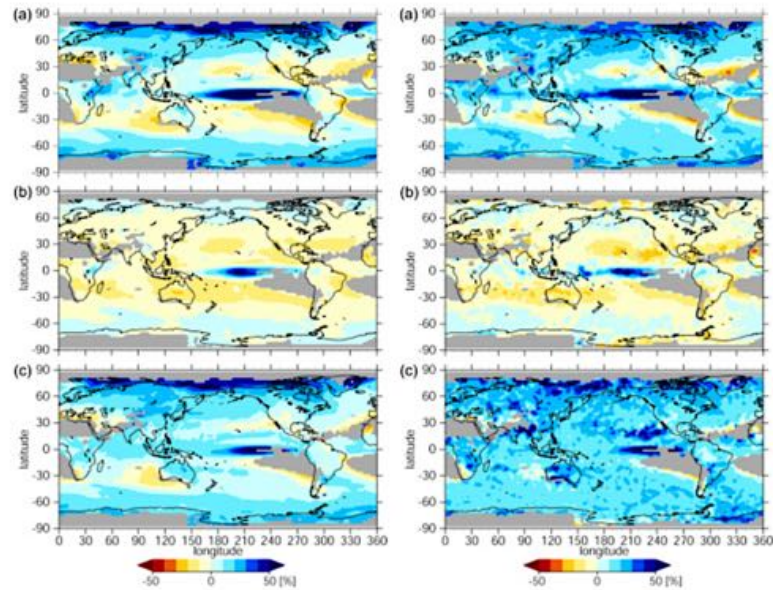
年平均降水量

豪雨強度（年間4位）

全変化

大気循環
変化

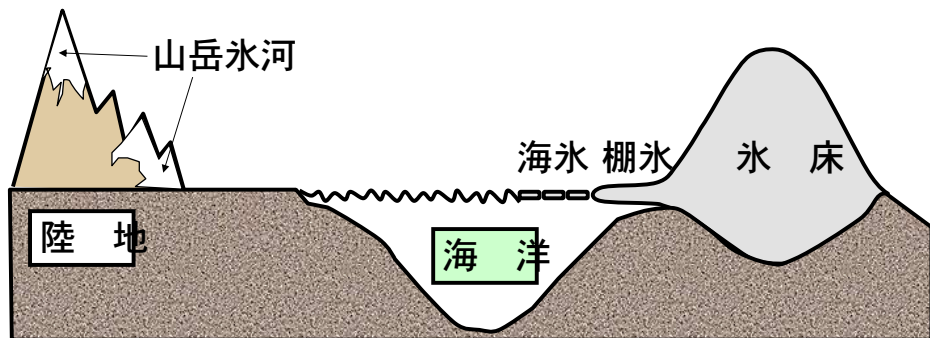
大気水蒸
気量増加



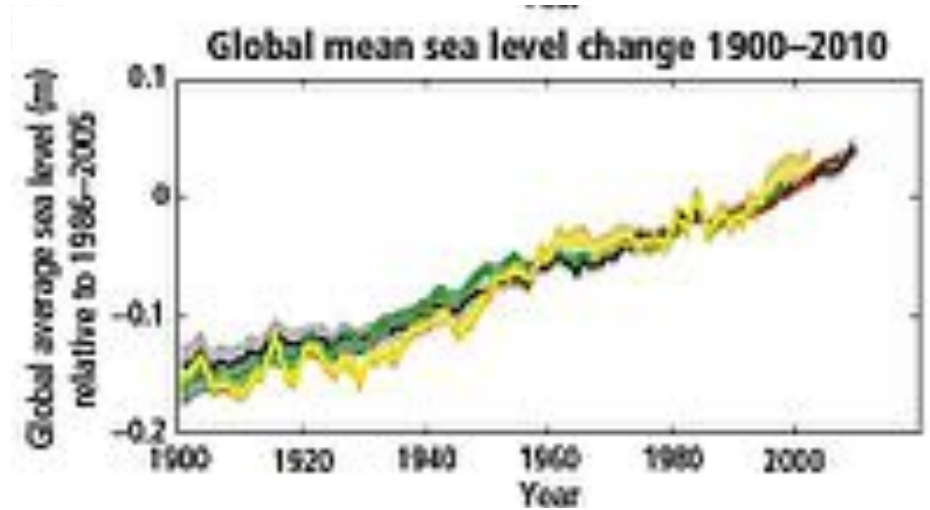
海面上昇の原因

- ・表層海水温度の上昇による **熱膨張**
- ・ **地下水汲み上げ** と河川への排出
- ・ **山岳氷河** の融解

グリーンランドと南極大陸の氷床減少は未確認

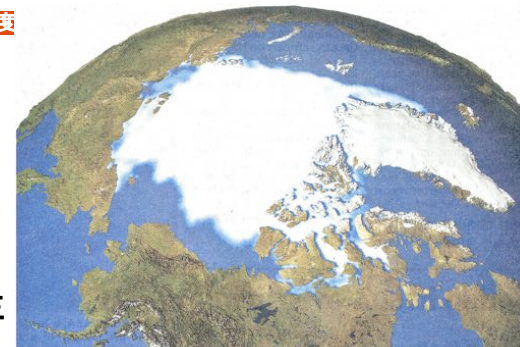


海水面変化



9月の北極海の海水 (NASA)

