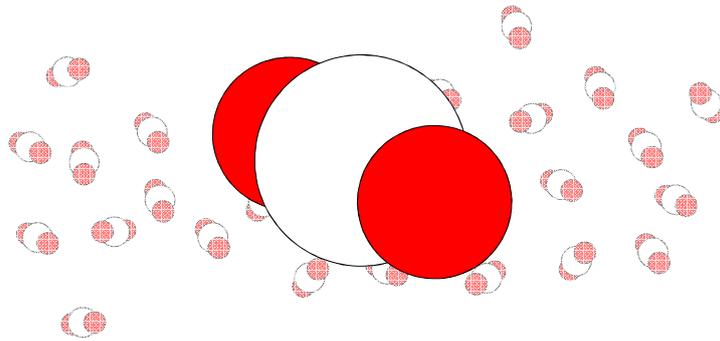


1

生態環境計測学 2015/10/7

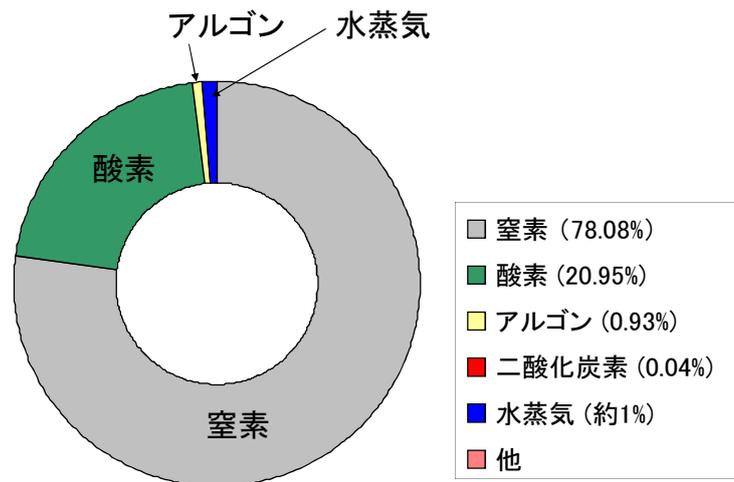
微量気体の測定 / CO₂の測定



植山 雅仁

2

大気の組成

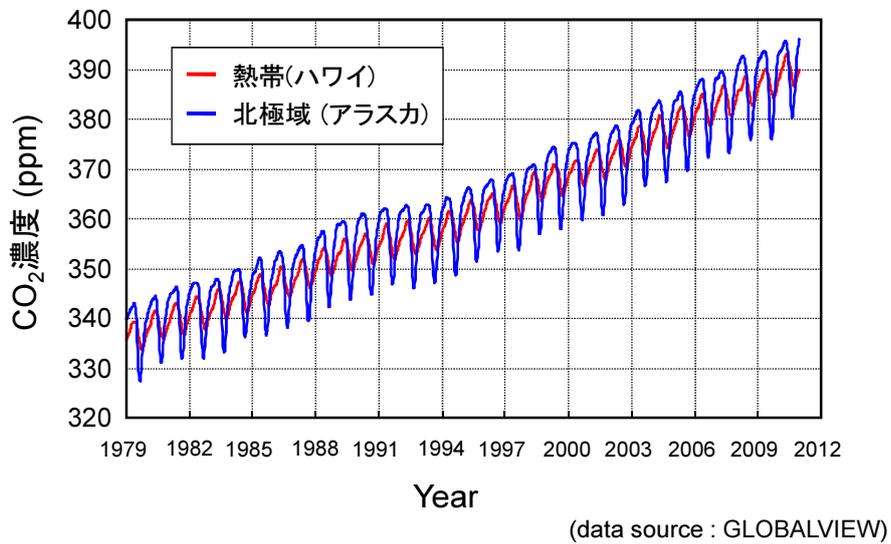


二酸化炭素は？

3

大気中のCO₂濃度

年率：0～4ppm で増加
平均1.6～1.7ppm year⁻¹



4

大気中のCO₂濃度

産業革命以前の大気CO₂濃度は？



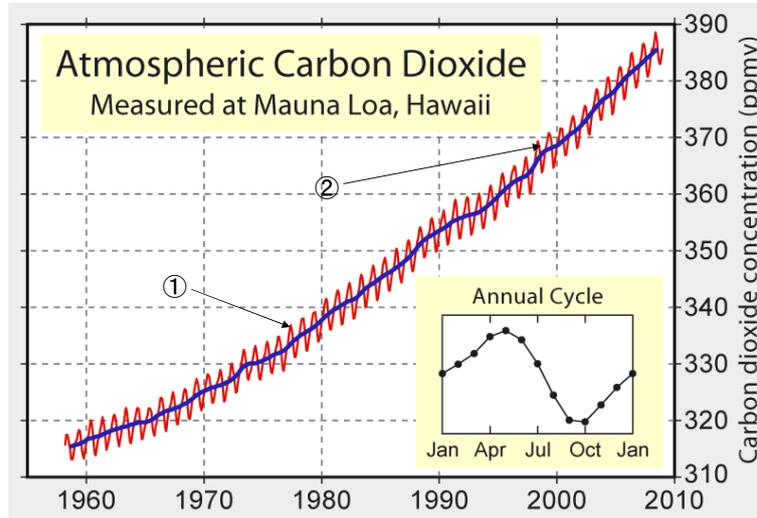
278 ± 2 ppm

http://www.h2.dion.ne.jp/~mogiseka/lecture/industrial_revolution.htm

5

大気中のCO₂濃度

ハワイ、マウナロア



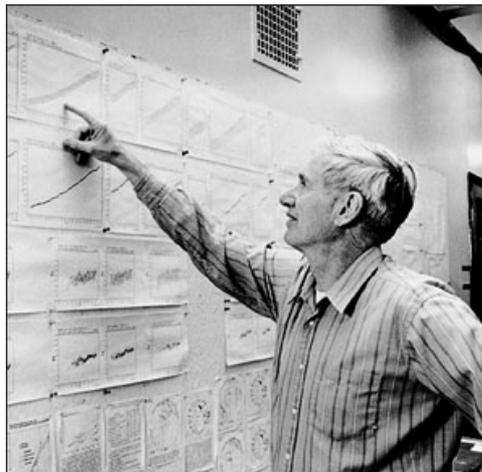
http://en.wikipedia.org/wiki/Charles_David_Keeling

