

†: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。

気候変動のサイエンス

藤原正智

北海道大学・大学院地球環境科学研究院

2008年12月9日 於 栃木県立小山高等学校

気候変動のサイエンス

1. 地球の概観

太陽系第3惑星・地球ってどんな星？

2. 地球の気候を決める要素

どのような物理的・化学的過程が関わっているのだろう？

3. 気候変動と地球温暖化

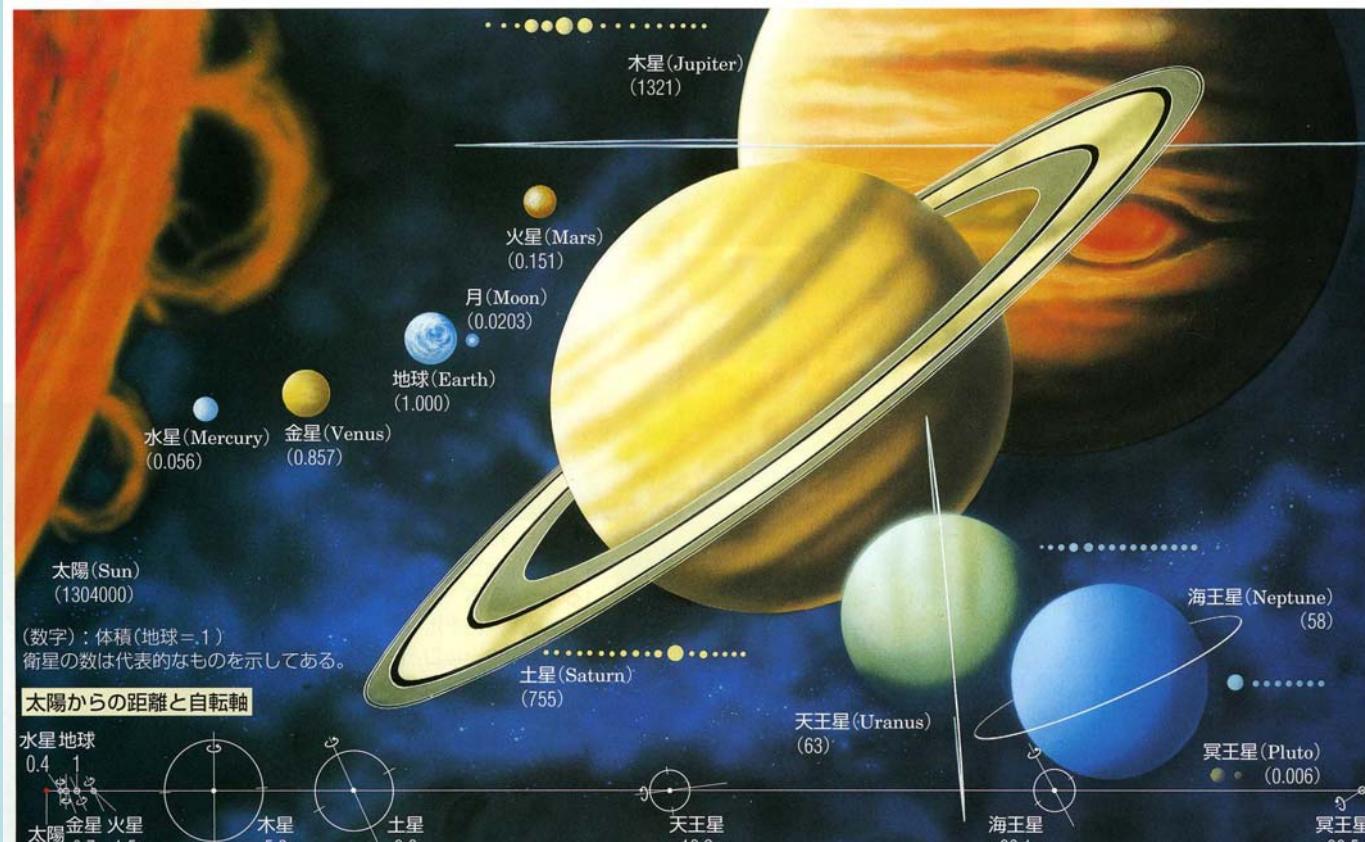
地球が誕生して46億年、地球の気候は実際にどのように変動してきたのだろう？ また、近年100～200年の気候変化は本当に人間活動によるものなのだろうか？

4. 気候変動の監視～世界の人々の取り組み～

誰がどのようにして我々の地球を実際に監視しているのだろう？

1. 地球の概観

太陽系第3惑星・地球ってどんな星？



太陽系を構成する天体

惑星	9個。水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星(1781)、海王星(1846)、冥王星(1930)。()は発見年。
小惑星	軌道が確定し登録番号のあるものは8万個を超える。主として火星と木星の軌道の間に点在する。
衛星	139個以上。(地球1、火星2、木星63、土星33、天王星27、海王星13、冥王星1)。
彗星	数千個。軌道計算のされたもの1462個。このうち周期200年以内の短周期彗星273個。



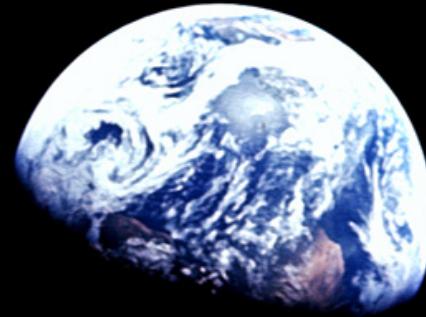
制限資料

浜島書店

「ニューステージ地学図表」
より

宇宙から見た地球の特徴は？

- 巨大な衛星、月の存在
- 大気の存在(青色部)
- H_2O の雲の存在(白色部) cf. 月面
- 広大な海洋(液体の H_2O)の存在
- 大陸とプレートテクトニクス
- 強い磁場の存在(内部に液体鉄)
- 酸素(O_2)主成分の大気
- オゾン(O_3)層の存在
- 生命の存在/人類・知性の存在



“Earth Rise” : December 1968, Apollo 8

月(38万km)上空から見た地球(アポロ8号: 初の月周回) — 写真右上より太陽光

<<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/archivepix.html>>, <<http://www.skyimagelab.com/ap8earris.html>>

地球半径: 6370 km

対流圏の厚さ: ~10 km

大気圏の厚さ: ~100 km

海洋の平均水深: ~4 km

(cf. 北海道: ~400 km × 400 km)

1997年8月 台風“Winnie”（スペースシャトル Discovery、高度300～500 km）
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/archivepix.html>

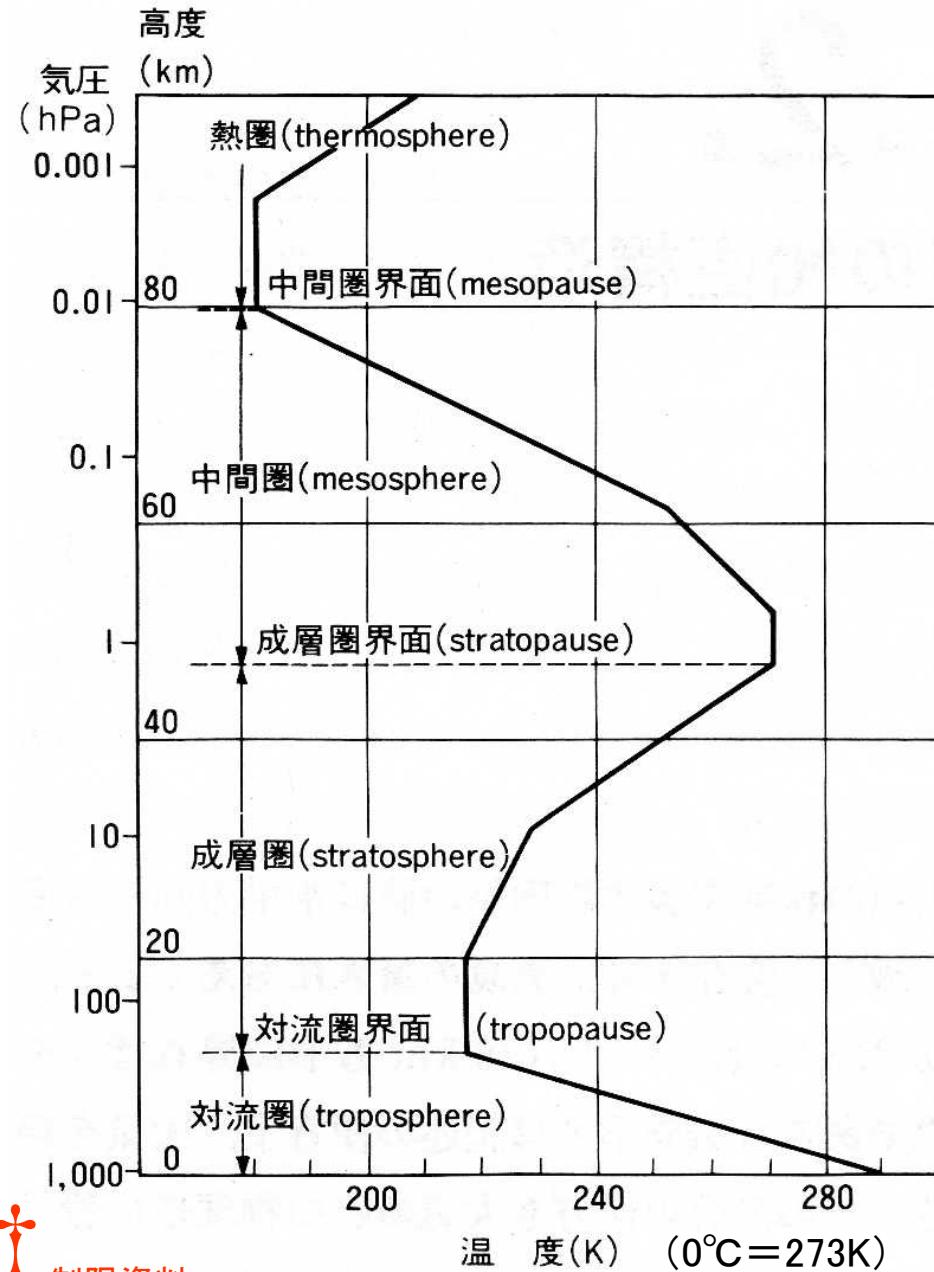
成層圏

対流圏界面

対流圏

(2000年4月、ベトナム・ラオス・カンボジア国境付近、旅客機(高度約10km)より撮影)

大気の温度構造



[熱圈]

数100kmにわたり極めて高温(分子運動活発)
ただし、空気は希薄(気圧極低)
電離層の存在、オーロラの存在
(太陽からのプラズマ粒子が大気分子に作用)

[成層圏・中間圏]

オゾン層が存在し太陽紫外線を吸収
→ 気温極大層を形成
・雲は基本的には存在しない
・対流活動がない代わりに波動活動あり
・火星や金星にはオゾン層がない
→ 気温極大層ない

(ジャンボジェット機～10-11 km)

[対流圏]

気温減率～ $6^{\circ}\text{C}/1\text{ km}$

鉛直対流運動活発 → 雲(積乱雲)が存在



制限資料

地球大気の成分

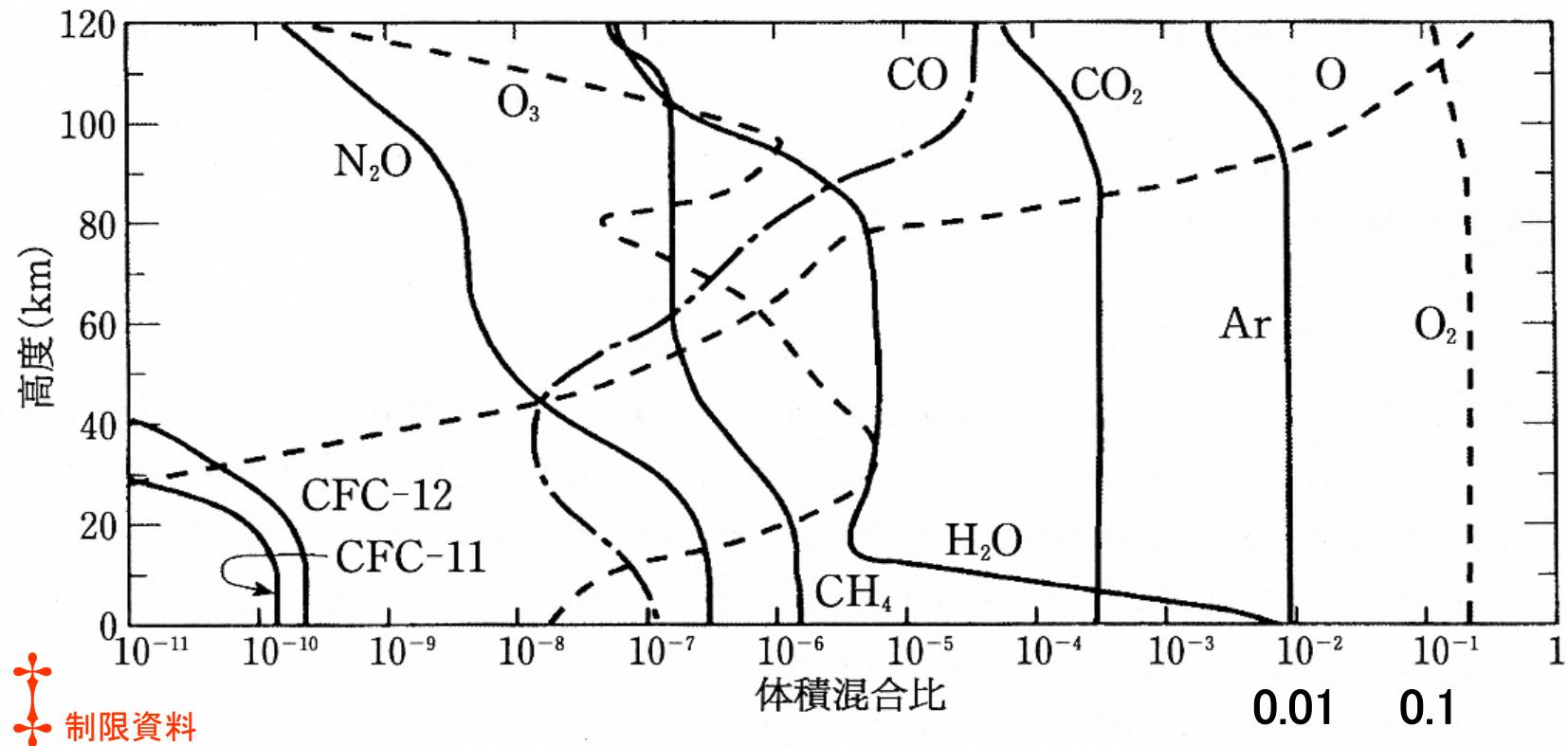


図 A-9 現在の地球大気の組成(Goody, 1995)。春分・秋分時。N₂(高度 100 km 以下では 0.78 で一定)以外の主要な大気成分を示す。CFC-11 は CFCl₃, CFC-12 は CF₂Cl₂ のことである。