1979年

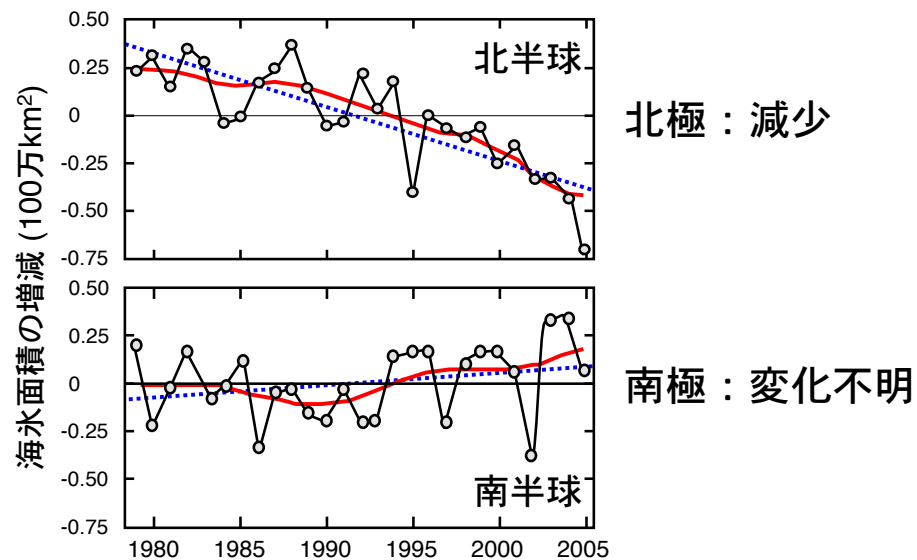


2005年



海水面積
20%減少
気温
3°C高い

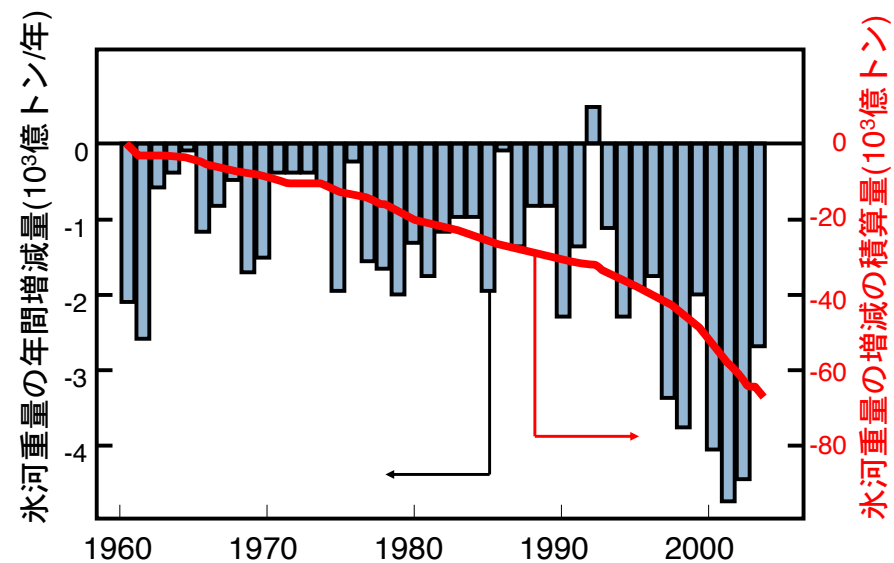
海氷の変化



ヒマラヤで進む氷河の衰退

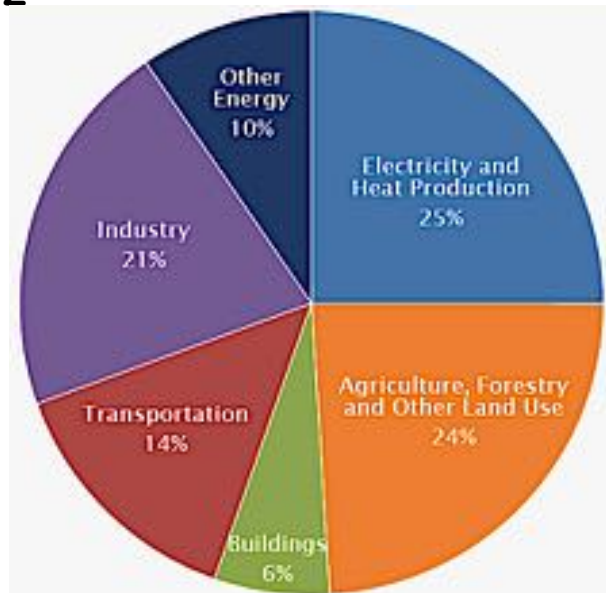


山岳氷河の変化

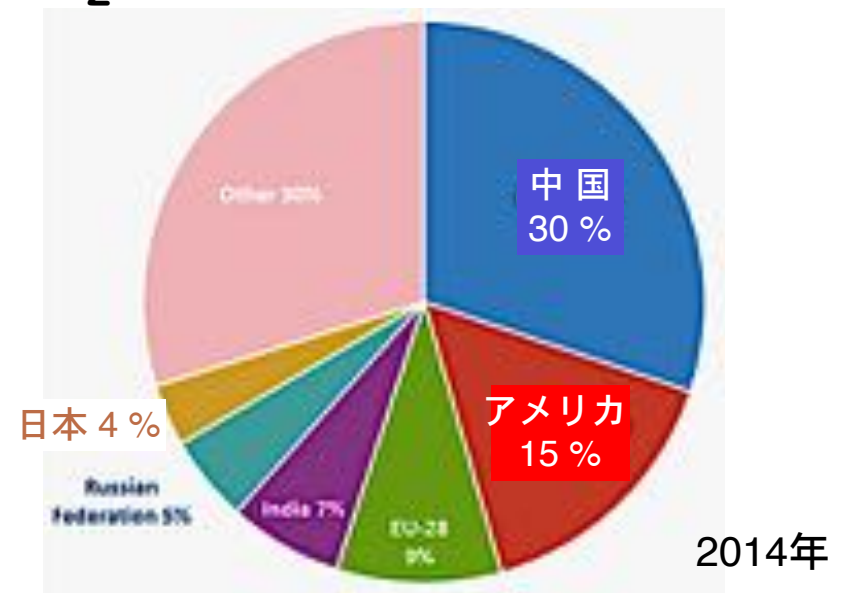


地球温暖化の対策

CO₂はどこから排出？



CO₂はどこから排出？



ジオエンジニアリング (全球工学)

人為的な気候変動の対策として行う、**意図的な惑星環境の大規模改変**

全球工学・気候工学

太陽放射管理 (Solar Radiation Management; SRM)

太陽入射光を減らすことで気温を低下させる手法
例) 成層圏へのエアロゾル注入

二酸化炭素除去 (Carbon dioxide removal; CDR)