6

大気中のCO₂計測

チャールズ・キーリング
Charles David Keeling
1928-2005

1958年から計測スタート



<http://sio.ucsd.edu/keeling/>

<http://www.diroyspencer.com/global-warming-background-articles/carbon-dioxide-growth-rate-at-mauna-loa/>

7

大気中のCO₂計測

ppm (parts per million)

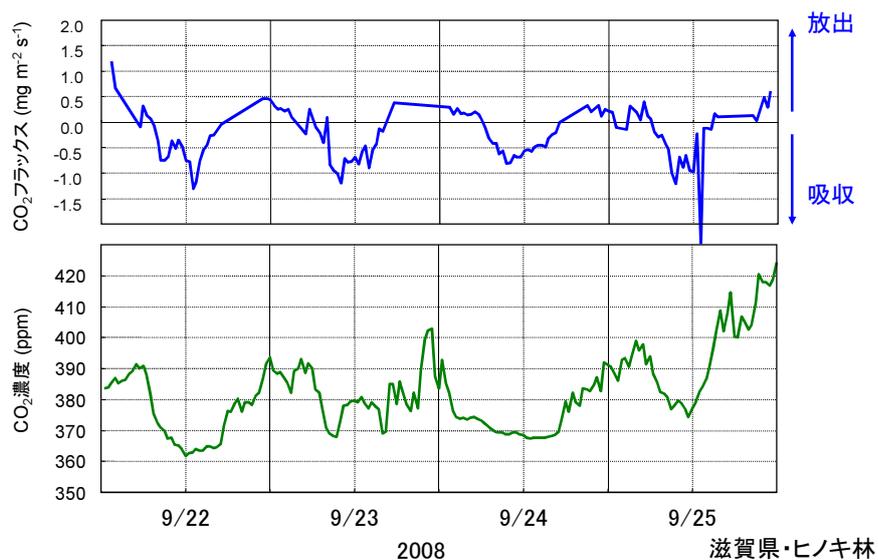
ppmv (v : volume)