(北海道大学大学院環境科学院編、オゾン層破壊の科学、北海道大学出版会)
(原図:Figure 1.1 (p.8), "Principles of Atmospheric Physics and Chemistry", by Goody, Richard, 1996.
"By permission of Oxford University Press, Inc")

大気の主成分: N₂(78.084%)、O₂(20.946%):

長波放射(赤外線)と相互作用しない、化学反応しない

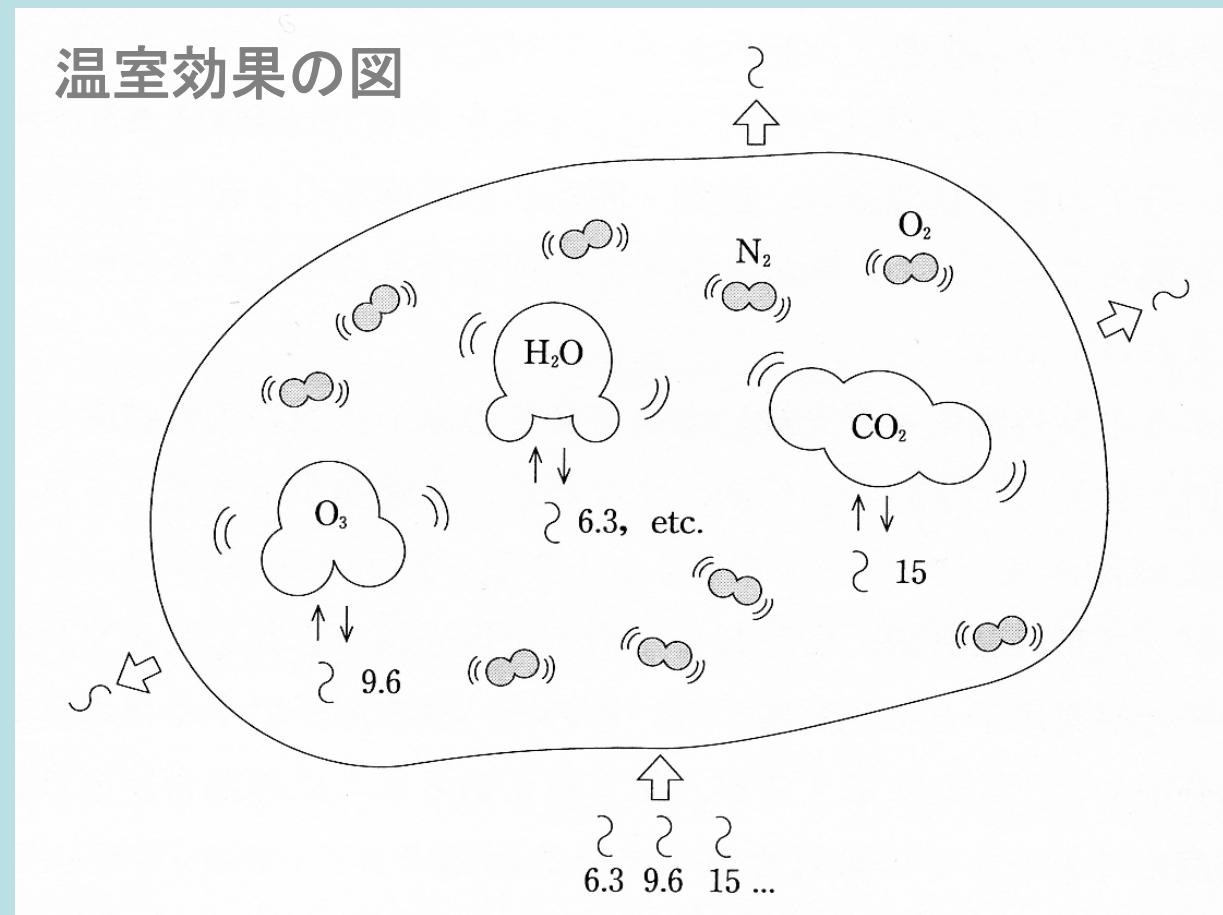
大気の微量成分: 短波放射・長波放射と相互作用する、化学反応する

(紫外線・可視光線・近赤外線)

原図: © Oxford University Press, Inc

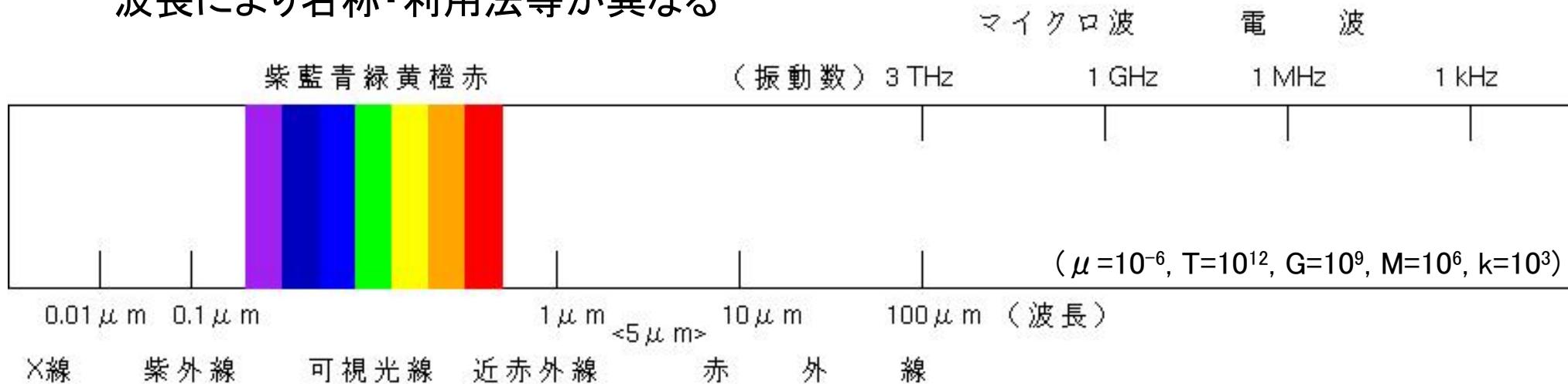
2. 地球の気候を決める要素

どのような物理的・化学的过程が
かかわっているのだろう？



短波放射(太陽放射)と長波放射(地球放射)

- 放射=光=電磁波:
真空中を光速約 3×10^8 m/sで進む電磁波。波動性と粒子性(“光子”)の二面性を持つ。
波長により名称・利用法等が異なる



- プランクの法則
物体は自分自身の温度に対応した光・放射(波長・エネルギー)を出す
(色(=波長)で温度が分かる、高温ほど短波長)
<例> 太陽(恒星)、白熱電球 : 紫外線～可視光線～近赤外線
人間、動植物、地球大気・地表: 赤外線
宇宙背景放射(3K)ビッグバンの名残り : マイクロ波($\sim 1\text{ mm}$ 、 $\sim 300\text{ GHz}$)
(19世紀末、鉄鋼業の発展(溶鉱炉)やエジソンによる白熱電球の発明)

短波放射(太陽放射)と長波放射(地球放射)

地球大気・地表系のエネルギーの源は太陽からの光である

太陽放射(短波放射)：太陽表面温度5800K ($0^{\circ}\text{C} = 273\text{K}$, $5800\text{K} \sim 5500^{\circ}\text{C}$)

紫外線($<0.36\text{ }\mu\text{m}$) ($\mu = 10^{-6}$) : O_3 層などにより吸収

可視光線(青: $0.48\text{ }\mu\text{m}$ 、緑: $0.53\text{ }\mu\text{m}$ 、赤: $0.7\text{ }\mu\text{m}$) : O_2 や N_2 等により一部散乱
他は地表を暖める

近赤外線($1 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$) : H_2O などにより一部吸収
他は地表を暖める

地球からも宇宙へ光の形でエネルギーを捨てることで、
エネルギー収支を保っている(温度をほぼ一定に保っている)

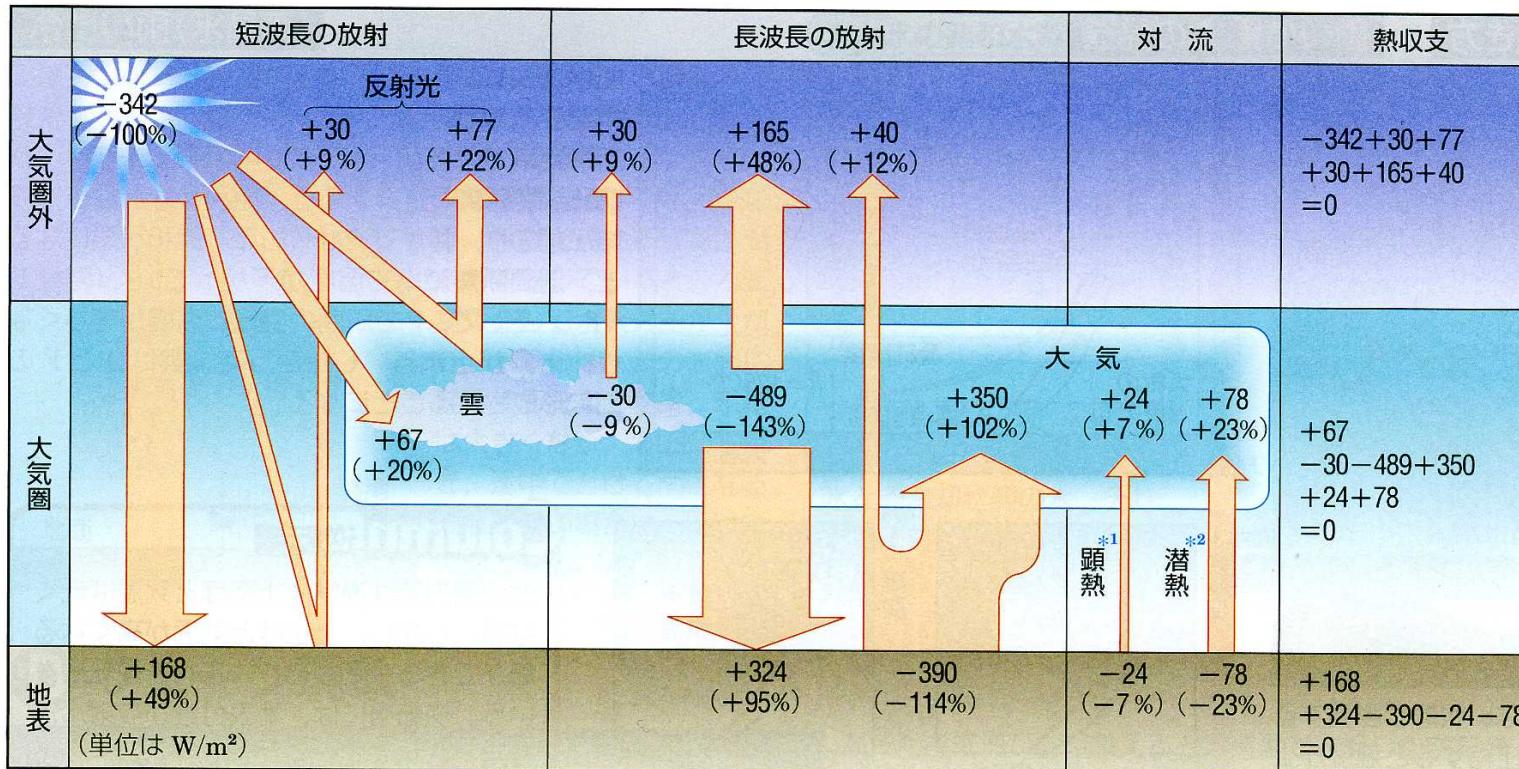
地球放射(長波放射)：地表・大気温度200～300K

赤外線($5 \sim 100\text{ }\mu\text{m}$)：温室効果ガス(H_2O , CO_2 , O_3 , ...)により吸収・射出

下向き射出分の一部が再度地表を暖める(温室効果)

地球大気・地表系のエネルギー収支

C 地球全体の熱収支



地球は絶えず太陽放射を受けているが、地表や大気の温度は安定している。これは、地球放射により太陽放射と等量のエネルギーが大気圏外へと放射され、地球全体の熱収支がつり合った放射平衡の状態にあるからである。このつり合いは、地表と大気圏のそれぞれで成り立っている。

*1 顯熱: 温度を変化させる熱
*2 潜熱: 相変化にともなう熱



制限資料

・短波放射エネルギーのうち:

浜島書店「ニューステージ地学図表」より

3割: 雲・大気・地表面により宇宙へ反射(“散乱”)

2割: 大気(微量)成分(O_3 、 H_2O 、雲、塵・ダスト・エアロゾル)により吸収(大気を加熱)

5割: 地表面に到達し地表面を加熱する

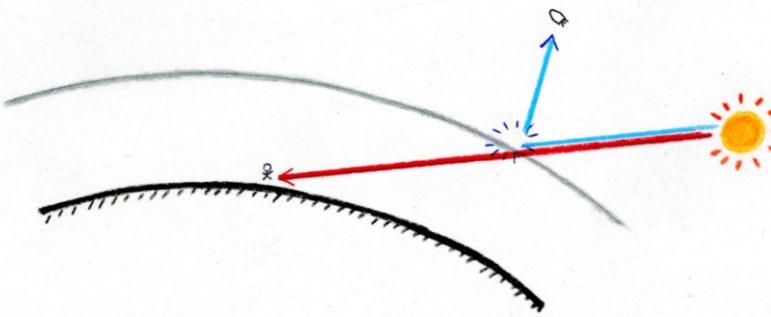
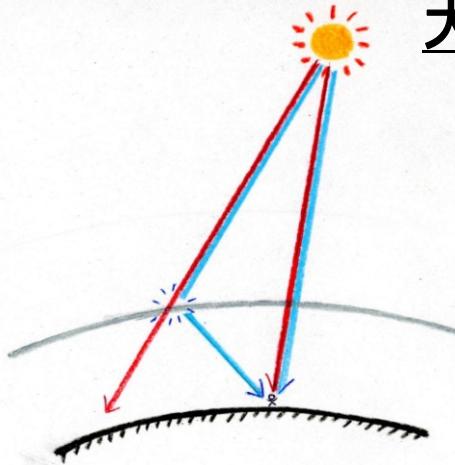
・大気微量成分(H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 CH_4 、 N_2O 、フロンなど)や雲やエアロゾル:

赤外線を吸収・射出する性質(温室効果=赤外線閉じ込め効果)を持つ

→ 大気からの下向き長波放射も地表面を加熱(短波放射の2倍の加熱量!)