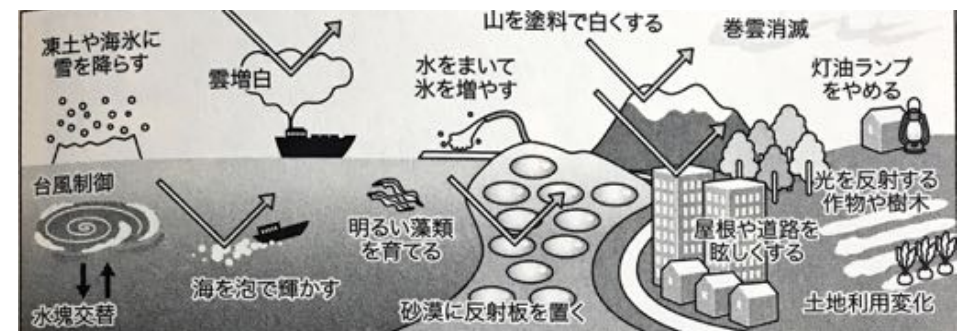
二酸化炭素のシンクを促進するか、工学的に回収して除去する手法

例) 海洋に鉄を散布し、光合成を促進
二酸化炭素の地下埋設

ジオエンジニアリング (全球工学)

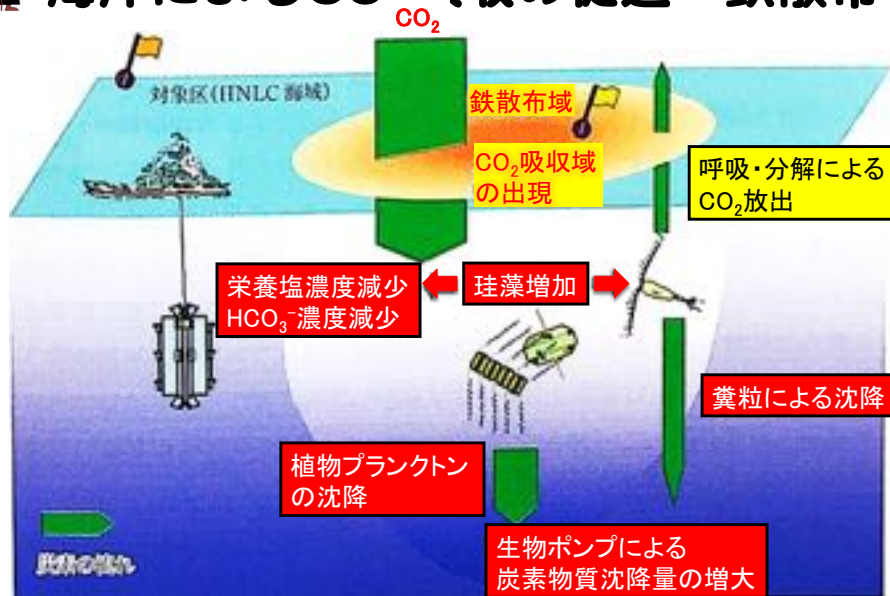
太陽放射管理 (SRM)

温暖化対策として効果が期待されている気候制御技術



巻雲：飛行機雲からの生成も
アルベド効果 < 温室効果

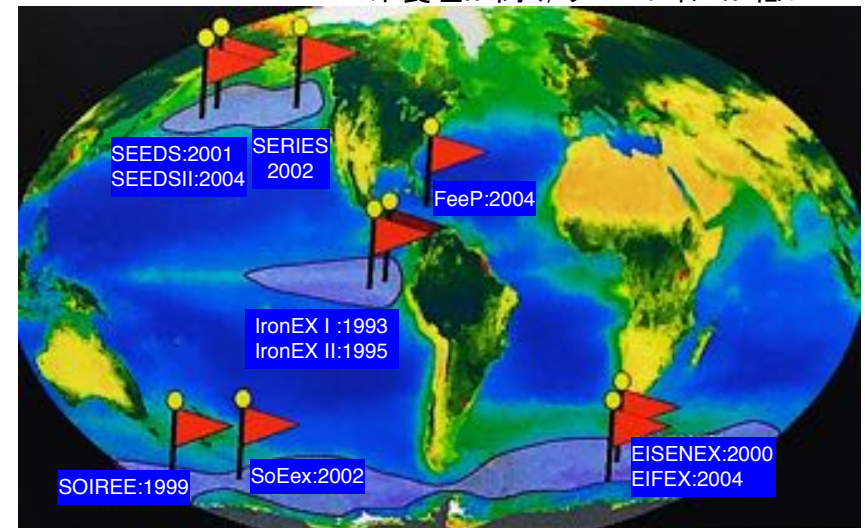
海洋によるCO₂吸収の促進：鉄散布



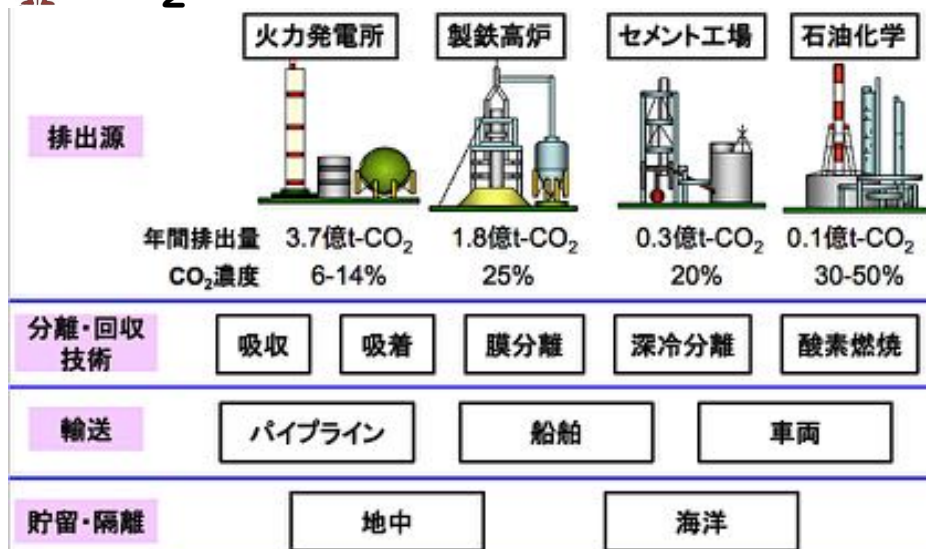
鉄散布実験が行われたHNLC海域

HNLC (High Nitrate Low Chlorophyll):