$$1\text{ppm} = 0.000001 (10^{-6}) \\ = 0.0001\%$$

CO₂体積 / 空気の体積

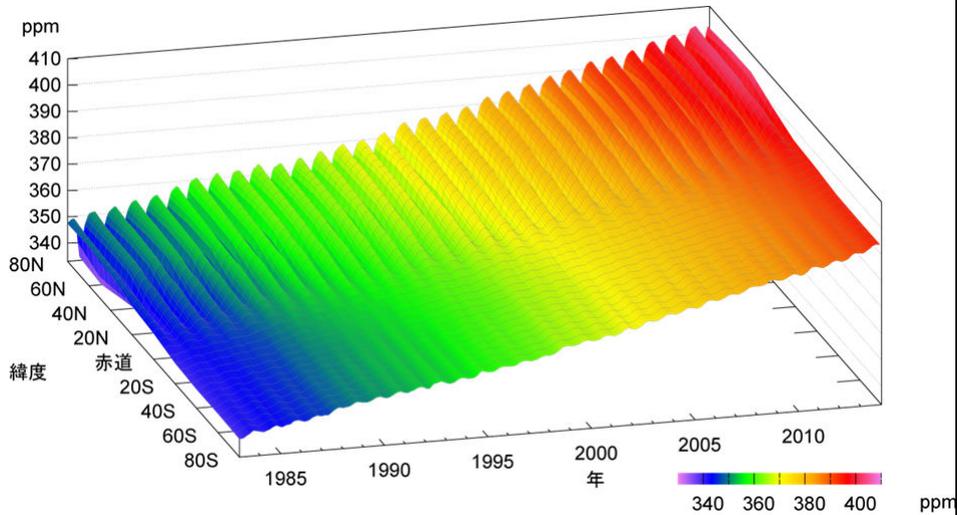
8

大気中のCO₂濃度変化 日変化



9

大気のCO₂濃度変化

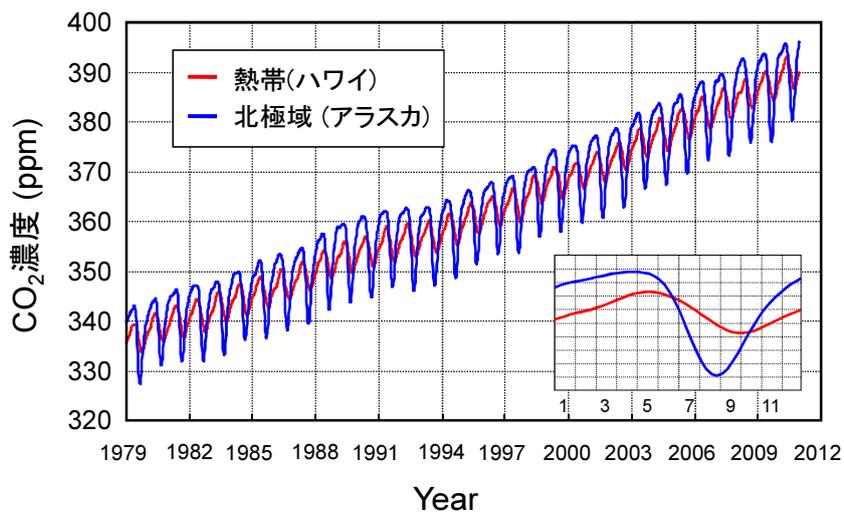


<http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/21co2.html>

10

大気のCO₂濃度変化

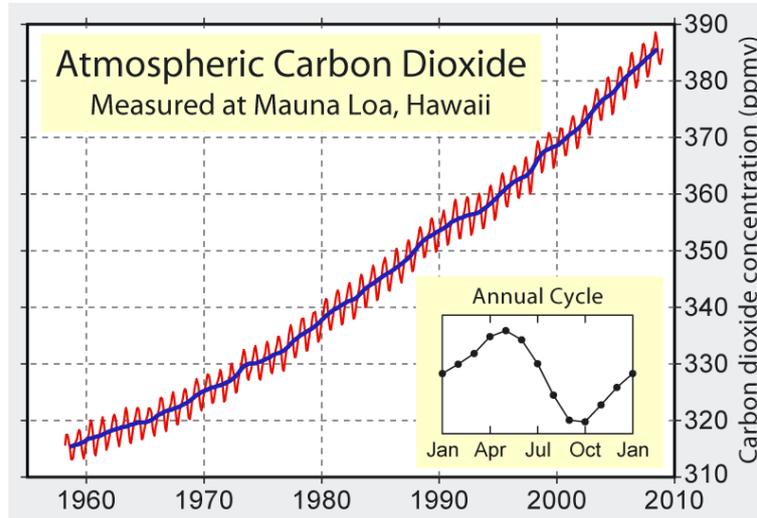
季節変化



11

大気中のCO₂濃度変化

季節変化
ハワイ、マウナロア

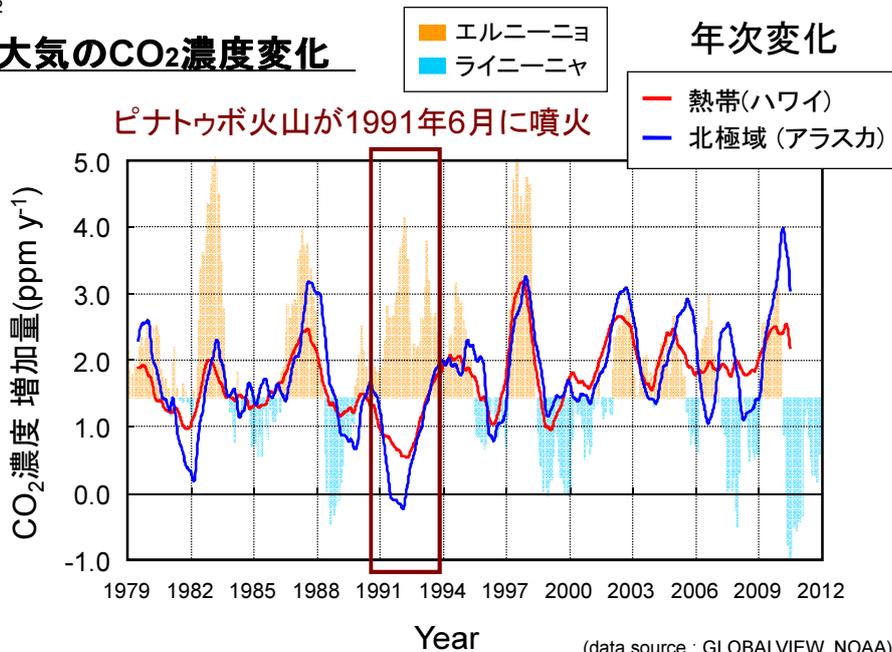


http://en.wikipedia.org/wiki/Charles_David_Keeling

12

大気中のCO₂濃度変化

年次変化



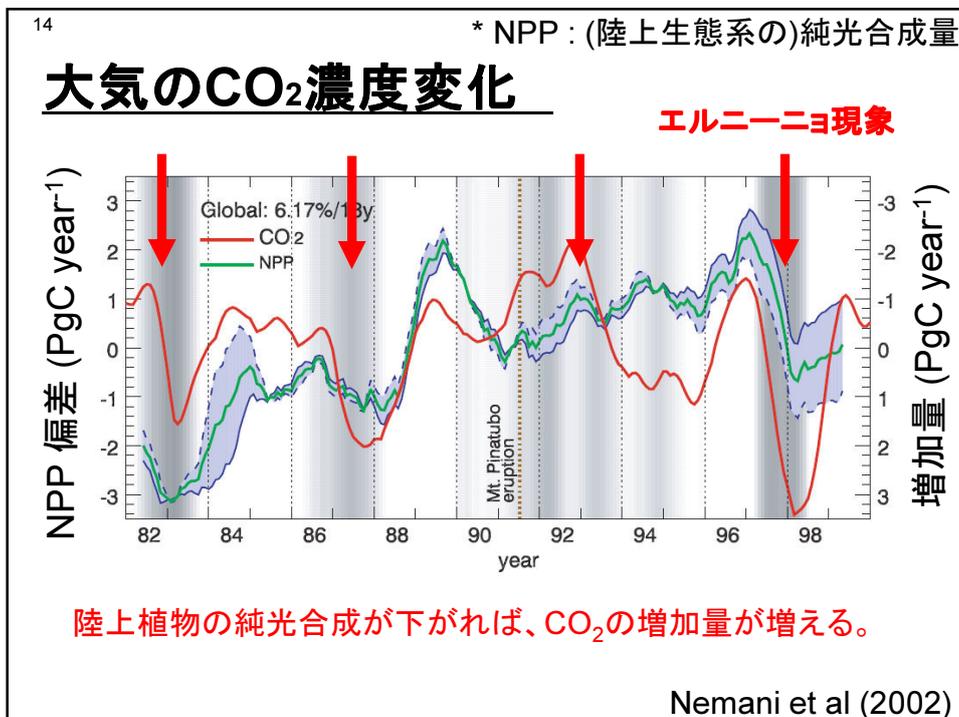
1982/1983年、1986-1988年、1991/1992年、1997/1998年、2002/2003年はエルニーニョ現象、
1984/1985年、1988/1989年、1995/1996年、1998-2000年、2005/2006年、2007/2008年はライニーニャ現象

