

生態環境計測学 2016.11.30 の質問・補足

回答者 : 植山

1. ピナツボ火山の噴火によって、なぜ、CO₂濃度の増加速度が減少したのか？なぜ、成層圏まで噴煙が到達しないと影響が顕著とならないのか？

[Answer]

火山噴火が起こると火山灰などの大量のエアロゾルが大気中に放出される。また、噴火によって放出される亜硫酸ガスや硫化水素は大気中で反応して硫酸塩エアロゾルとなる。これらのエアロゾルのうち、対流圏に放出されたものは雨や雪などによって、比較的短い時間で大気から除去される。一方、大規模噴火に伴ってエアロゾルが成層圏に及ぶと、放出されたエアロゾルは1年以上も成層圏にとどまる。これらのエアロゾルは長期に渡って太陽放射を遮り、対流圏の気温を下げる。1991年6月にフィリピンのピナツボ山が噴火した際は、噴煙が成層圏にまで達したため、その後の対流圏の気温が低下した。日本でも、ピナツボ山噴火の2年後に大冷夏が生じ、平成の大凶作が生じた。

ピナツボ山が噴火した1991から1992年にかけて大気CO₂濃度の増加速度が減少したことに関しては、¹³C/¹²Cの炭素同位体比から陸域でのCO₂吸収量が増加したことが原因であると考えられている(Keeling et al., 1996)。陸域生態系においてCO₂吸収が増加した理由については、気温の低下による呼吸量の減少、エアロゾルに伴う散乱光の増加による光合成の増加(Gu et al., 2003)などが原因として考えられている。

参考文献：

Gu, L., Baldocchi, D. D., Wofsy, S. C., Munger, J. W., Michalsky, J. J., Urbanski, S. P., and Boden, T. A., 2003.

Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: enhanced photosynthesis. *Science*, 299, 2035-2038.

Keeling, R. F., Piper, S. C., Heimann, M., 1996: Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric O₂ concentration. *Nature*, 381, 218-221.

近藤純正, 2000: 地表面に近い大気の科学, 東京大学出版会, 324pp.

小倉義光, 1984: 一般気象学, 東京大学出版会, 314pp.

2. 産業革命以前は海洋のCO₂収支はゼロであったにもかかわらず、産業革命以降、海洋のCO₂吸収量が増加したのはなぜか？

[Answer]

海洋のCO₂交換量(F)は、大気中のCO₂分圧(pCO_{2a})と海洋表層の平衡CO₂分圧(pCO_{2s})の差に交換係数(k_g)を乗じた以下の式で表すことが出来る(Siegenthaler and Sarmiento, 1993)。

$$F = k_g (pCO_{2a} - pCO_{2s})$$

ここで、 F が正であるときは海洋が CO_2 の吸収源、負であるときは放出源として作用していることを表す。大気中の CO_2 濃度が高まれば、 $(p\text{CO}_{2a} - p\text{CO}_{2s})$ が大きくなり、 F が大きくなることが予想される。多くの CO_2 が海洋表層にとけると $p\text{CO}_{2s}$ が高くなり、吸収量は減少すると考えられるが、海洋循環により表層水が深層へ輸送され、 $p\text{CO}_{2s}$ の低い海水が表層に供給される。このため、深層水を含めた海水が産業革命以降の大気 CO_2 濃度と平衡状態になるまでは、海洋は CO_2 の吸収源として作用すると考えられている。ただし、海洋の CO_2 吸収量は表層水が深層へ輸送される速度に依存するとされており、気候変動に伴う海洋循環の変化が将来の海洋の CO_2 収支に影響するとされている。

参考・引用文献：

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.

Siegenthaler, U., and Sarmiento J. L., 1993: Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature*, 365, 119-125.