→ 地表温は大気がない場合よりも昇温している($-20^\circ\text{C} \rightarrow +15^\circ\text{C}$)

大気による太陽光の散乱と空の色・雲の色



大気分子による太陽光散乱
→ “レイリー散乱”過程

- ・強度は波長の4乗に反比例
- ・赤い光よりも青い光の方が5倍近く強く散乱される

雲粒子による太陽光散乱

- “ミー散乱”過程
- ・波長依存性弱い → 白色



1996年9月 イタリア・ヴェネツィア
(運河都市、迷路の街)

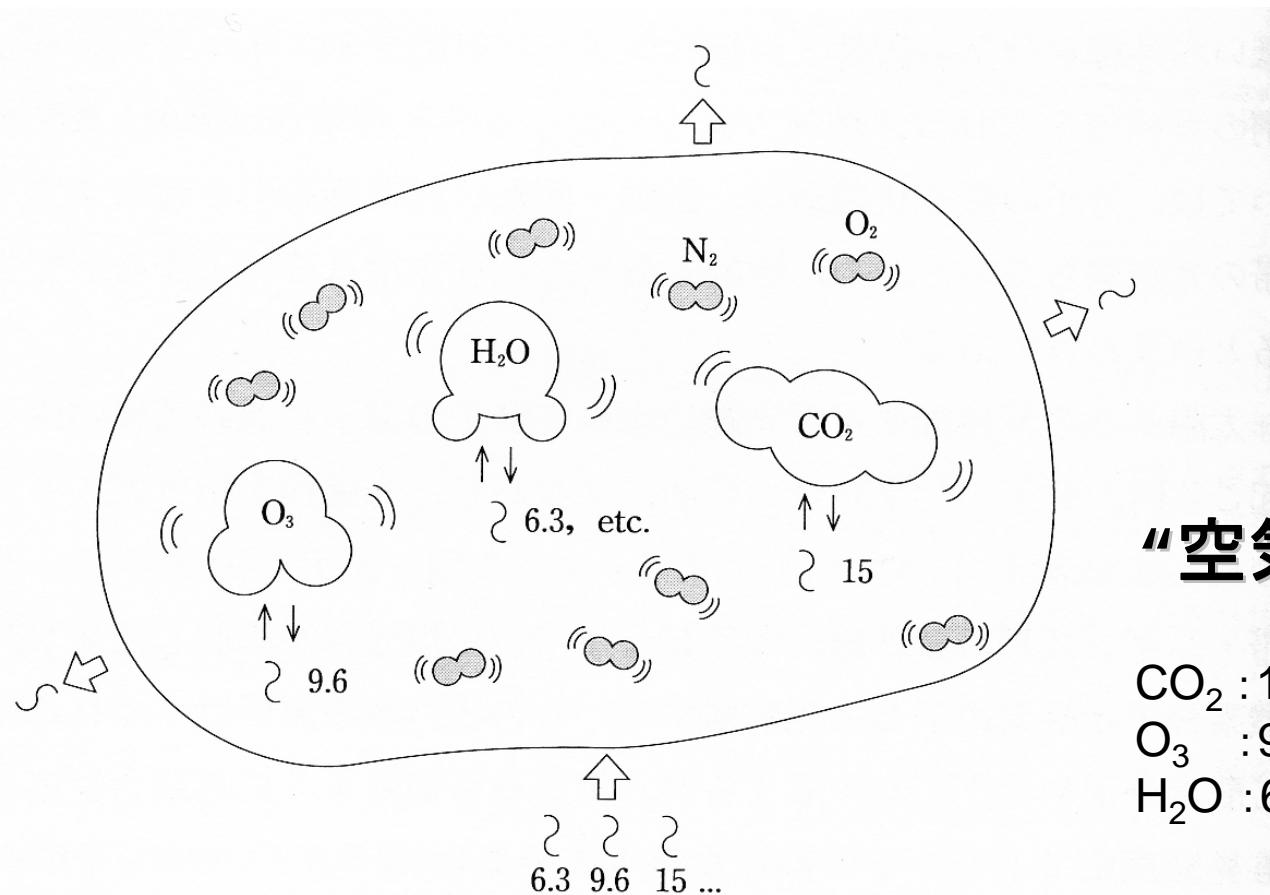


2004年12月 ミクロネシア連邦・チューク
(熱帯西太平洋、グアムの南、北緯7度)



温室効果：大気分子による赤外線閉じ込め効果

- 3原子以上の分子(H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 CH_4 、 N_2O 、CFCなど)は、振動・回転状態の遷移に伴い、固有の波長の赤外放射を吸収・射出する性質を持つ
- 地表から出た赤外放射は、大気中の上記分子に吸収・射出を受け、一部は地表を再度暖める(温室効果)→結果的に地表温は大気がない場合よりも上昇している。



“空気塊”的図

CO_2 : $15 \mu\text{m}$ 帯

O_3 : $9.6 \mu\text{m}$ 帯

H_2O : $6.3 \mu\text{m}$ 帯、回転帯($>10 \mu\text{m}$)

図 5-1-3 局所熱力学平衡(LTE)にある空気塊における赤外線の出入りの様子。図中の数値の単位は μm 。~印は光子を表わす。詳しくは本文を参照のこと。

地球の気候を決める 基本定数および物理・化学過程

- 太陽定数(太陽表面温度、地球・太陽間距離(地球公転軌道))
- 地球公転速度、地球自転軸と公転面の傾き("地球軌道要素")
- 地球半径・質量、自転速度 → 重力とコリオリ力(転向力)
- 大気総量、**大気組成**(温室効果気体、エアロゾル、雲)
- 気温気圧分布(大気安定度)、水蒸気量(潜熱)、粘性(乱流)
- 地表面状態(海陸、植生、雪氷等の分布
→ 放射的、熱的、力学的特性)
- 大気海洋相互作用、大気陸面(生物圏含む)相互作用、
大気雪氷相互作用、海水海洋相互作用
- **海洋深層循環**
- 火山噴火、隕石衝突...

ちょっとブレイク

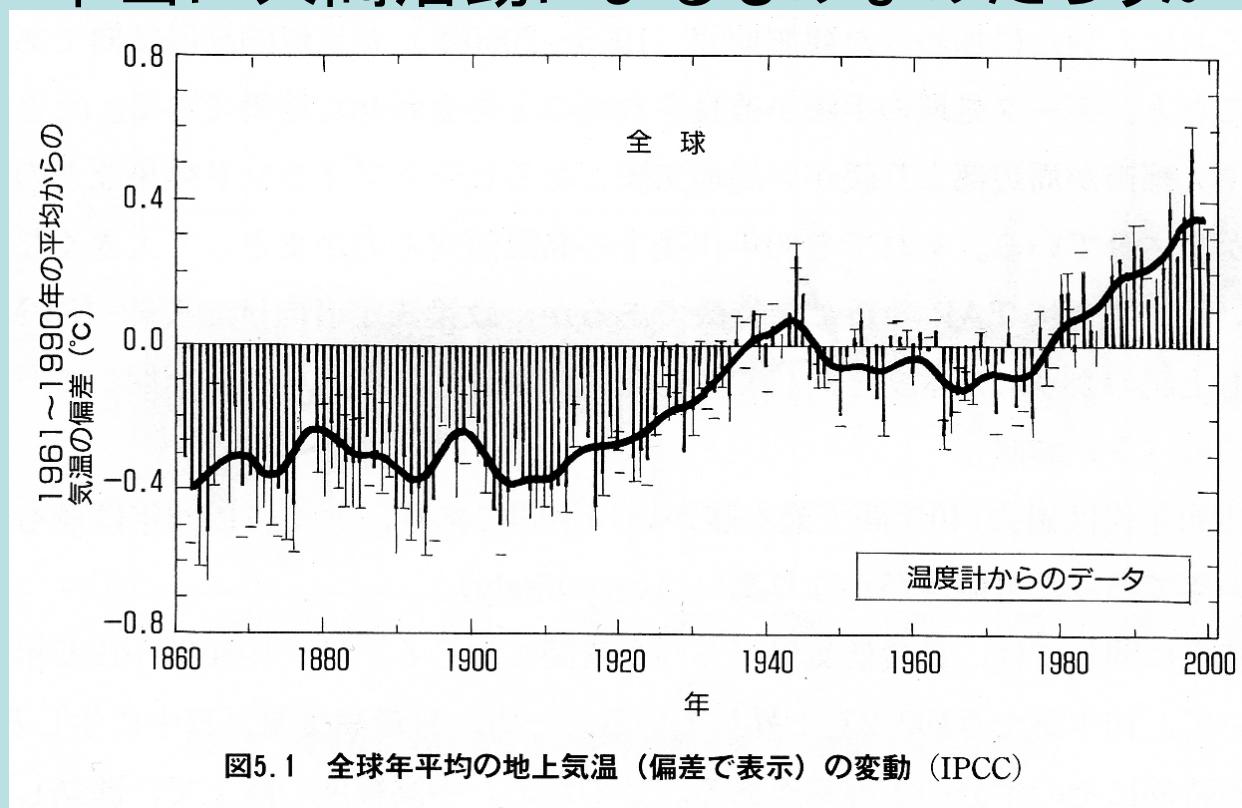
- ここまで何か質問？
- さてクイズです！
- 地球は46億年の歴史を持っていますが、遠い昔にも気候変動はあったと思いますか？
- あつたとすれば地表気温の変化はどれくらいだったと思いますか？ (0.1°C
1°C 10°C 100°C)
- 地球温暖化は実際に起こっていると思いますか？ 実感しますか？
- 地球温暖化が起こっていると思う人は、それが人間活動を原因するものだと思いますか？ それとも自然変動の範囲だと思いますか？
- “科学者”にどういうイメージを持ちますか？ 彼らの言うことは全面的に信頼できると思いますか？ そもそも“科学”とはどういうものだと思いますか？



3. 気候変動と地球温暖化

地球が誕生して46億年、地球の気候は
実際にどのように変動してきたのだろう？

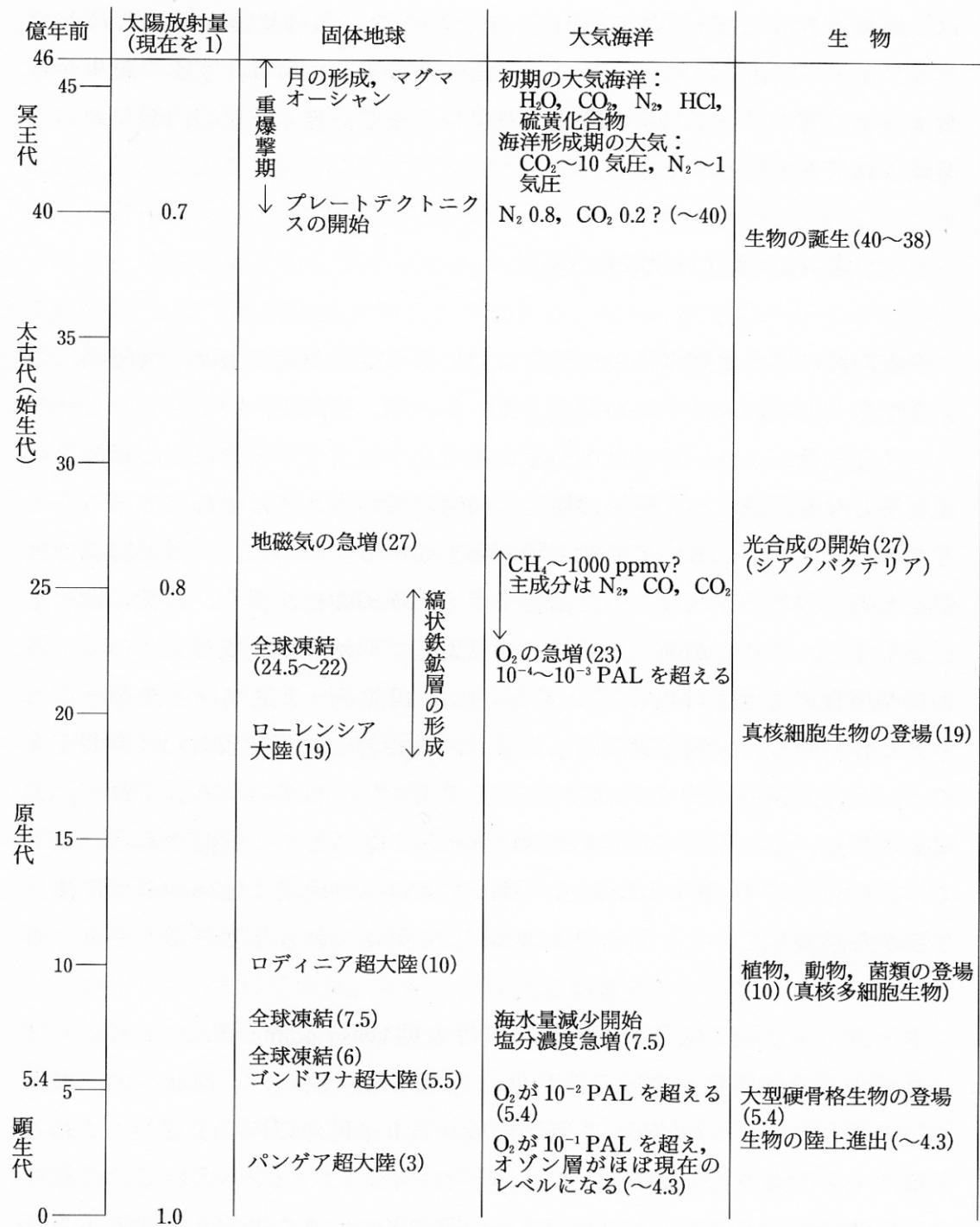
また、近年100～200年の気候変化は
本当に人間活動によるものなのだろうか？



（近藤洋輝著、地球温暖化予測が分かる本、成山堂書店、原典はIPCCより）

地球史46億年

7大事件



制限資料

図 A-1 地球史 46 億年のおもなできごと。()内の数値の単位は億年前 (北海道大学大学院環境科学院編、オゾン層破壊の科学、北海道大学出版会)

(1) 46億年前
太陽系と地球の誕生

(2) 40億年前
原始海洋の誕生
プレートテクトニクス
生命誕生

(3) 27億年前
強い磁場の誕生
酸素発生型光合成

(4) 19億年前
真核生物の誕生
初めての超大陸

(5) 7.5~5.5億年前
マントルへ海水注入
硬骨格生物出現
全球凍結?