13 http://www.fmboschetto.it/didattica/Anno_della_Terra/deriva/Come_muta_la_Terra.htm

全球の気温が低下 → 土壌微生物の活動低下？
散乱光の増加による光合成増加？

USGS

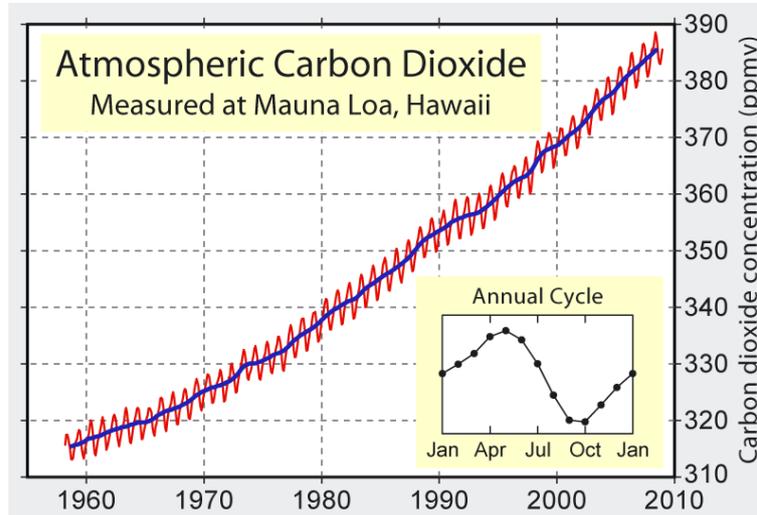
ピナトゥボ火山が1991年6月に噴火



15

http://en.wikipedia.org/wiki/Charles_David_Keeling

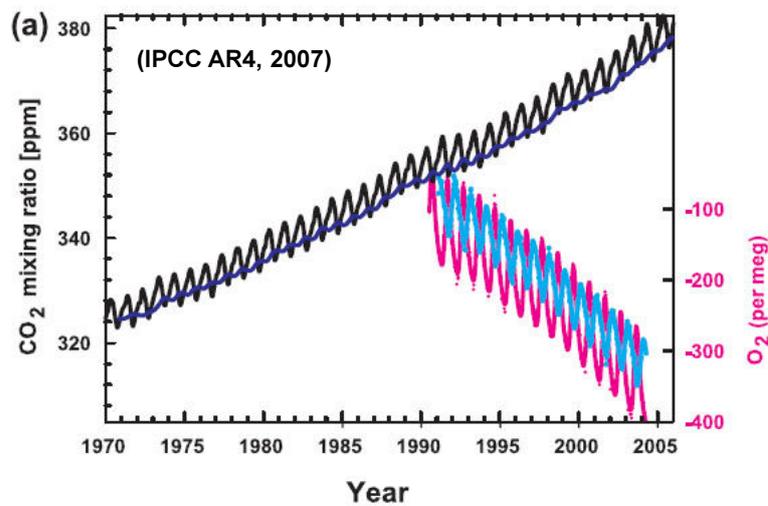
大気CO₂濃度変化 ハワイ、マウナロア



陸域生物圏は、大気CO₂濃度に大きな影響を与えている。

16

大気O₂濃度変化



CO₂の増加量に比べてO₂濃度の低下の方が大きい。

17

陸上と海洋の化学式

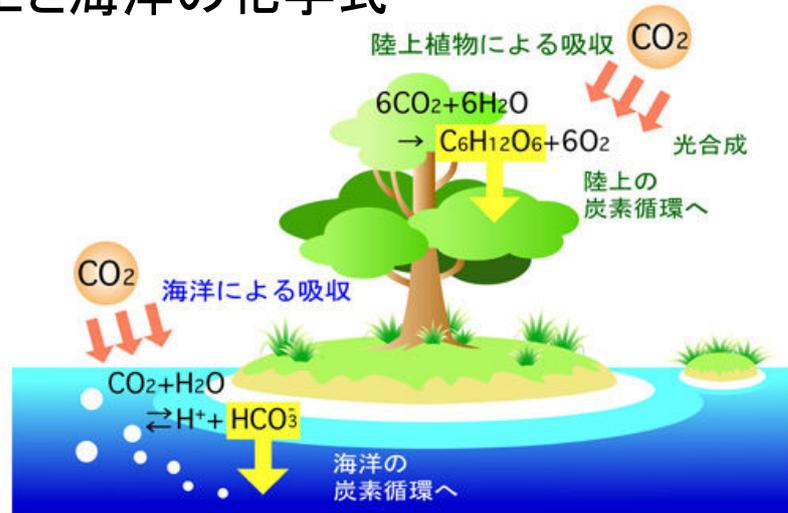


図 海洋と陸上生態系によるCO₂吸収過程

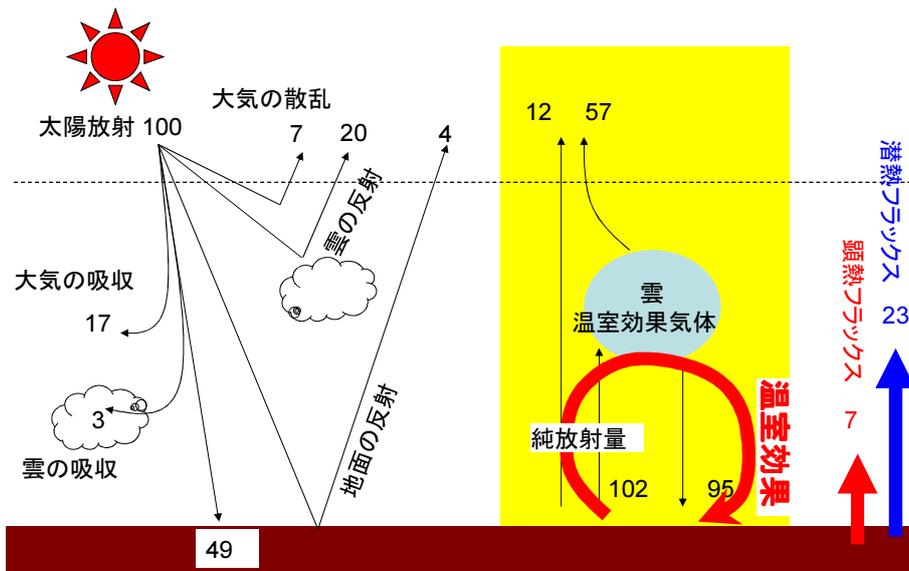
©2005,(独)国立環境研究所

<http://db.cger.nies.go.jp/gem/warm/flux/archives/archives1.html>

18

地球の熱収支

温室効果がない場合: -19°C
 温室効果がある場合: 14°C



文字ら, 1997; Chapin et al., 2002

19

温室効果

地球大気は概して太陽放射に対しては透明、熱赤外放射に対しては温室効果気体のため不透明

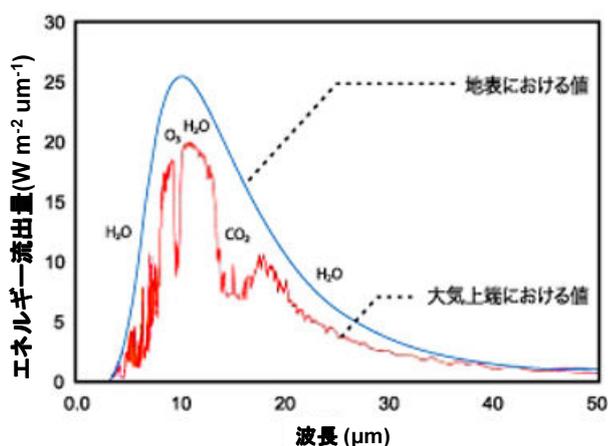
大気中の温室効果気体の濃度が上昇すると、
赤外線が大気中で多く吸収され大気の気温が上昇