栄養塩が高く、クロロフィルが低い



CO₂の工学的回収・分離技術

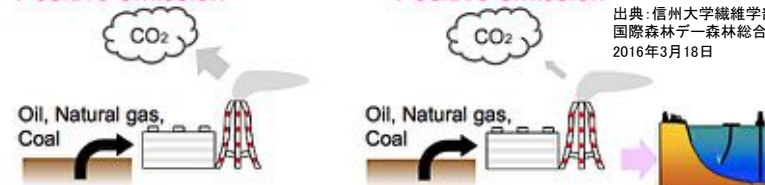


出典：信州大学繊維学部高橋 伸英 国際森林デー森林総合研究所シンポジウム 2016年3月18日

BECCSによる大気中CO₂の削減

Bio-Energy with Carbon dioxide Capture and Storage

- ①化石燃料燃烧 Positive emission
- ②化石燃料燃烧+CCS (FECCS) Positive emission

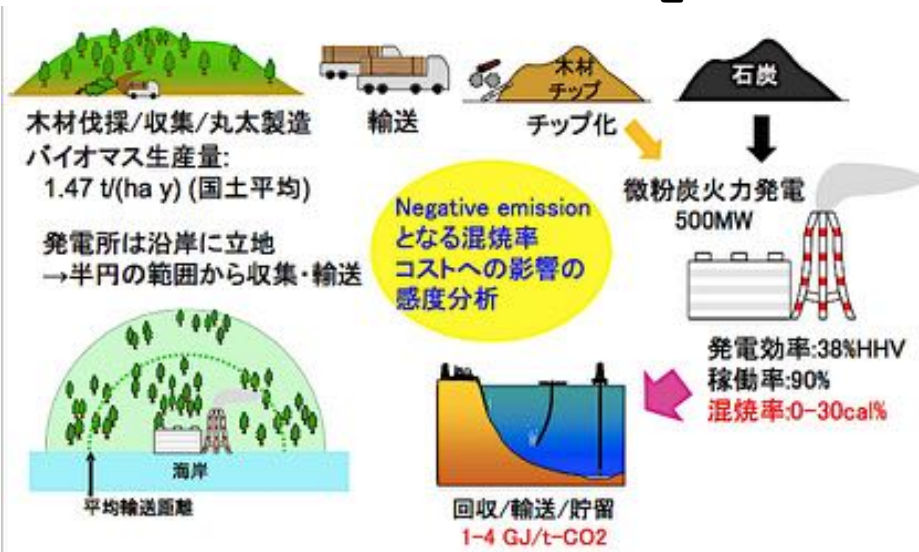


- ③バイオマス燃烧 Zero emission
- ③バイオマス燃烧+CCS (BECCS) Negative emission



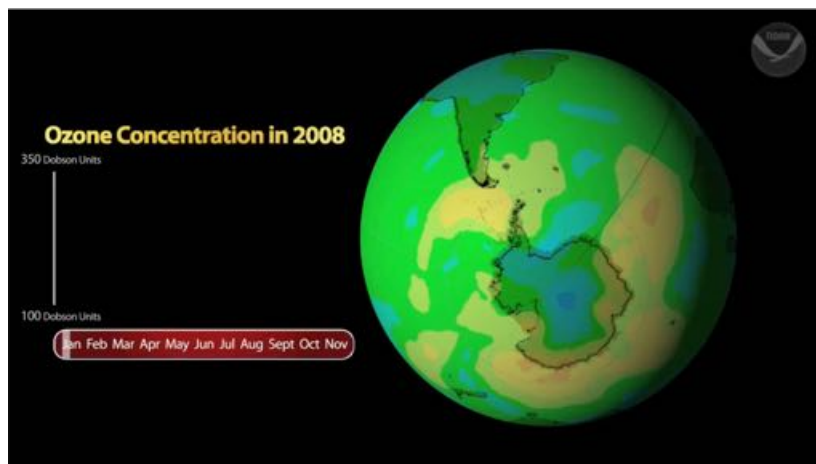
出典：信州大学繊維学部 高橋 伸英
国際森林デー森林総合研究所シンポジウム
2016年3月18日

BECCSによる大気中CO₂の削減



出典:信州大学繊維学部高橋 伸英 国際森林デー森林総合研究所シンポジウム 2016年3月18日

2008年：南極における成層圏オゾン濃度



DU = ドブソン単位

オゾンの単位：ドブソン単位

ドブソン (G.M.B. Dobson) オックスフォード大学

地表で紫外線放射量を測定(1920年)

→ 大気中のオゾン全量に依存

定義
300 DU
地表から大気圏上限までの気柱に含まれるオゾンを、標準状態 (1気圧, 0°C)の地表に集めた時の厚さ。 1 DU = 0.01 mm
= 2.69×10^{16} molecules cm⁻²
= 44.6 nmol cm⁻²