(6) 2.5億年前
最大の生物大量絶滅
(古生代ー中生代境界)

(7) 700万年前
人類の誕生

過去の気候変動(地質時代)

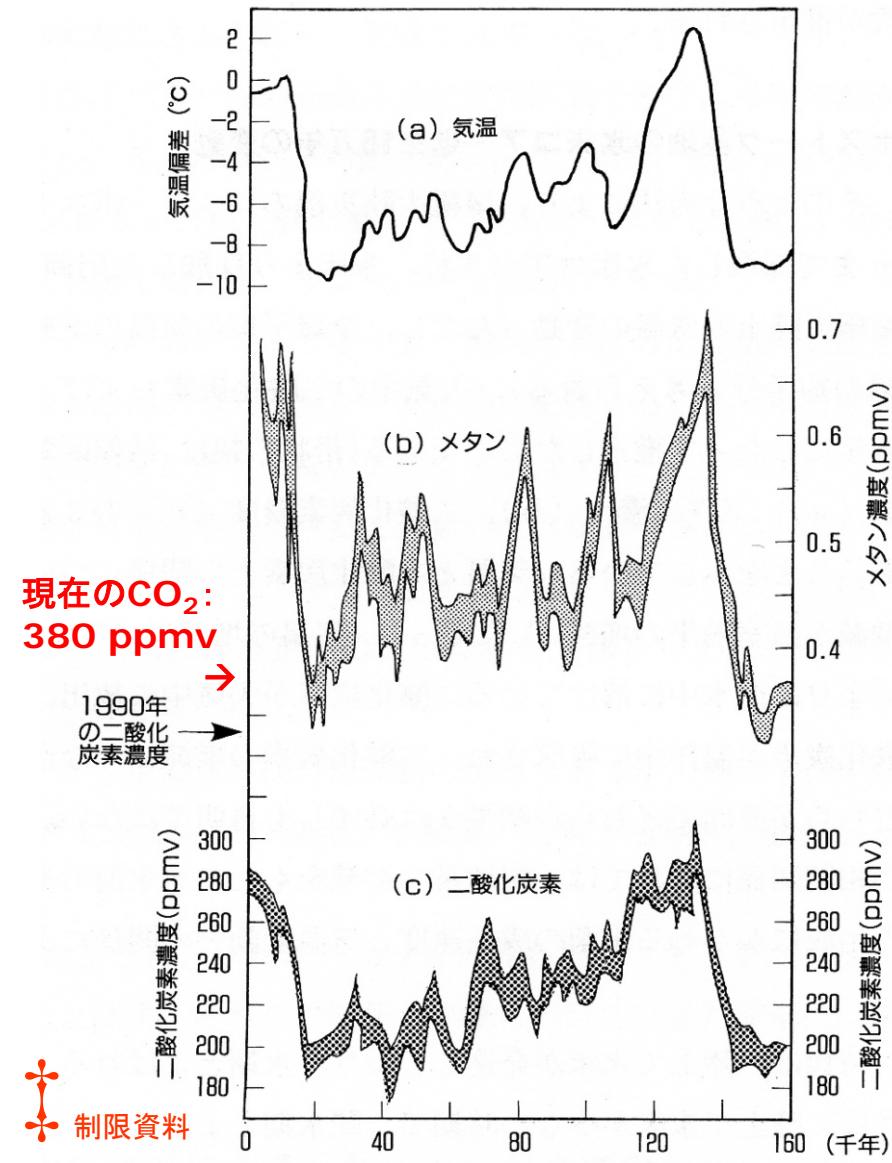
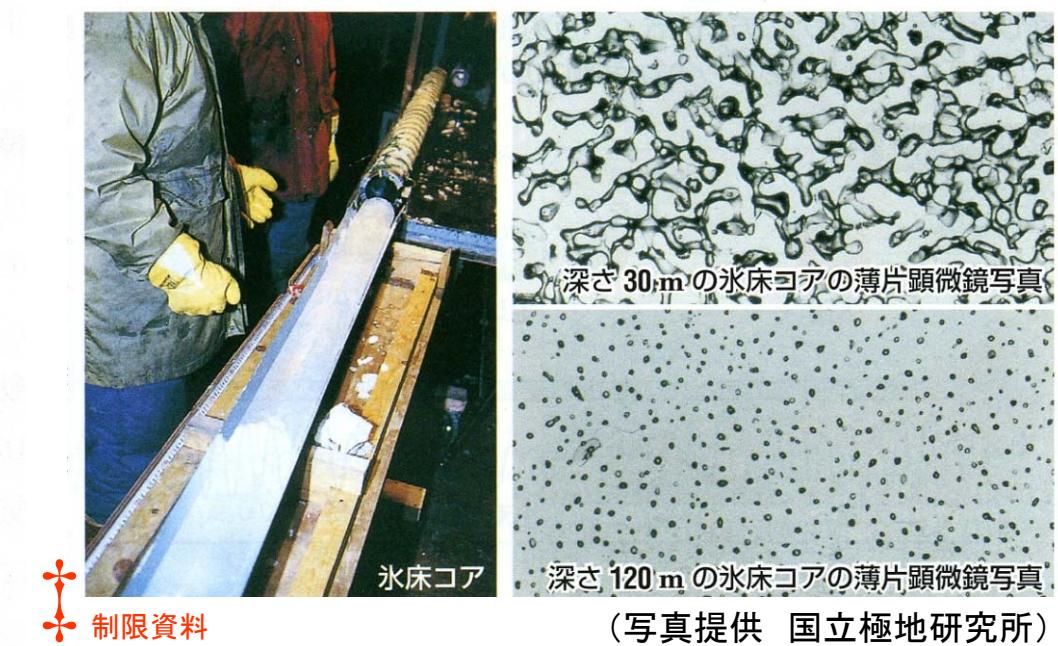


図5.10 氷床コアによる過去16万年の変動 (IPCC / FAR)

南極大陸東部のロシア・ボストーク基地における、深さ2000mまで採取した氷床コアの分析結果。

(近藤洋輝著、地球温暖化予測が分かる本、成山堂書店、原典はIPCCより)



- ・氷に含まれる酸素の同位体(^{18}O , ^{16}O)の組成比→氷のもととなった降水や雪が生成した場所の気温と相関
- ・気温、メタン濃度、二酸化炭素濃度、かなりよい相関
- ・気温と二酸化炭素:因果関係は不明(どちらが原因?)
- ・気温とメタン:メタン発生に関わる嫌気性細菌の活動性とその生息域である湿地帯面積(氷河と関係)が気温依存

★最終氷期(12万年前～1.8万年前)、10°Cの増加

過去の気候変動(観測時代)

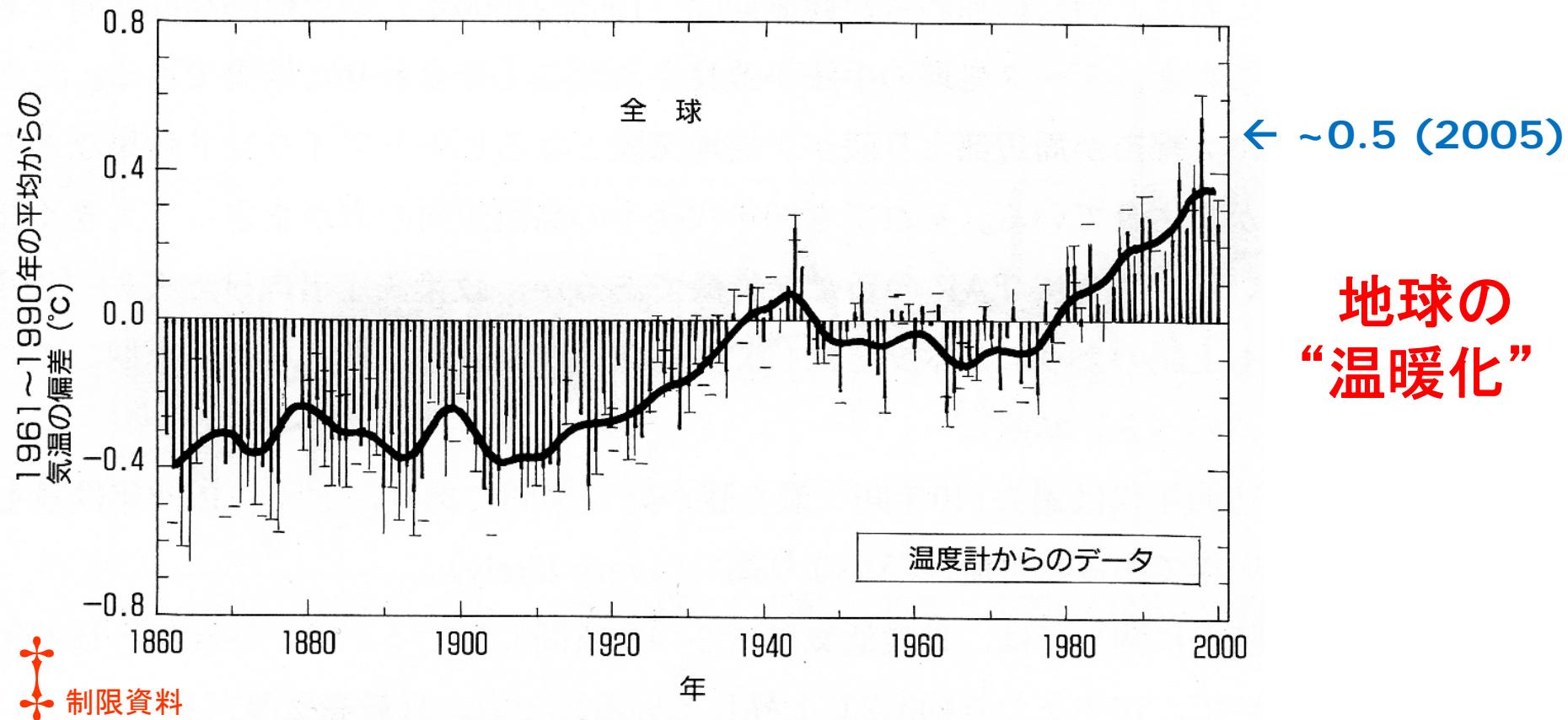


図5.1 全球年平均の地上気温（偏差で表示）の変動（IPCC）

1861～2000年の140年間の全球平均の地上気温変動。
1961～1990年の30年平均からの偏差として表示。

(近藤洋輝著、地球温暖化予測が分かる本、
成山堂書店、原典はIPCCより)

- ・1910～1945年、1976～2000年に上昇著しい。
- ・1945～1970年頃は下降傾向(第二次大戦後に
工業活動活発化→エアロゾル増大→地球寒冷化?)

・過去100年間(~2005)で、+0.74°Cの昇温！

最近1000年間の温室効果ガスの変化

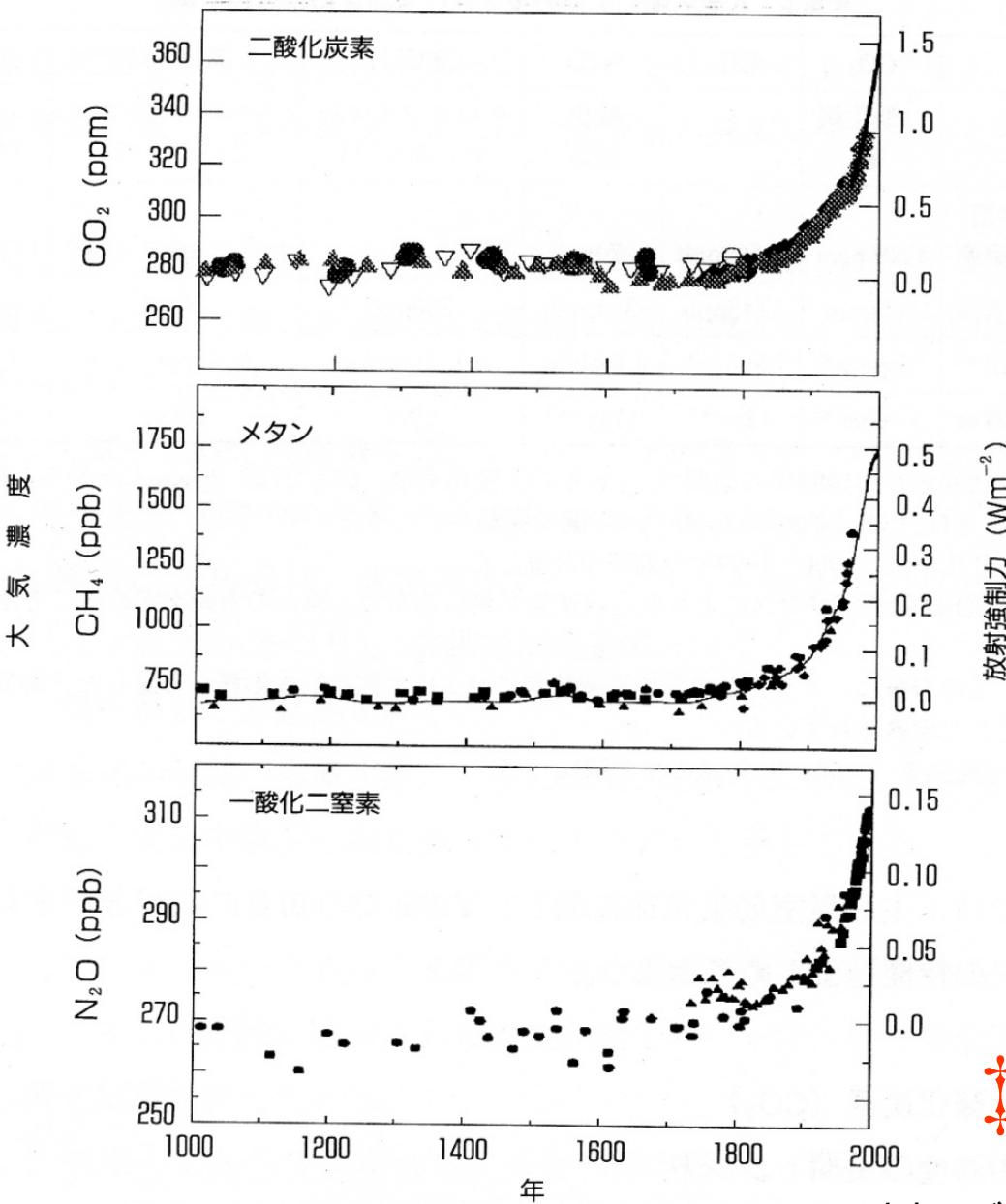


図6.1 主要な温室効果気体の大気中濃度の変動
各印は観測点を区別している (IPCC / TAR)