再び地表面に向けて再放射される熱エネルギーも上昇

温室効果気体： H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O etc

水蒸気(H_2O)は、強力な温室効果を持つ。

20

水蒸気と温室効果



各温室効果ガスの寄与

H_2O	60%	(75 Wm^{-2})
CO_2	26%	(32 Wm^{-2})
O_3	8%	(10 Wm^{-2})
その他	6%	(8 Wm^{-2})

地表(青線)および大気上端(赤線)における赤外線スペクトル

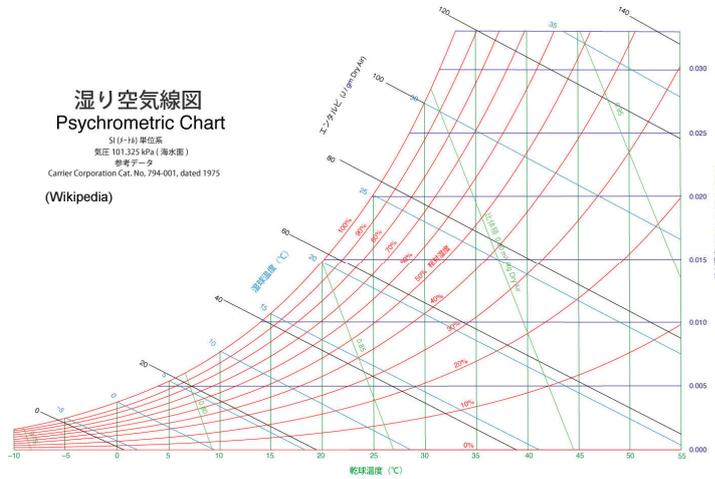
http://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/11/11-2/qa_11-2-j.html
 ココが知りたい温暖化「水蒸気の温室効果」
 (Kiehl and Trenberth, 1997)

21

水蒸気量は気温によって変化する。

湿り空気線図 Psychrometric Chart

SI (-H) 単位系
気圧 101.325 kPa (海水面)
単位データ
Carrier Corporation Cat. No. 794-001, dated 1975
(Wikipedia)



水蒸気は気候フィードバックとして作用

気候システムを介しての増減が主な変動要因、直接的な人為起源の変化は小さい
→ 人為起源の影響はCO₂などの他の温室効果気体の影響を介する。

22

放射強制力

何らかの要因により地球気候系に変化が起こったとき、その要因が引き起こす放射エネルギーの収支(放射収支)の変化量 (W m⁻²)

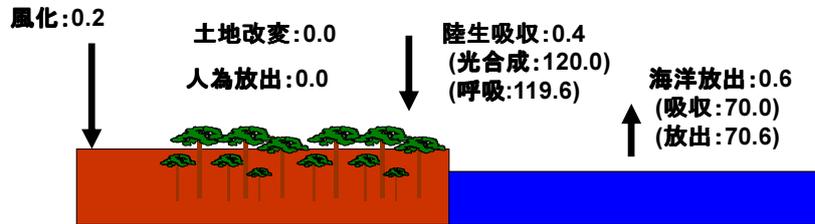


(IPCC AR5, 2013)