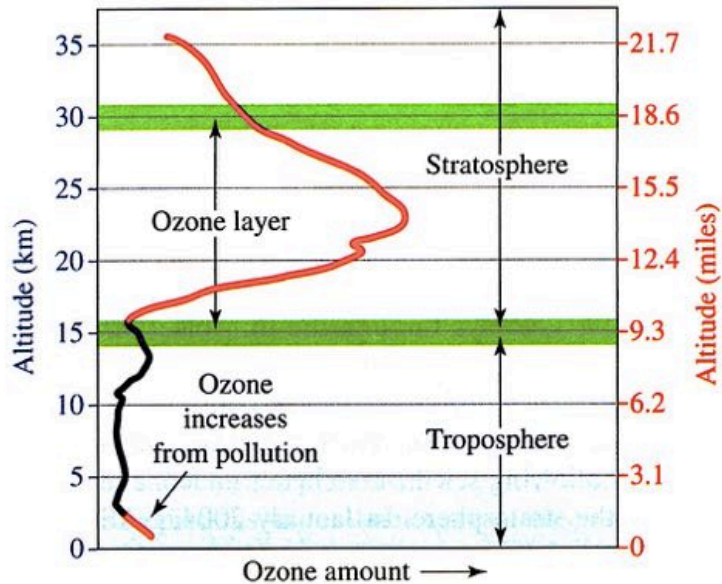


日本付近のオゾン全量:250 - 450 DU

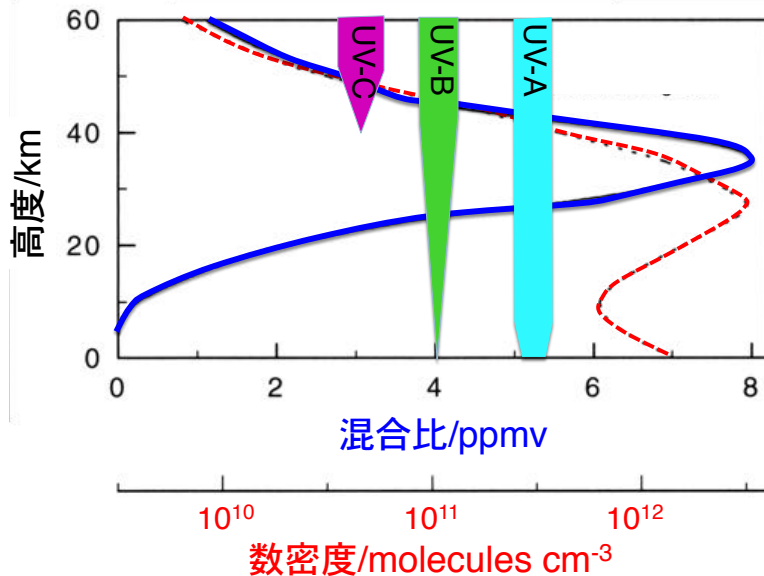
オゾンホールとは? $O_3 < 220$ DU



成層圏オゾンと対流圏オゾン



大気下部のオゾン濃度分布と紫外線



オゾンの役割

成層圏オゾン

高エネルギーの **紫外線** を吸収

➡ 地表の動植物を保護

➡ **良いオゾン**

対流圏オゾン

急性中毒: めまい・咳 ➡ 麻痺・呼吸困難 ➡ 死亡

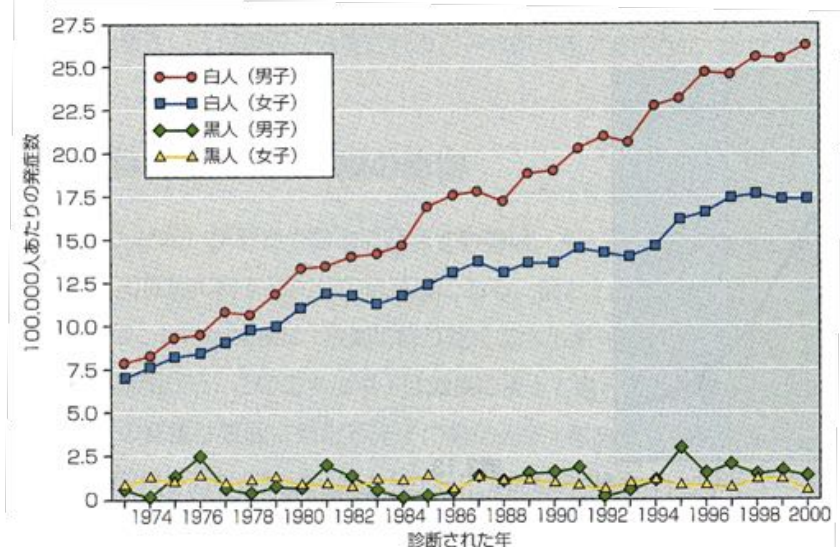
慢性中毒: 呼吸器異常

植物影響: 葉の脱色 光合成速度の低下 } ➡ 森林衰退
気孔開閉の異常

➡ **悪いオゾン**



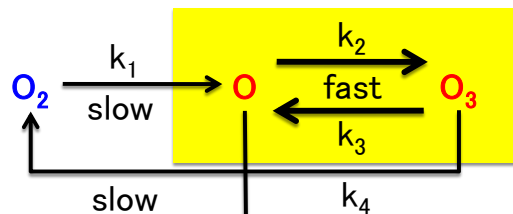
米国における皮膚ガンの発症数



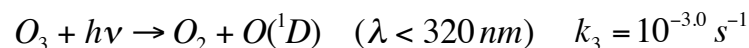
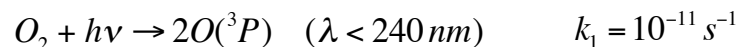


オゾン生成・消失のメカニズム

シドニー・チャップマン(英国, 1930年): **オゾン層生成理論**



奇数酸素の
化学ファミリー
 $O_x = O + O_3$



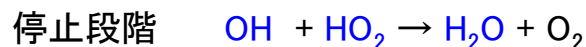
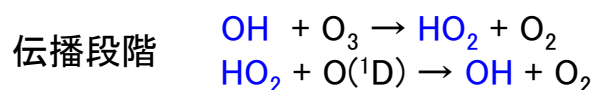
$O(^3P)$: 基底状態の三重項状態, $O(^1D)$: 励起された一重項状態



水素酸化物ラジカル(HO_x)

成層圏の**水蒸気**: 3 ~ 5 ppmv でほぼ一定

対流圏からの輸送
成層圏での CH_4 の酸化 $CH_4 + O_2 \rightarrow CH_2O + H_2O$



OH : 水酸化ラジカル (hydroxyl radical)