★18世紀後半の産業革命以降、急増

CO₂: 産業革命以降3割増大
化石燃料燃焼+セメント生産による排出

CH₄: 産業革命以降2.5倍増大
湿地等・人間活動(農業・畜産、天然ガス、ごみ埋立)

N₂O: 産業革命以降2割弱増大
土壤微生物(特に熱帯)、海洋、燃焼、肥料

O₃: 対流圏では全球的な大気汚染の進行に伴い
この100年間で増加
成層圏ではフロンによりここ30年減少

→ 人間活動による温室効果ガスの増加



制限資料

南極・グリーンランドの氷床コア等の分析+最近数10年の直接測定
(近藤洋輝著、地球温暖化予測が分かる本、成山堂書店、原典はIPCCより)

人間による気候の“改変”？ 1/5

- ☆ 地球が“温暖化”しているのは事実である(全球平均で100年に+0.74°C)
- ☆ 温室効果気体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、対流圏 O_3 、などなど)が、産業革命以降、主として人間活動によって増加しているのも事実である
- ★ では、この温室効果気体の増加が、地球温暖化の“原因”であると本当に言える？
- ★ 反論1：
地球温暖化は、気候システムの持つ内的変動の範囲内なのではないか？
- ★ 反論2：
地球温暖化は、自然起源の外的変化要因(太陽活動の変動、火山噴火)によるものではないか？
- ☆ 地球の“気候システム”的変動をなす物理的・化学的過程はたくさんあり、複雑に絡み合っている
→ “因果関係”をたしかめるには、“実験”をするしか方法はない

人間による気候の“改変”？ 2/5

★ どのようにして“実験”をする？

→ “気候モデル”と呼ばれるコンピュータプログラムを用いた“数値実験”

★ “天気予報モデル”、“気候モデル”とは？

地球の気象・気候の変動をなう物理過程・化学過程を数式

(時間発展微分方程式)で表現し、初期条件・境界条件を与えて積分計算する。
最新のスーパーコンピュータが用いられる。

★ 「天気予報もなかなかあたらないのに . . . ?」

→ 天気予報：ある日ある時ある場所の天気(晴れ・くもり・雨など)を
ぴったり当てようとする(初期条件が非常に大事)

→ 気候再現・気候予測：過去/将来のある時期の“天気の傾向”(=“気候”)
を扱う(境界条件・外的条件が非常に大事)

★ 地球温暖化の原因の特定、および、将来の気候予測

世界の14~19の“気候モデル”を用いた“数値実験”によっている。

外的条件(自然起源・人間活動起源)を変えることで、原因を特定する。
異なるモデルは異なる結果を示すが、おおよそ同様な傾向を示している。

人間による気候の“改変”？ 3/5

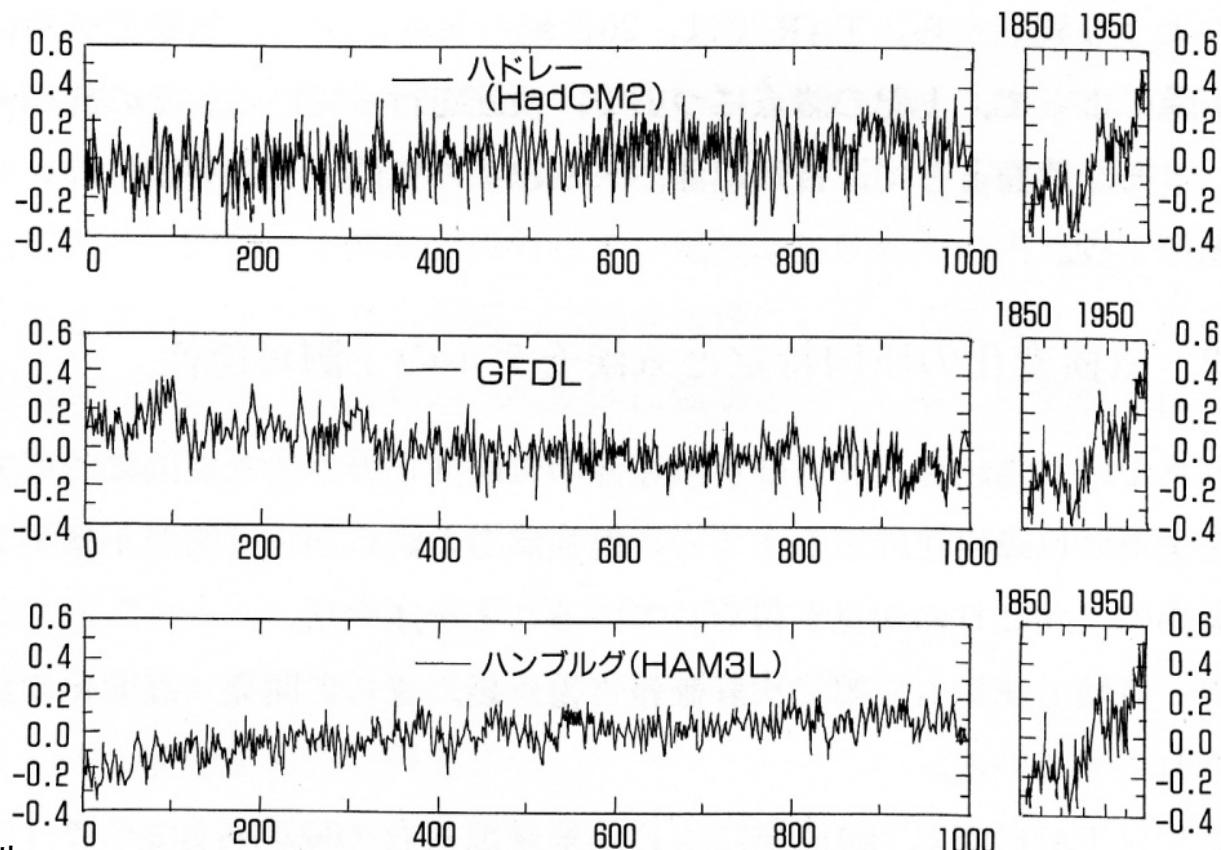
★反論1：地球温暖化は、気候システムの持つ内的変動の範囲内なのではないか？

→ 気候モデルに、自然起源・人為起源の外的な変化要因（太陽活動変化、火山噴火、温室効果物質変化など）を与えないで、1000年間計算する。
（“Control Simulation Experiment”と呼ぶ。）

→ 年々、10年程度の“変動”は示すが、20世紀の100年間に見られたような大きな“変化傾向”は示さない

→ つまり、20世紀の温暖化は
(気候モデルが正しければ)

内的変動の範囲「外」である



・ハドレー：英国ハドレセンターの気候モデル

・GFDL：米国地球流体力学研究所の気候モデル

・ハンブルグ：ドイツ・マックスプランク研究所の気候モデル

(近藤洋輝著、地球温暖化予測が分かる本、成山堂書店、

原典はIPCCより)

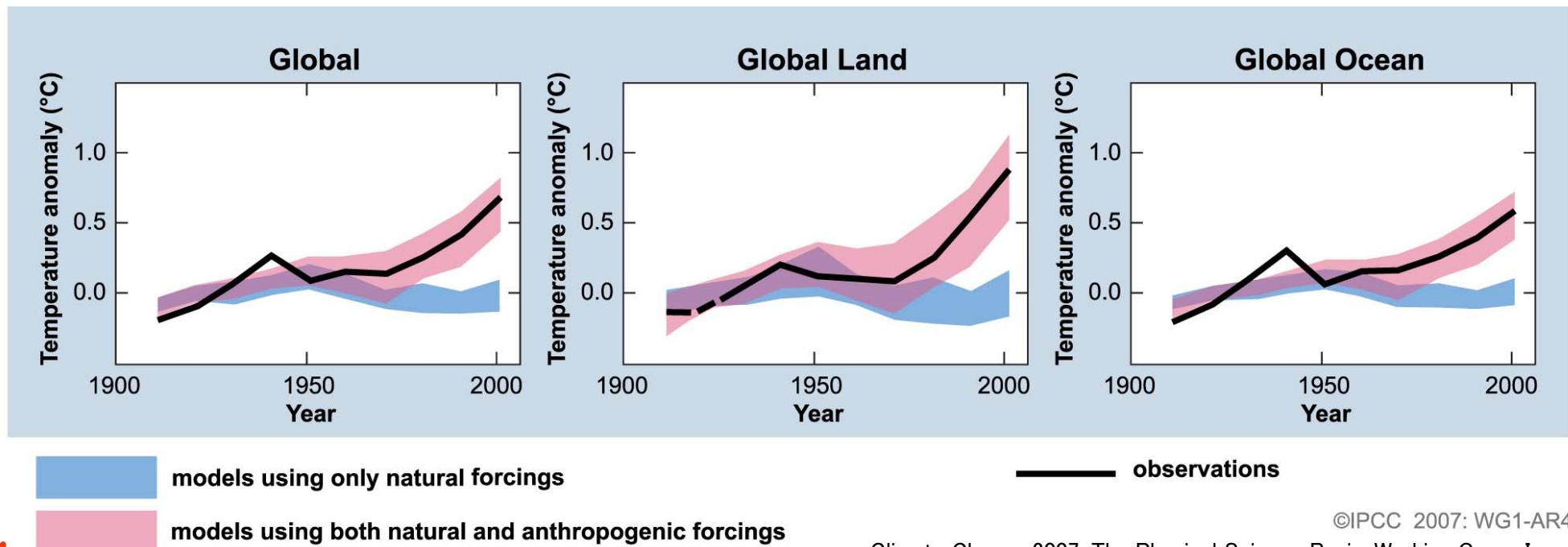
人間による気候の“改変”？ 4/5

★反論2: 地球温暖化は、自然起源の外的変化要因(太陽、火山)によるものではないか？

→ 気候モデルを用いて次の2種類の気候再現実験を行う

(1) 自然起源の放射強制力(太陽活動変動、火山噴火など)だけを考慮する

(2) 自然起源と人間活動起源(温室効果気体・エアロゾルの増大)の両方を考慮する



©IPCC 2007: WG1-AR4

Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Figure SPM.4. Cambridge University Press.



→ 自然起源だけでは特に20世紀後半の昇温が再現できない

人間活動起源も考慮すると、観測を大変よく再現

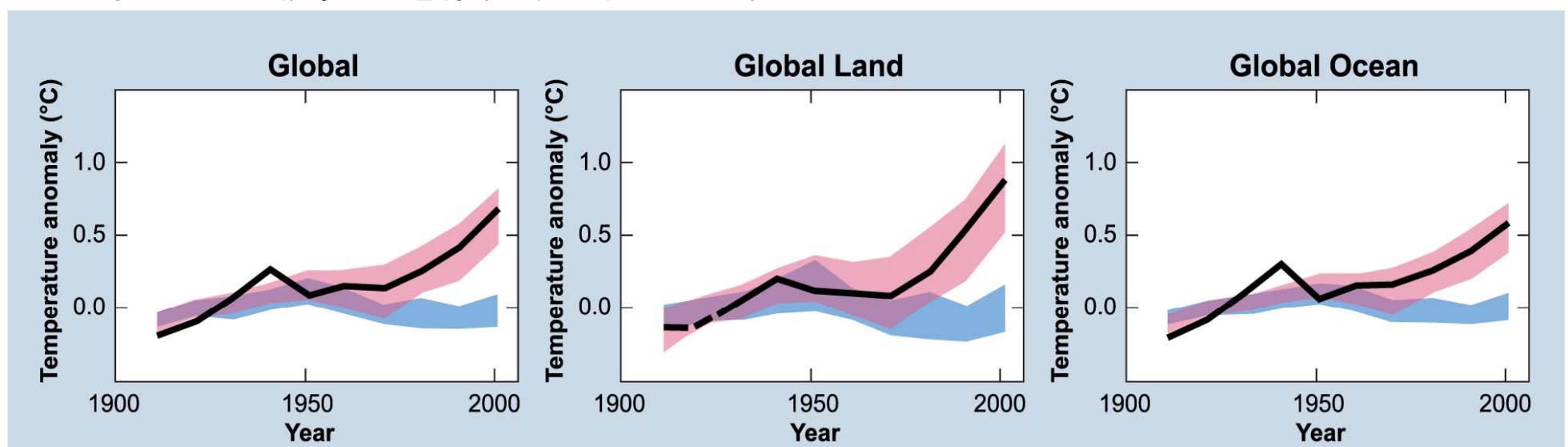
(同時に、気候モデルが過去の気候変化をよく再現する能力があることも示せた)

人間による気候の“改変”？ 5/5

★結論

以上の、最新の気候モデルを用いた注意深い数値実験により、
20世紀の温暖化は、人間活動起源の温室効果气体の増加の効果が、自然起源の効果(や人間活動起源エアロゾル増加の効果)を上回った結果であることが、示された。

さらに、最新の気候モデルが20世紀の気候変化を再現できること、従って、将来の気候変化を推定する能力があることも、示された。



models using only natural forcings

models using both natural and anthropogenic forcings

observations

©IPCC 2007: WG1-AR4

Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Figure SPM.4. Cambridge University Press.