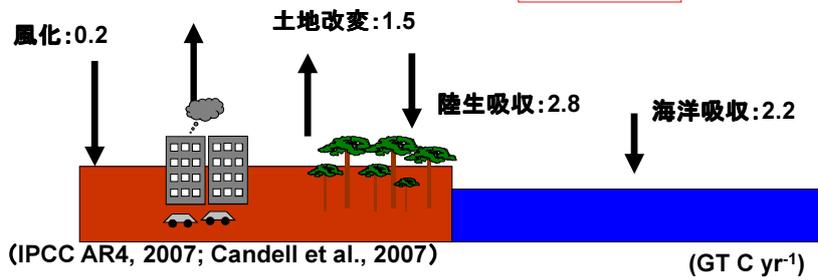
23

全球の炭素(CO₂)収支

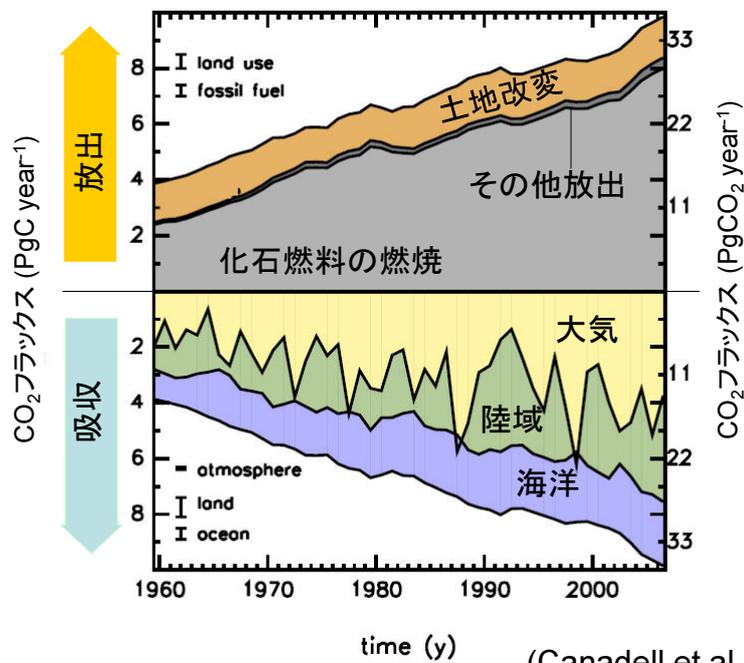
(a)産業革命以前



(b)産業革命以降
(2000-2006)



24

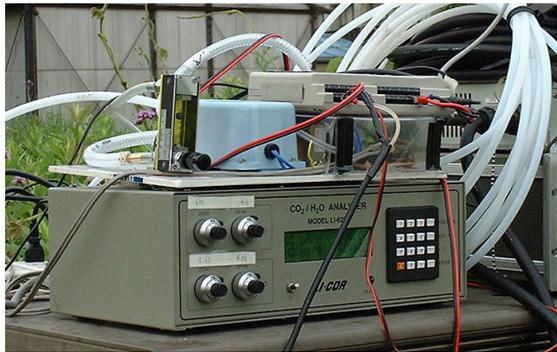


25

CO₂濃度を測る！

赤外線ガス分析計

CO₂が赤外線を吸収することを利用
赤外線を照射して、吸収された赤外線の量からCO₂濃度を計測
吸光度は、濃度に比例

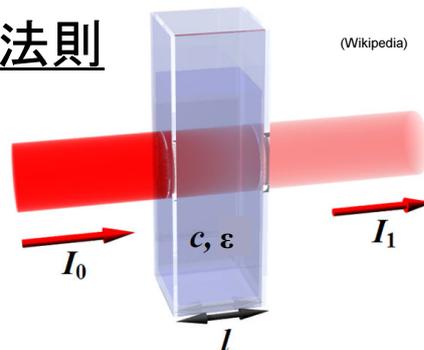


26

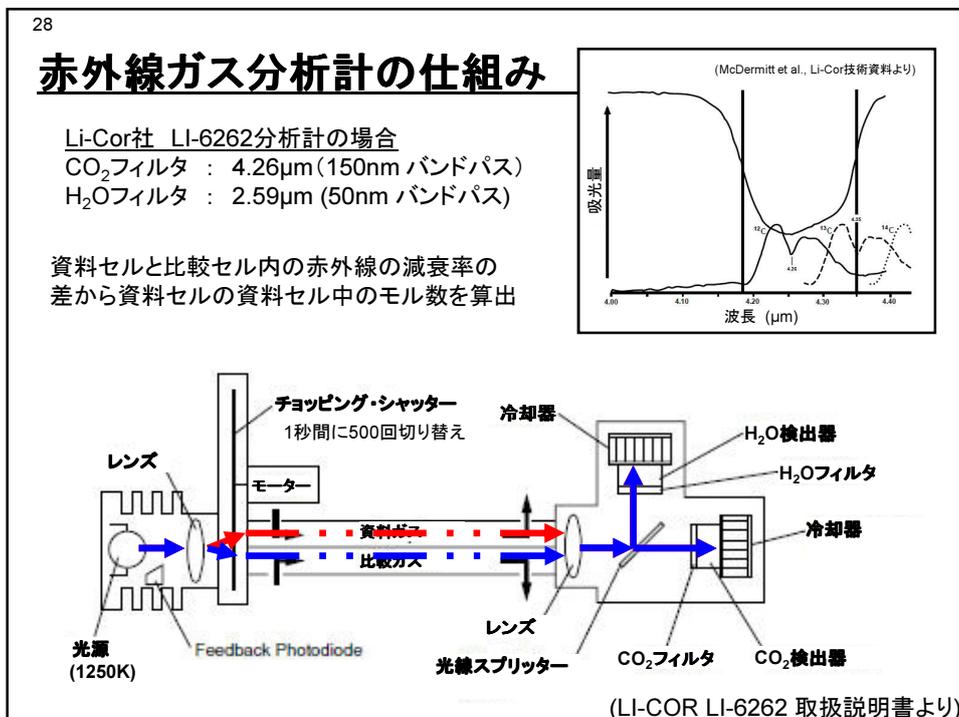
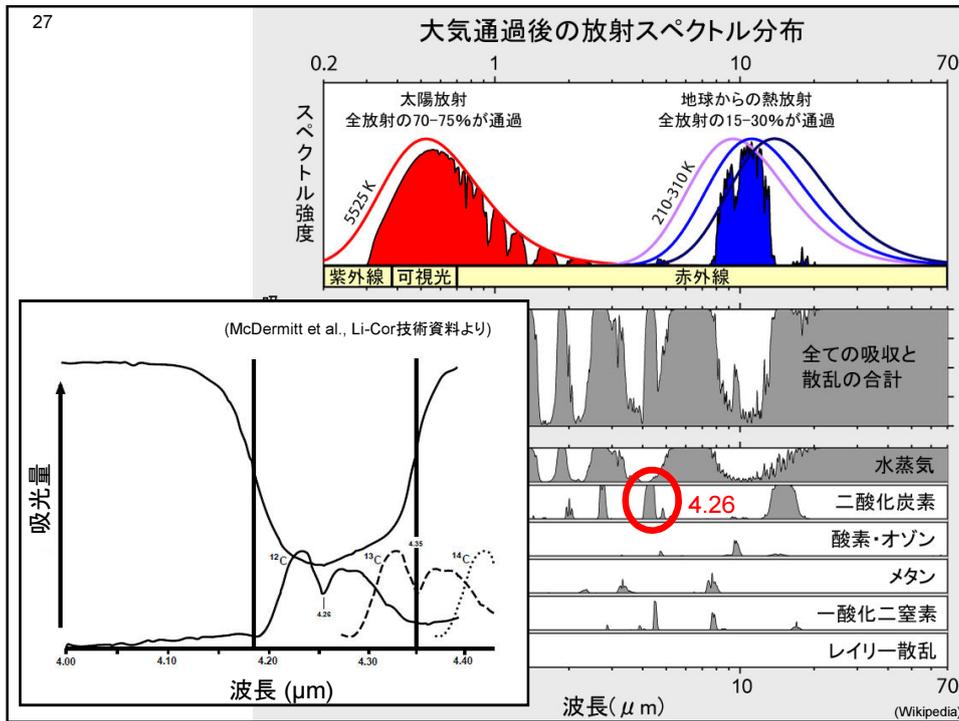
ランベルト・ベールの法則