HO_2 : 過酸化水素ラジカル

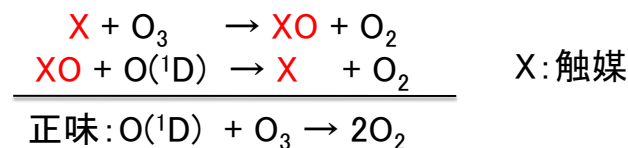
(hydroperoxy radical)

HO_x 化学
ファミリー



O_3 分解に関する触媒反応サイクル

触媒反応サイクル

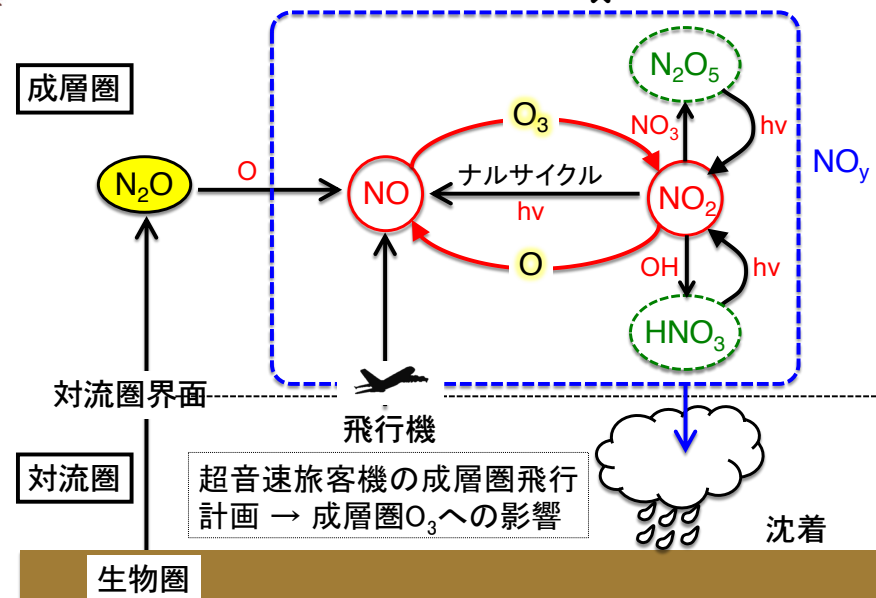


重要な触媒サイクル

- ① HO / HO_2 : **水蒸気**の酸化により始まる触媒サイクル
成層圏最下部で O_3 消失に最も重要
- ② NO / NO_2 : **窒素**の酸化により始まる触媒サイクル
- ③ Cl / ClO : **フロン**の分解により始まる触媒サイクル
成層圏 O_3 破壊: 75 - 80 %

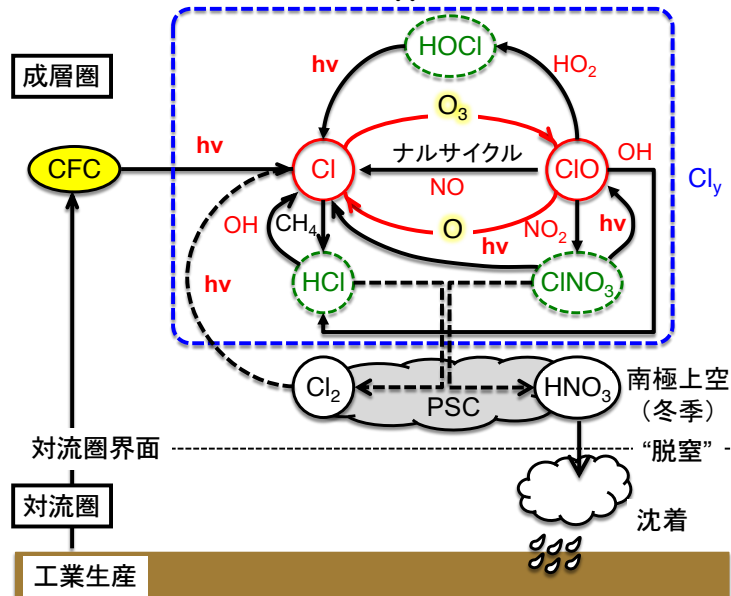


窒素酸化物ラジカル(NO_x)





塩素ラジカル(ClO_x)



66

極域でのオゾン消失



南極におけるオゾン量の変動

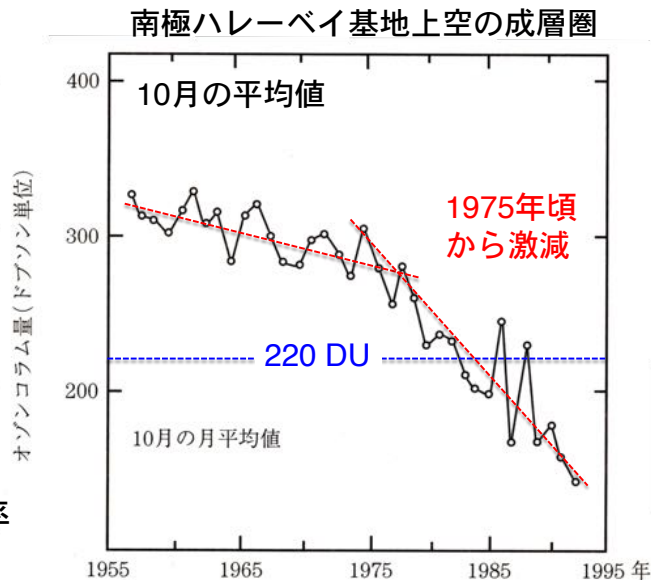
オゾンの減少

南半球の春季
(9月～10月)