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

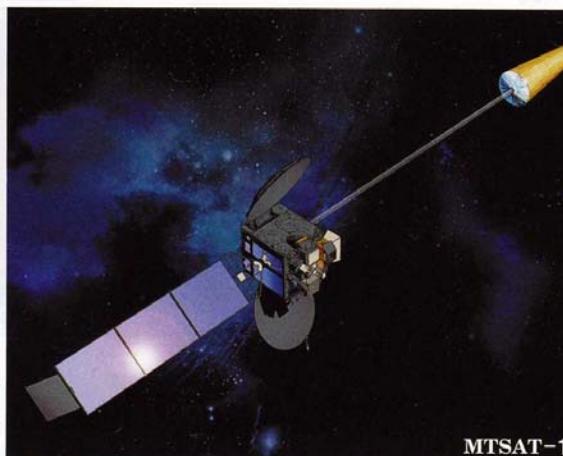
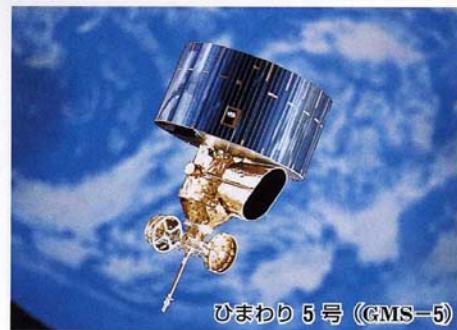
- 1988年、世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)のもとに設立
- 第一作業部会： 気候変化の科学的根拠、全球・地域別の気候変化予測
- 第二作業部会： 生態系、社会経済等への影響、適応性や脆弱性の評価
- 第三作業部会： 気候変化緩和策(対応戦略)に関する科学技術、環境、社会経済それぞれの面からの評価； 排出シナリオなど
- 第一次評価報告書(1990)：
「人間活動による温室効果気体による気候変化の可能性を警告」
- 第二次評価報告書(1995)：
「観測によると、人間活動の影響が全球の気候に現れている」
- 第三次評価報告書(2001)：
「地球温暖化の原因は人間活動である可能性が高い」
- 第四次評価報告書(2007)：
「温暖化は疑う余地がない。その原因是人間活動である(とほぼ断定)」
「20世紀末に比べて21世紀末には平均気温1.8～4.0°C上昇、
海面水位18～59cm上昇。 また、台風が強まり、積雪面積や海水は縮小」

4. 気候変動の監視 ～世界の人々の取り組み～

誰がどのようにして我々の地球を
実際に監視しているのだろう？

気象・気候監視のための観測手法

気象衛星観測



「MTSAT-1R」は打ち上げが遅れているため、現在は一時的にアメリカの静止気象衛星「GOES-9」が「ひまわり」の気象観測業務を引き継いでいる。

気象庁提供

レーダー気象観測

著作権処理の都合で、この場所に挿入されていた図版を省略させて頂きます。

気象レーダーはマイクロ波の反射により、どこでどの程度の強さの雨や雪が降っているかを観測する。富士山レーダーは、本州南方海上の台風と広い範囲の雨を観測してきた。しかし、気象衛星による台風の早期探知が可能になり、観測業務を停止した。雨の観測については静岡県牧ノ原と長野県車山で新たな気象レーダーが運用されている。

地上気象観測



Automated(自動化された)
Meteorological(気象の)
Data(データ)
Acquisition(取得)
System(システム)

高層気象観測



海洋気象観測



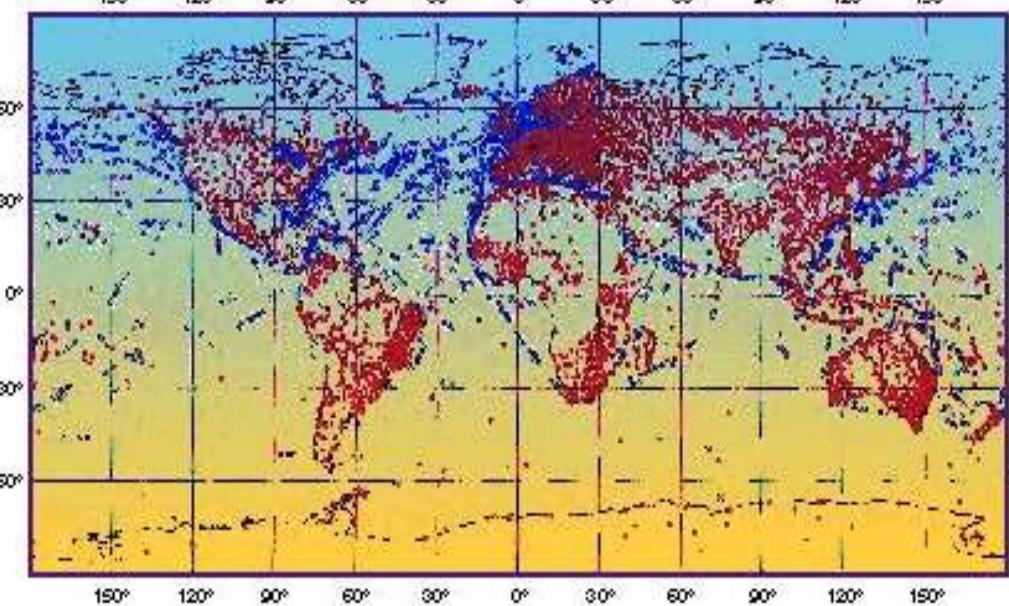
浜島書店
「ニューステージ
地学図表」
(図版は気象庁の
提供による)



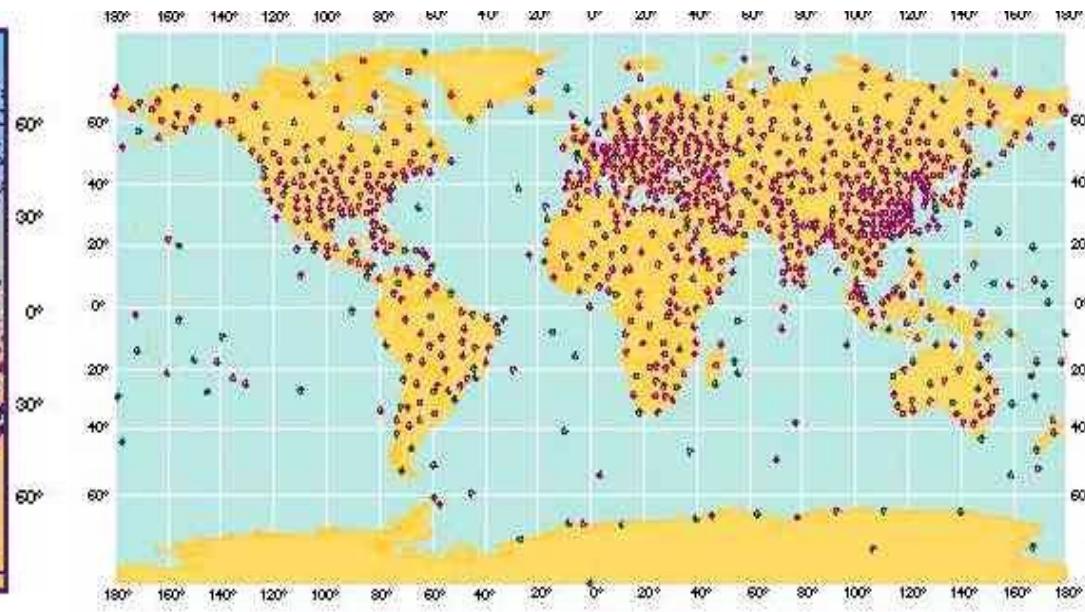
制限資料

世界の気象観測ネットワーク

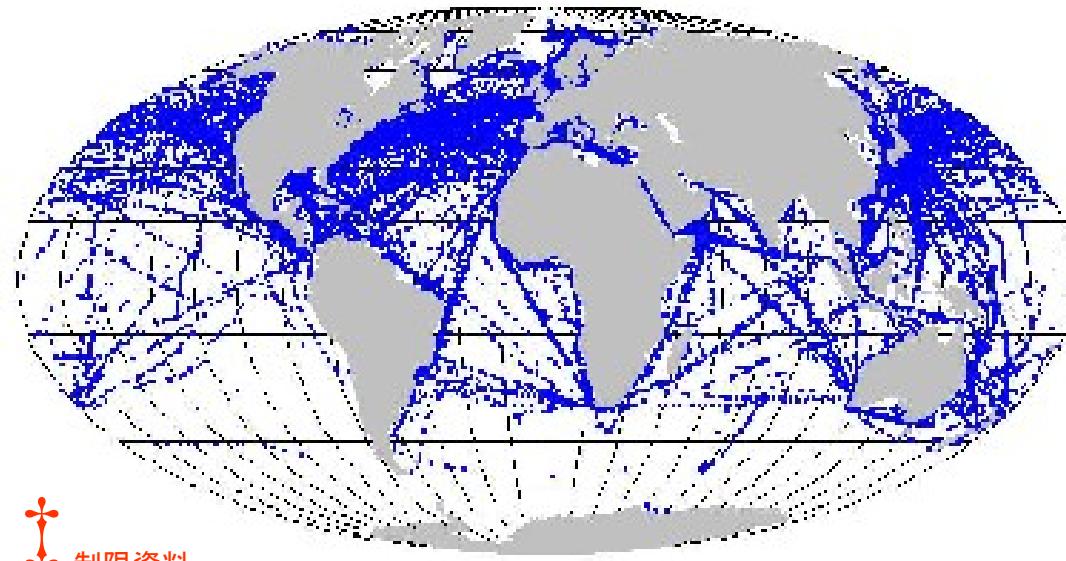
地上観測ステーション(約11,000箇所)



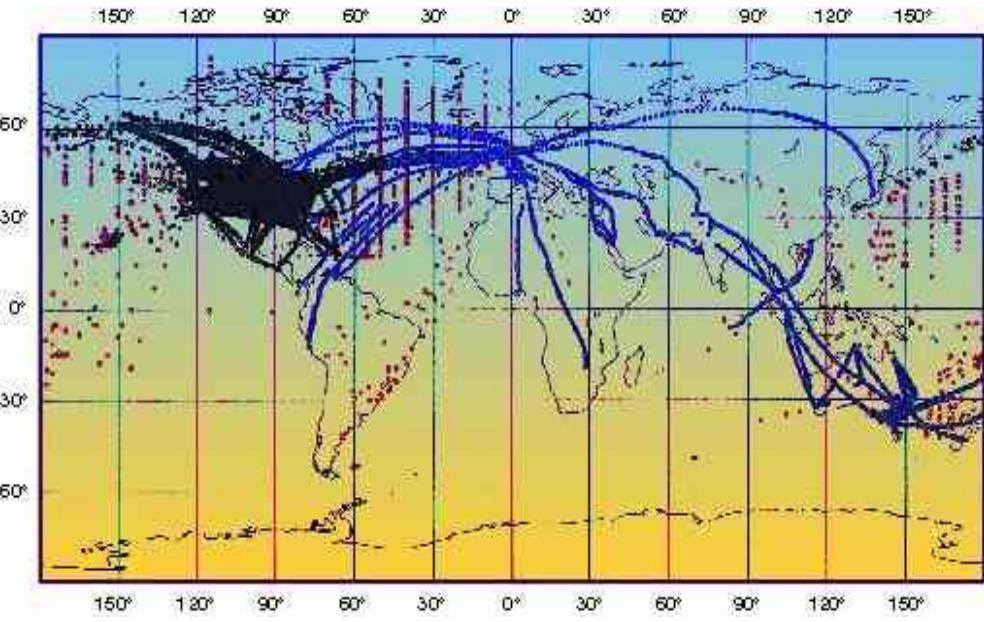
高層気象観測所(約900箇所)



海洋気象観測(船舶約7,000隻(の40%)、ブイ約750個)



航空機観測(約3,000機)