(Lambert-Beer law)

$$\log(I_1 / I_0) = \epsilon c l$$



- I_0 : 媒質に入射する前の光の放射照度
- I_1 : 媒質中を距離L移動したときの光の強度
- ϵ : モル吸光係数
- c : 媒質のモル濃度
- l : セル長



29

理想気体の状態方程式

分析計では、この項を赤外線吸収率から計測

$$PV = nRT$$

$$\left(\frac{n}{V}\right) = P/RT$$

P: 気圧 (Pa)、V: 体積 (L)、
R: 気体定数 ($8.31447 \times 10^3 \text{ Pa L K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)、
T: 気温 (K)、n: **モル数** (mol)

- 分析計は、圧力(気圧、流量)の影響を受ける。
- セルの温度を一定に保たないといけない。

30

赤外線ガス分析計の利点・欠点

利点:

応答時間が早い
長期連続測定が容易

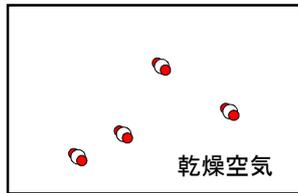
欠点:

感度特性が時間によって変化
→ 頻りに検定が必要
気圧、気温の補正が必要
水蒸気の干渉を受ける(相互感度と稀釈効果)

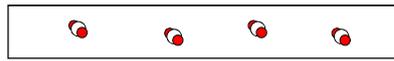
31

CO₂分析計の稀釈効果

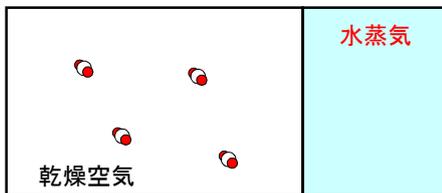
$$\text{CO}_2\text{濃度}_{\text{実際}} = \text{CO}_2\text{体積} / \text{乾燥空気の体積}$$



分析セル



$$\text{CO}_2\text{濃度}_{\text{分析計}} = \text{CO}_2\text{体積} / (\text{乾燥空気の体積} + \text{水蒸気の体積})$$