オゾンコラム量

地表面の単位
面積当たりの
全 O_3 分子数

紫外線吸収効率
を決定



南極上空のオゾン

8月

高度 10 - 20 km
オゾン濃度: 高

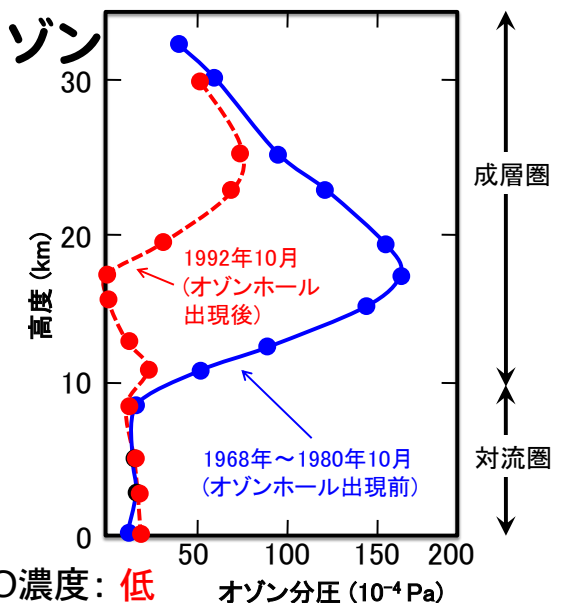
10月(春季)

高度 10 - 20 km
オゾン濃度: 減少

オゾンホール 発達

春季

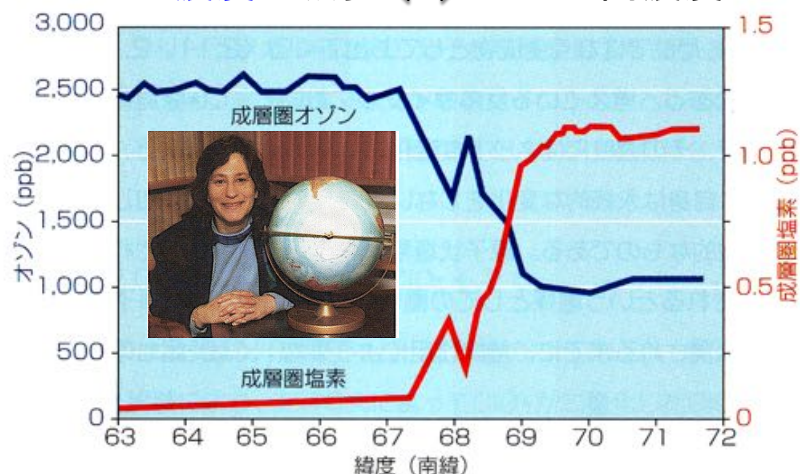
太陽光強度: 弱 → O濃度: 低
従来のメカニズムでは説明できない!



南極圏におけるO₃濃度減少の要因

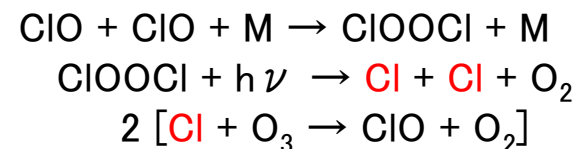
1980年代後半: 航空機観測 (Susan Solomon博士)

オゾン濃度の減少 ↔ ClO[・] の高濃度



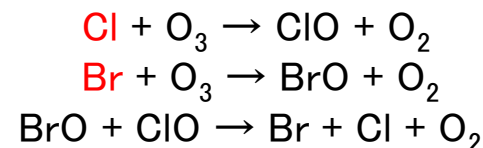
極域のオゾン消失機構

➤ ClO の二量体を含む反応: 70 %



正味: $2\text{O}_3 + h\nu \rightarrow 3\text{O}_2$

➤ ClO と BrO の反応 : 30 %



正味: $2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{O}_2$

極成層圏雲の形成

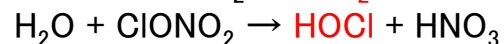
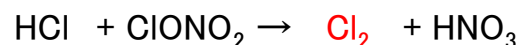
南極

成層圏下部で 極成層圏雲
(Polar Stratospheric Cloud)

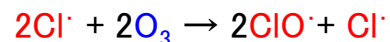
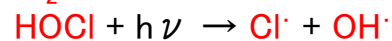
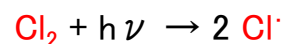
↗ ClO[・] 濃度: 高

PSC表面での反応 ClONO_2 : フロンの存在形態

冬季: Cl_2 と HOCl が蓄積 very fast



春季: 太陽光により Cl^{\cdot} と ClO^{\cdot} 生成



極成層圏雲

- ・氷の結晶からなる虹色雲
- ・高度: 20 km付近
- cf. オーロラ: 90-300 km
- 通常の雲: 0-10 km

PSC形成に伴うオゾンホール形成

O₃減少: 小

O₃減少: 大
(~95 %)

高濃度O₃
空気

極渦
< 197 K

30 km

ClO : 大
O₃ : 小

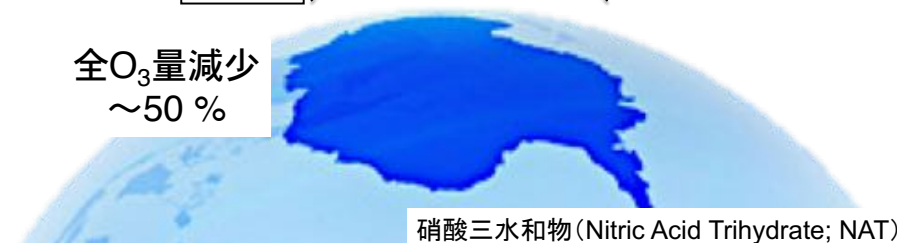
PSC
 $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

対流圏界面

ClO : 大
O₃ : 小

オゾン
ホール

全O₃量減少
~50 %



硝酸三水和物 (Nitric Acid Trihydrate; NAT)

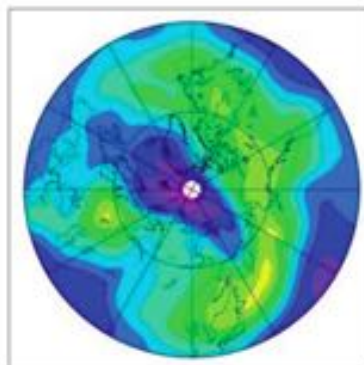
北極で巨大オゾンホール 寒さが一因、南極並み「健康への影響も懸念」

2011.10.3 08:20

今年春に北極上空でこれまでにない規模のオゾン層破壊が進み、南極にできるオゾンホールに匹敵する大きさになったのを初確認したと、国立環境研究所（茨城県つくば市）などの国際チームが2日付の英科学誌ネイチャー電子版に発表した。