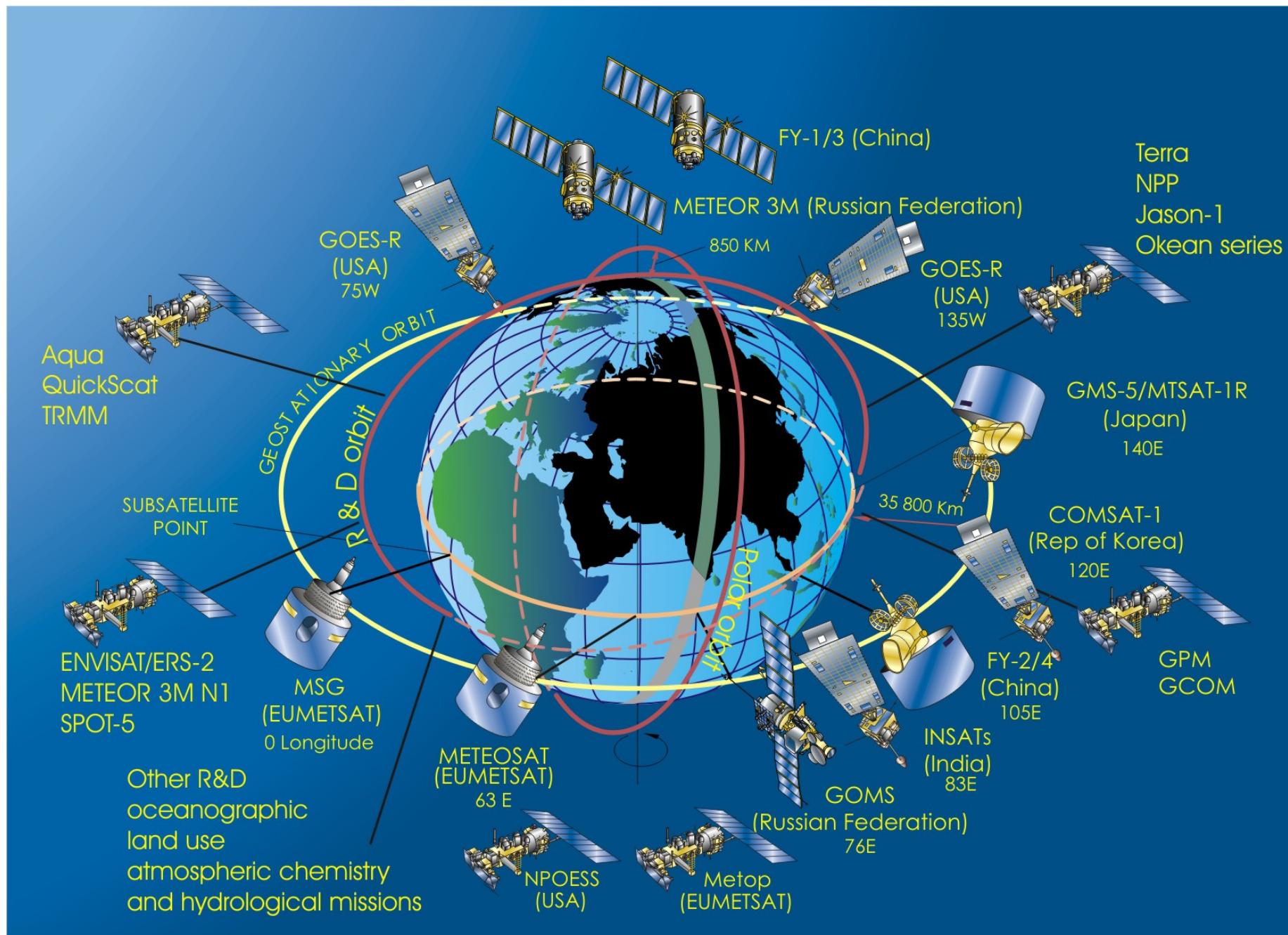
WMO: World Meteorological Organization

(世界気象機関)一国連の専門機関のひとつ

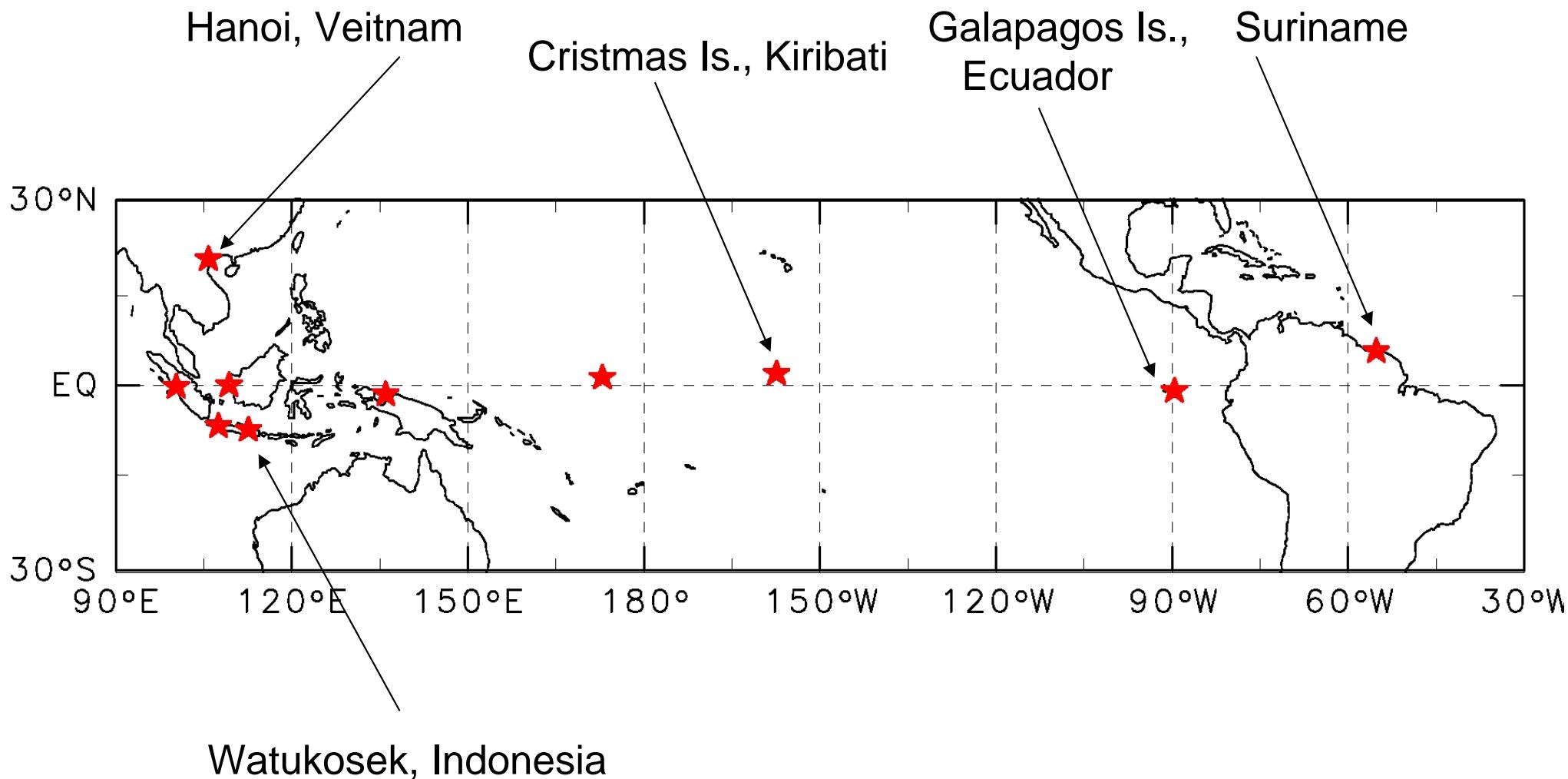
<http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/Gos-components.html>

世界の気象観測ネットワーク(続き)

人工衛星観測(静止衛星6機、極軌道衛星5機、各種研究・開発衛星； 気象要素・大気微量成分等の観測)



熱帯の国々の人々と一緒に地球大気を観測する ～オゾン・水蒸気の気球観測～



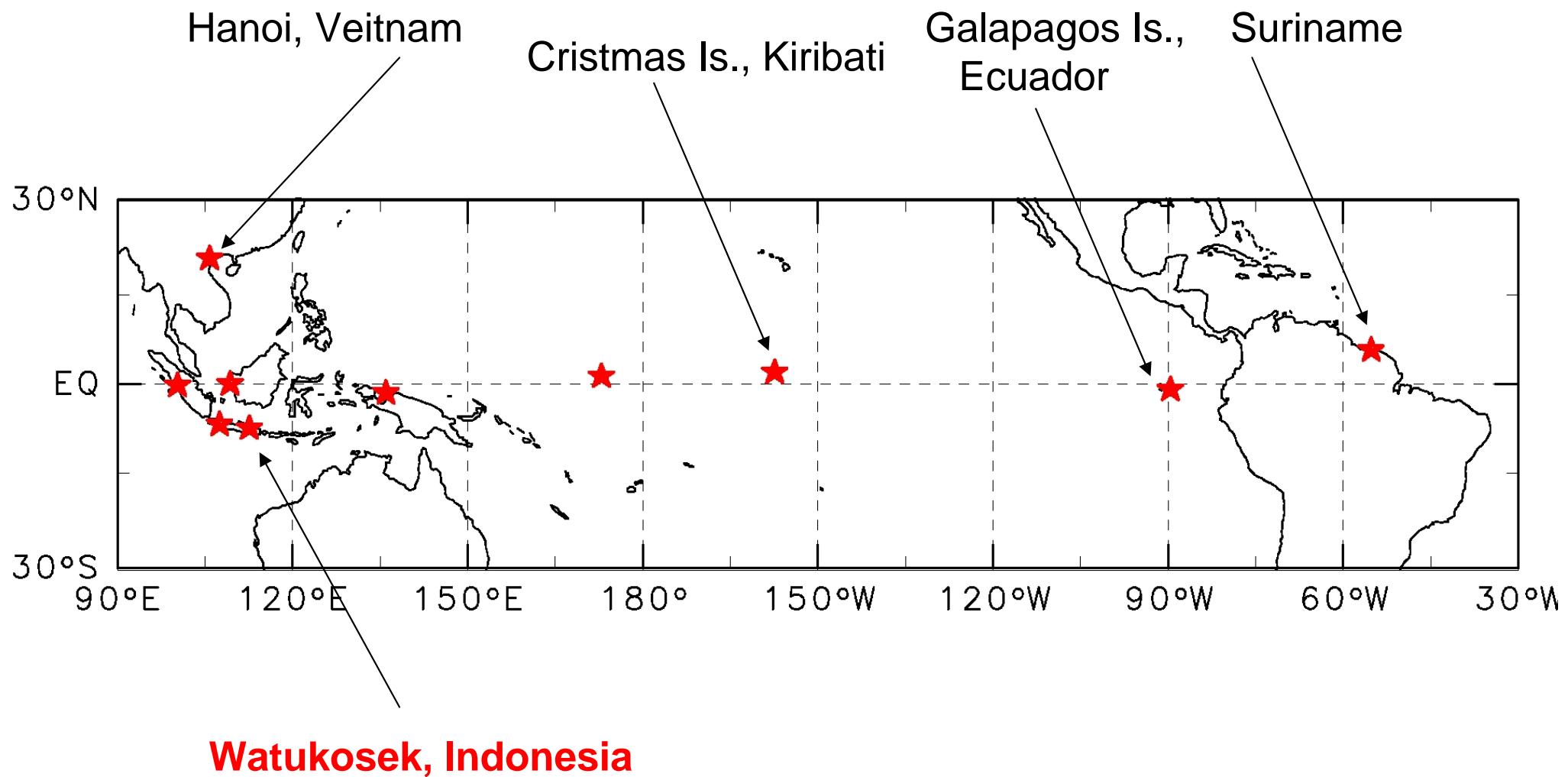
注意:webでの公開のため、以降のページ中の
人物写真にはぼかしを入れてあります。

ベトナム・ハノイ (2004年9月)



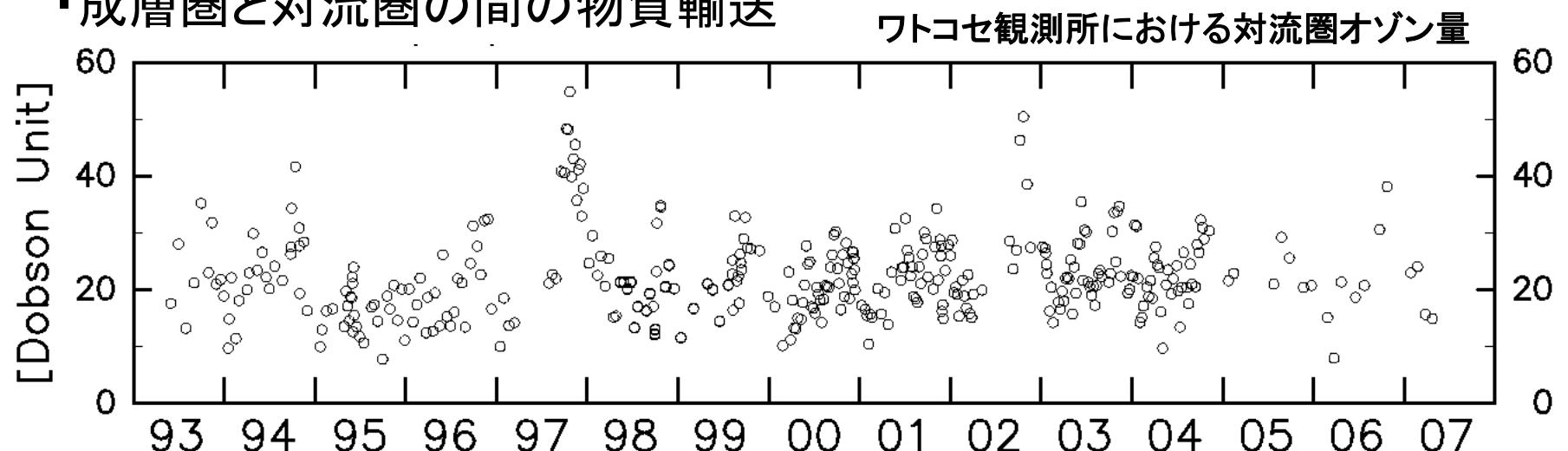
ベトナム・ハノイ (2004年9月)



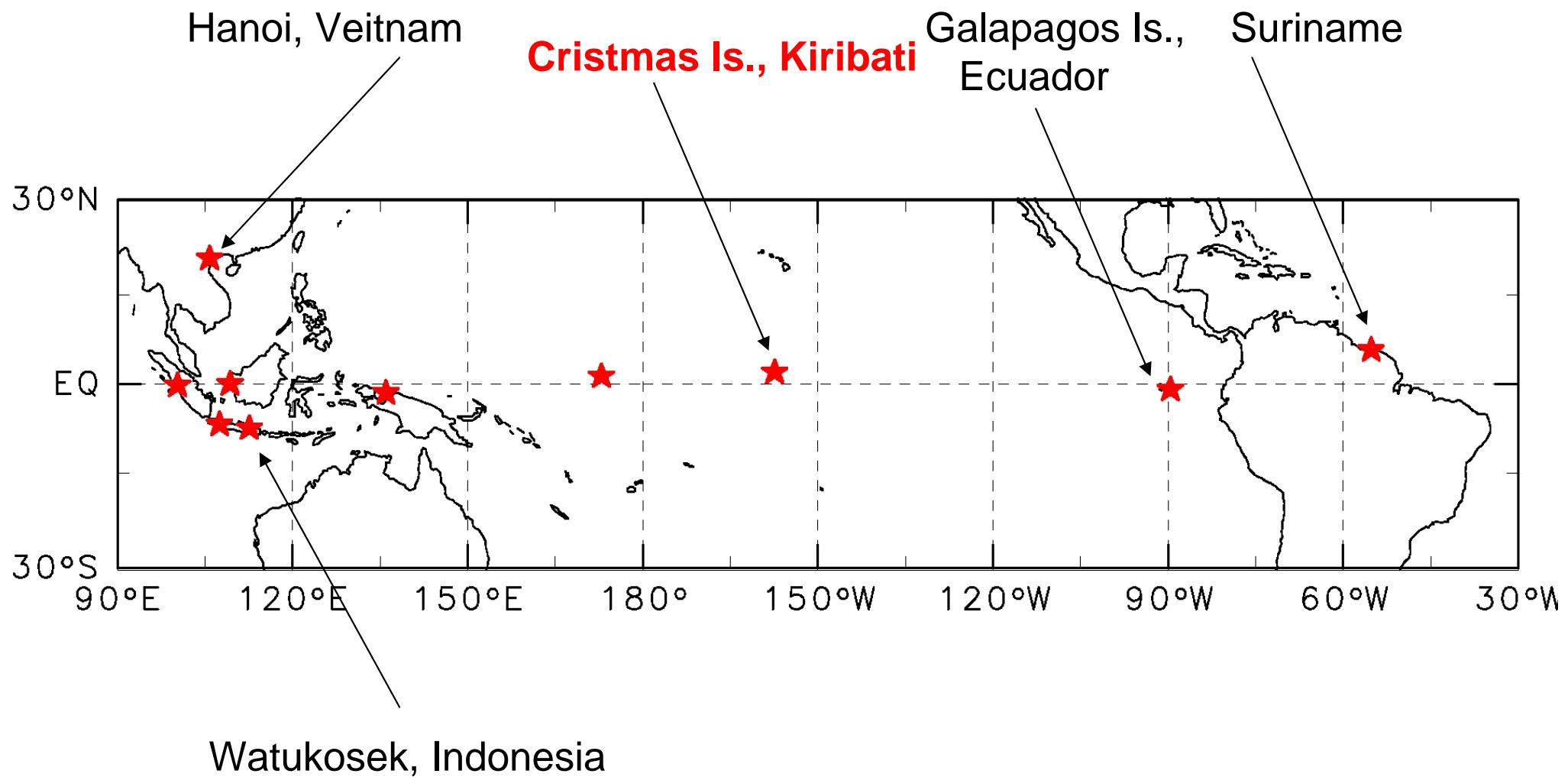


- インドネシアにおけるオゾン観測(1993~)