乾燥空気に対するCO₂モル数は同じ

分析セル

セルに吸引すると乾燥空気+CO₂が入る場所に水蒸気が占めてしまう。

32

赤外線ガス分析計とセルの位置

オープン・パス型

セルが大気に露出
応答速度が速い
取り付けが容易
降雨など天候に左右される

クローズド・パス型

セルが大気に露出していない



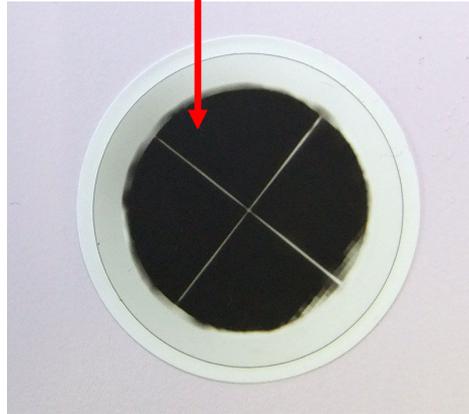
33

エアフィルタ

クローズドタイプの分析計の配管には必ず、エアフィルタを使用する。

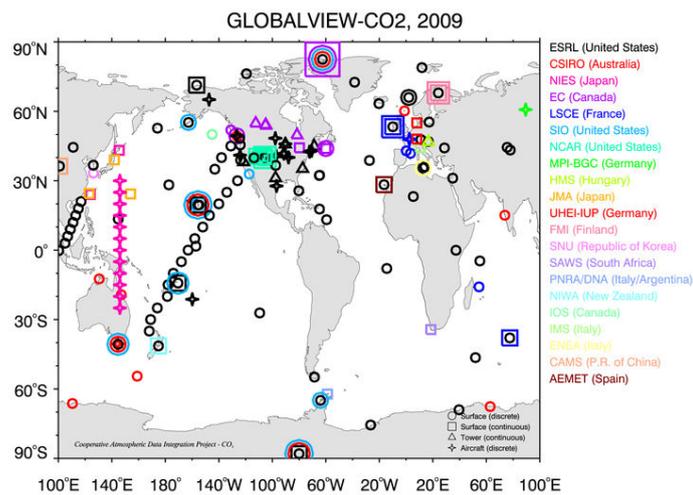


B4棟裏の芝生で、1ヶ月ほど使用



34

全球の観測網



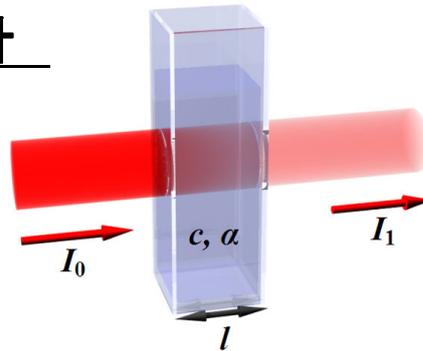
下記の「GLOBALVIEW」のHPからCO₂濃度データが公開

http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/globalview/co2/co2_intro.html

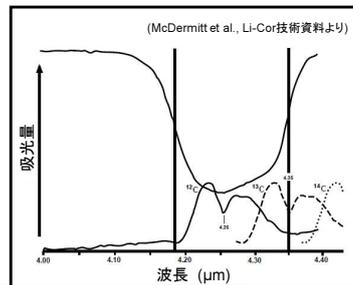
35

より高精度な分析計

$$\log(I_1 / I_0) = \epsilon c l$$



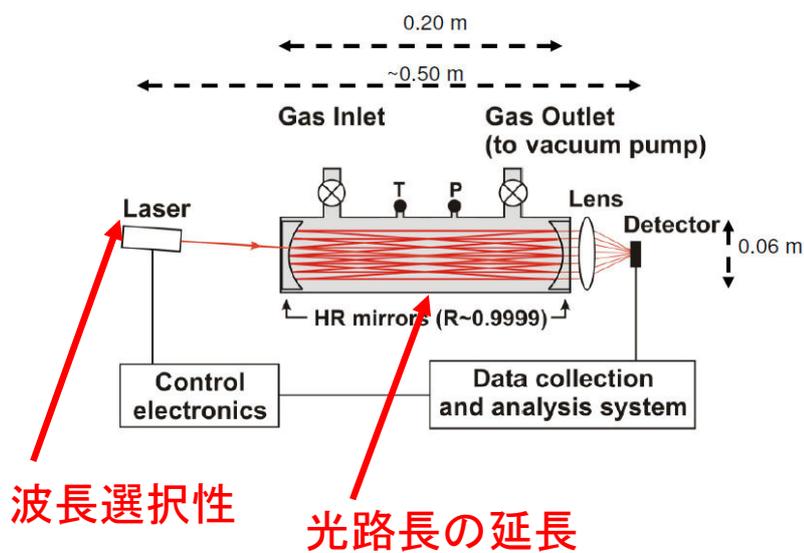
- I_0 : 媒質に入射する前の光の強度
- I_1 : 媒質中を距離L移動したときの光の強度
- ϵ : モル吸光係数
- c : 媒質のモル濃度
- l : セル長



36

レーザー分析計

(Hendriks et al., 2008BG)



37

復習事項

- 大気中のCO₂濃度の変化傾向とその原因
- 温室効果について
- 赤外線ガス分析計の原理

38

引用・参考文献

- Canadell, J., Le Quere, C., Raupach, M. R., Field, C. B., Buitenhuis, E. T., Ciais, P., Conway, T. J., Gillett, N. P., Houghton, R. A., and Marland, G. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. PNAS, 104, 18866-18870.
- Chapin III, F. S., Matson, P. A. and Mooney, H. A. 2002. *Principles of terrestrial ecosystem ecology*, New York, Springer-Verlag Press, 436pp.
- Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P.M. Cox, R.E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P.L. da Silva Dias, S.C. Wofsy and X. Zhang, 2007: Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 早坂忠裕, 1990: 温室効果気体. 天気, 37, 48-52.
- Hendriks, D.M.D., Dolman, A.J., vanderMolen, M.K., vanHuissteden, J., 2008. A compact and stable eddy covariance set-up for methane measurements using off-axis integrated cavity output spectroscopy. Atmos. Chem. Phys. 8, 431-443.
- Keeling, C. D., Whorf, T. P., Wahlen, M., van der Plicht, J., 1995: Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. Nature, 375, 666-670.
- Kiehl, J. C. and Trenberth, K. E., Earth's annual global mean energy budget, Bull. Amer. Meteorol. Soc., 78, 197-208.
- Li-Cor, 1996: Li-6262 CO₂/H₂O analyzer instruction manual. Lincoln, NE: Li-Cor, Inc.
- McDermitt, D. K., Welles, J. M., Eckles, R. D., 1993: Effects of temperature, pressure and water vapor on gas phase infrared absorption by CO₂. Lincoln, NE: Li-Cor, Inc.
- Nemani, R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., Jolly, W. M., Piper, S. C., Tucker, C. J., Myneni, R. B., and Running S. W., 2002: Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 2982 to 1999. Science, 300, 1560-1563.
- 文字信貴 2003. 植物と微気象—群落大気の乱れとフラックス—. 大阪公立大学共同出版会, 140pp.
- 文字信貴・平野高司・高見晋一・堀江武・桜谷哲夫, 1997: 農学・生態学のための気象環境学, 丸善株式会社, 199pp.
- 中島映至・竹村俊彦, 2009: 放射強制力, 天気, 56, 29-31.
- Solomon, S., D. et al, 2007: Technical Summary. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.