北極上空では南極より冬の気温が高く、オゾンを壊す物質ができにくいのが、今年は春まで厳しい寒さが続いたため破壊が進んだらしい。同研究所の中島英彰室長は「予測していなかった現象。紫外線を遮るオゾン層がなくなると健康影響も懸念される。今後も監視が必要だ」と話している。

日米欧9カ国のチームは、人工衛星や気球を使って北半球の大気のオゾン分布を調査。今年3月末に、オゾン濃度が低い領域が北極海から北欧、ロシア北部、グリーンランドに広がったのを観測した。



2011年3月25日の北半球の高緯度地域のオゾン分布。濃度が低い青色や紫色の領域が、北極海から北欧、ロシア北部などにかけて広がった（国立環境研究所提供）

74

6. オゾン層破壊の対策

75 2017年度 環境科学概論

早稲田大学創造理工学部

大河内

モントリオール議定書

➤ 正式名称
オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書

➤ 内容
オゾン層破壊物質の削減スケジュールなどの規制措置を定めるもの。オゾン層保護条約（ウィーン条約、1985年採択）に基づいて1987年採択。

1996年以降全廃
順次全廃
特定フロン、ハロン、四塩化炭素など
その他の代替フロン
ハイドロクロロフルオロカーボン（HCFC）

締結国(2015年11月現在): 197か国(含EU)

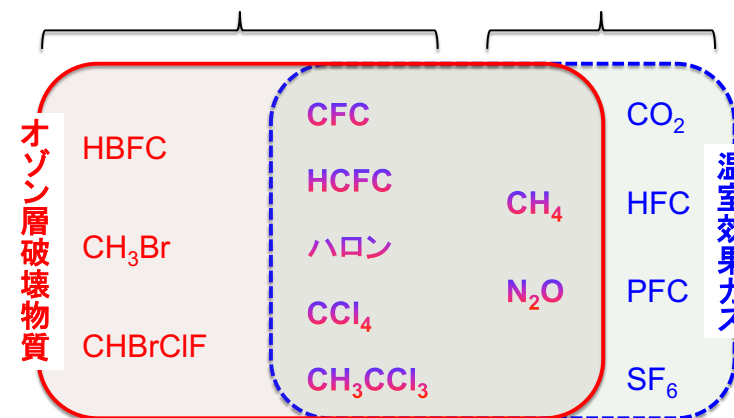
76 2017年度 環境科学概論

早稲田大学創造理工学部

大河内

温室効果ガスとオゾン層破壊物質

モントリオール議定書対象物質 京都議定書対象物質



CFC : クロロフルオロカーボン

HCFC : ハイドロクロロフルオロカーボン

HBFC : ハイドロブロモフルオロカーボン

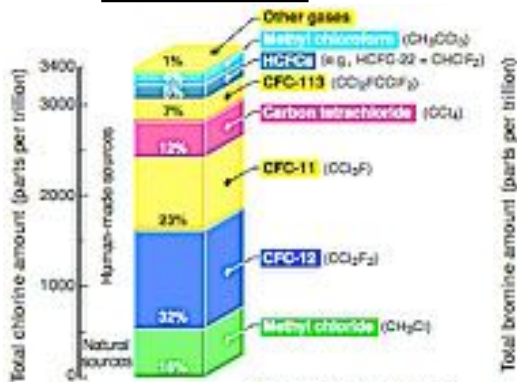
HFC : ハイドロフルオロカーボン

PFC : パーフルオロカーボン

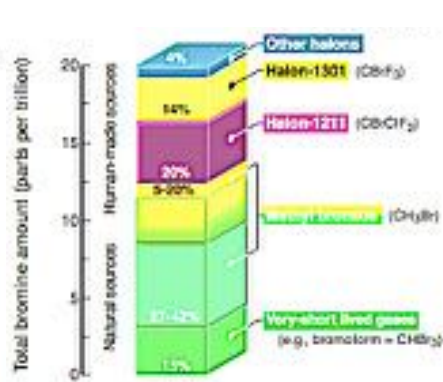
SF₆ : 六フッ化硫黄

成層圏の主な塩素と臭素の起源 1999年

塩素起源ガス



臭素起源ガス



- ・濃度: [Cl] = 170 × [Br]
- ・Cl: 人為起源 > 自然起源 CFC-12, CFC-11, CCl₄
- ・Br: 人為起源 ≒ 自然起源 CH₃Br, Halon-1211, 1301

フロンとその代替物の特性

種 類	オゾン破壊係数 (対 CFC-11)	地球温暖化係数 20年 (対 CO ₂)	地球温暖化係数 100年 (対 CO ₂)	寿命 (年)
CO ₂ (参考)	—	1	1	
CFC				
CFC-11	1	5000	4000	50
CFC-12	1.0	7900	8500	102
CFC-113	0.8	500	5000	85
CFC-114	1.0	6900	9200	300
CFC-115	0.0	6200	9300	1700
HCFC				
HCFC-22	0.055	4300	1700	13.1
HCFC-123	0.02	300	93	1.4
HCFC-141b	0.11	1800	630	9.4
HCFC-142b	0.065	4200	200	19.5
HCFC-225ca	0.025	550	170	2.5
HCFC-225cb	0.033	1700	530	6.6
HFC				
HFC-22	—	9200	12100	250
HFC-32	—	1800	580	6
HFC-125	—	4800	3200	36
HFC-134A	—	3300	1300	14

CFC代替物：ハイドロクロロフルオロカーボン

- ・毒性がないこと
 - ・発火・燃焼性がないこと
 - ・対流圏で適度に分解すること
- cf. 対流圏・成層圏でも分解しない
フルオロカーボン: 赤外線を吸収→地球温暖化



オゾン破壊力: CFC-12の5%
大気寿命: 13年 cf. CFC-12: 195年