- エルニーニョ時の大森林火災とバイオマス燃焼、大気汚染
- 成層圏と対流圏の間の物質輸送



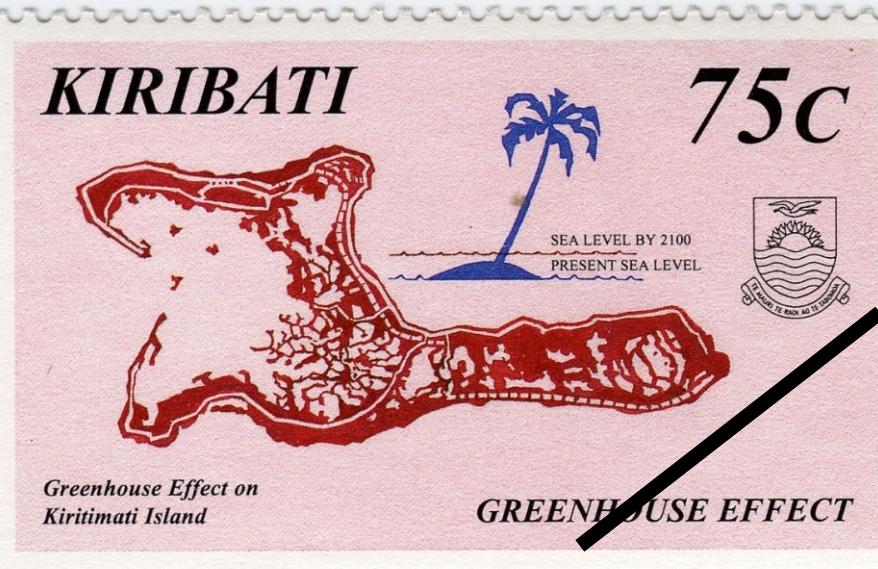
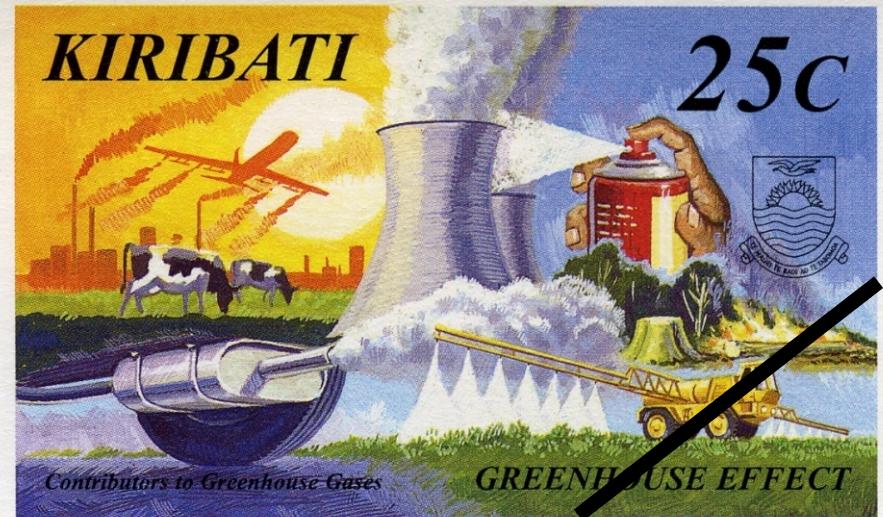
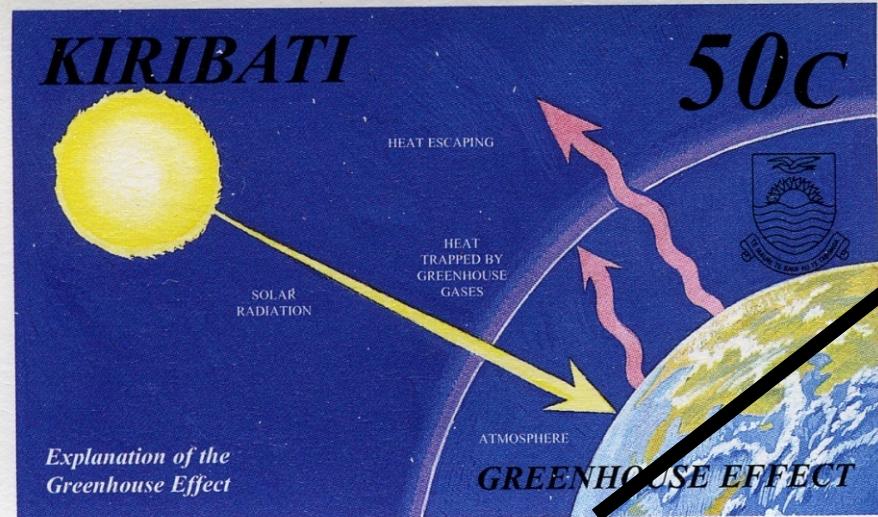
(1999年8月 インドネシア)

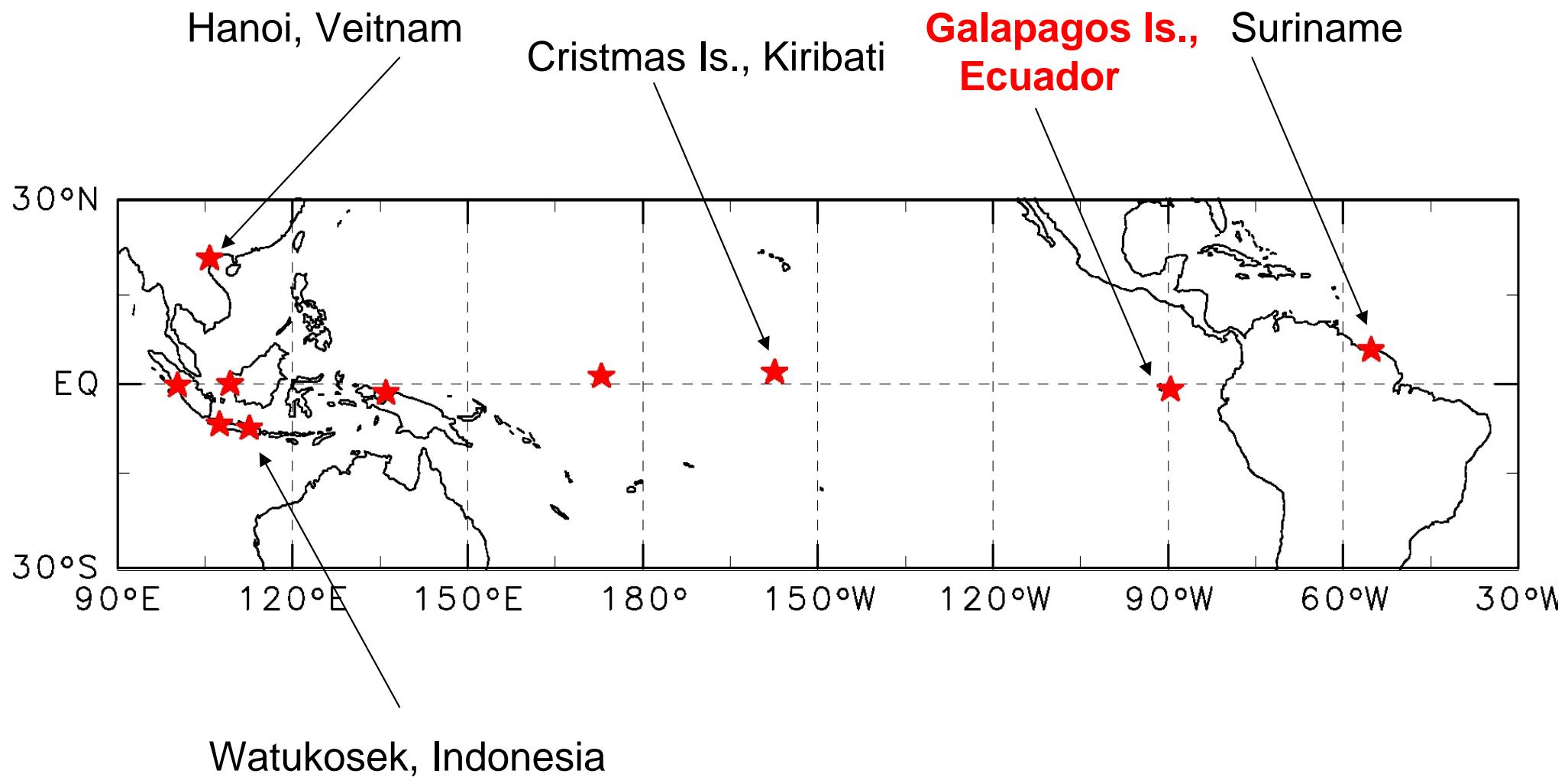


キリバス共和国・クリスマス島



キリバス共和国・クリスマス島



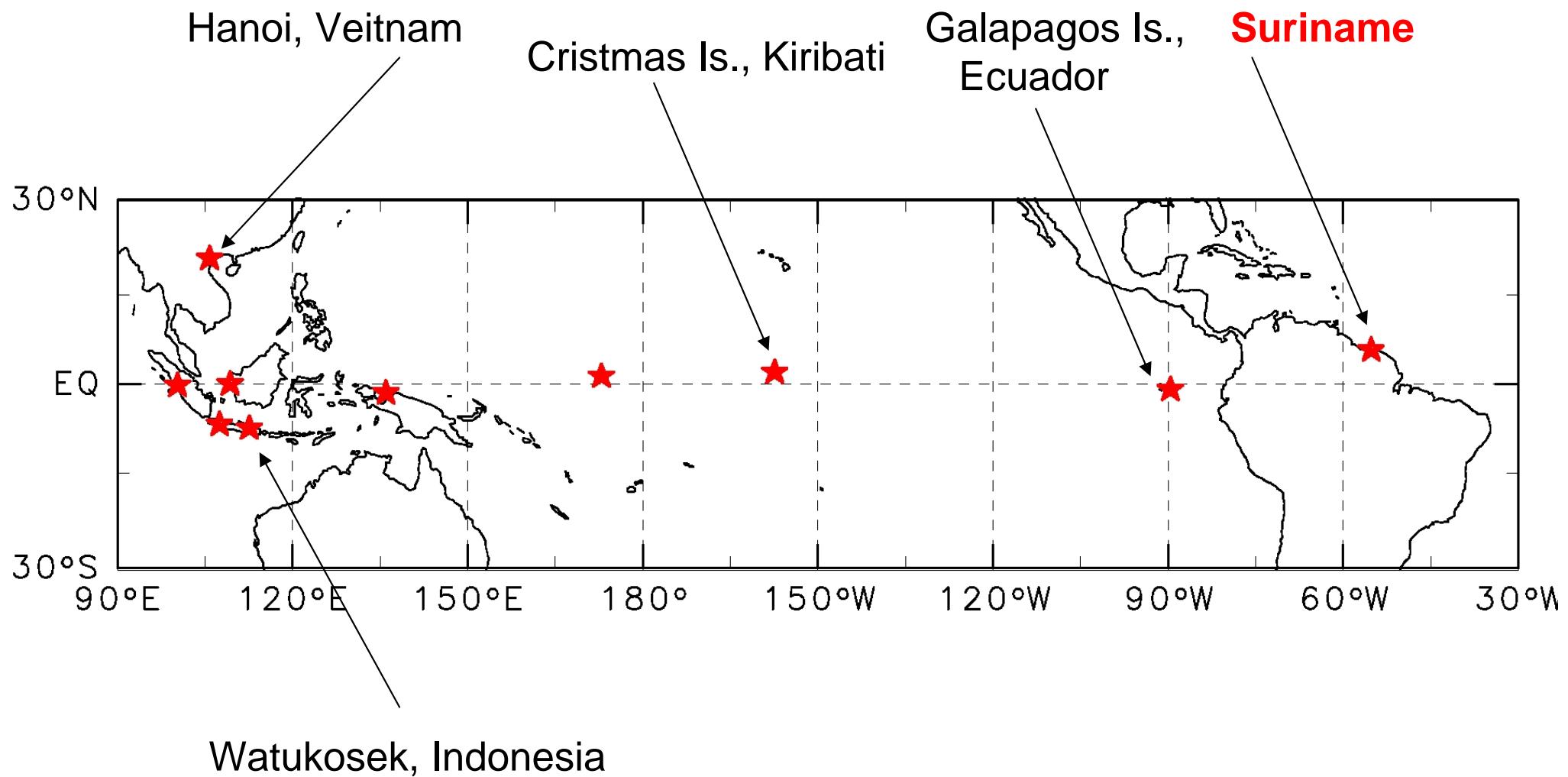


エクアドル共和国・ガラパゴス諸島



エクアドル共和国・ガラパゴス諸島





スリナム共和国 (2002年10月)



気候変動のサイエンス

1. 地球の概観

太陽系第3惑星・地球ってどんな星？

2. 地球の気候を決める要素

どのような物理的・化学的過程が関わっているのだろう？

3. 気候変動と地球温暖化

地球が誕生して46億年、地球の気候は実際にどのように変動してきたのだろう？ また、近年100～200年の気候変化は本当に人間活動によるものなのだろうか？

4. 気候変動の監視～世界の人々の取り組み～

誰がどのようにして我々の地球を実際に監視しているのだろう？

地球温暖化問題＝現代文明の必然

- 自然科学の視点
- 世界政治・世界経済の視点
- 工業・エネルギーの視点
- 農業・酪農・水産業・林業の視点
- 生活および社会問題の視点
- 倫理・心理学の視点
- 歴史学・哲学・文学の視点

高校生へのメッセージ

- ぼくなりの“科学”、“サイエンス”的定義：
「様々な物事の真理を明らかにしようとし続ける人間の営み」
- 与えられた問題を解く → そもそも何が問題なのか自分で考え、そして解こうとし続ける