3. CO_2 の増加分に比べて、 O_2 の減少分が多い理由

[Answer]

化石燃料を使用すると CO_2 を放出すると同時に O_2 を消費する。植物は CO_2 を取り込むときに O_2 を放出するが、海は放出しない。従って、海洋によって吸収された大気 CO_2 の減少に対応する O_2 濃度の増加はない。その為、大気 CO_2 濃度の増加率に対して、大気 O_2 濃度の減少率の方が大きくなる。

表 1. CO_2 と O_2 収支の概念

	CO_2	O_2
人為起源放出	+8	-8
陸域吸収	-3	+3
海洋吸収	-1	0
全球収支	+4	-5

4. なぜ CO_2 は赤外線を吸収するのか？なぜ、水蒸気はさまざまな波長の赤外線を吸収するのか？

[Answer]

化学結合によって結び付けられた分子内の原子は内部エネルギーにより振動している。 CO_2 、 H_2O 、 N_2O などの異核 2 原子分子や CH_4 などの 3 原子分子以上の気体分子に赤外線が照射されると、それを構成している分子が赤外線エネルギーを吸収し、分子振動の状態が変化する。この分子振動を変化させるために必要なエネルギーは、分子の化学構造によって異なり、それによって物質を構成する分子によって吸収できる赤外線の波長が異なる。

参考文献：

Wikipedia 「赤外分光法」「分子」

FTIR の基礎：<https://www.jasco.co.jp/jpn/technique/internet-seminar/ftir/ftir1.html>

5. 温室効果の最も大きい気体は CO_2 ではなく H_2O であるのはなぜか？また、 H_2O は CO_2 などの他の温室効果気体より人為的な影響は小さく、調節が難しいために IPCC では人為起源の温室効果気体として取り扱わないと覚えておいて大丈夫か？

[Answer]

温室効果気体は、地球からの長波（赤外線）放射を吸収する。水蒸気は、さまざまな波長の赤外線を吸収する特性を持つため、地球から射出される赤外線を最も効率的に吸収する。ゆえに、最も寄与の大きな温室効果気体である。

CO_2 の放出量に関しては人為的に制御可能であるのに対して、大気中の水蒸気量は、気象条件によって大きく変化し、制御することは容易でない。そのため、IPCC では水蒸気を人為起源の温室効果気体として取り扱わない。化石燃料の燃焼などで人為に水蒸気は放出されるが、大気中に長くとどまることはない。このため、人為起源の水蒸気量の増加は、観測された水蒸気量の増加の 1% に満たないとされている。

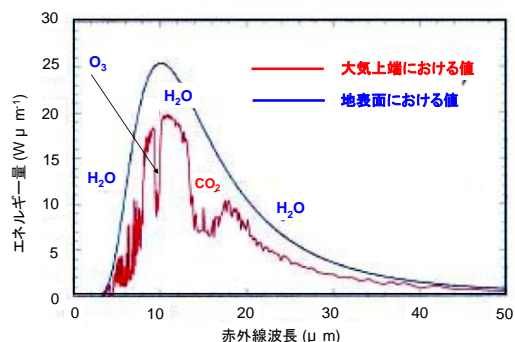


図 1 大気上端と地表面における赤外線スペクトル

参考文献：

日本農業気象学会編, 1997: 新編 農業気象学用語解説集—生物生産と環境の科学—, 63pp.

「放射強制力 (radiative forcing)」

横島徳太, 2009: 水蒸気の温室効果. 気象ブックス 026 ココが知りたい地球温暖化. 国立環境研究所地球環境センター, 成山堂, 30-35.

(http://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/11/11-2/qa_11-2-j.html)

6. 短波放射と長波放射の定義

[Answer]

全ての物体は、その表面温度に応じた波長の電磁波を射出している（ステファン・ボルツマンの法則）。高温な物体ほどより波長の短い電磁波を射出する(ウィーンの変異則)ため、表面温度が約 5800K の太陽からは短い波長の電磁波、表面温度が約 287K の地球からは長い波長の電磁波が射出される (図 2)。このとき、太陽から射出される電磁波を短波放射、地球から射出される電磁波を長波放射とよぶ。

短波放射は可視光、紫外線、近赤外線域の電磁波からなるが、その波長域の定義は曖昧のように思われる。気象観測における日射のスケールは時代とともに変遷をたどっており、1981 年以降は世界放射基準に基づいた放射の観測が

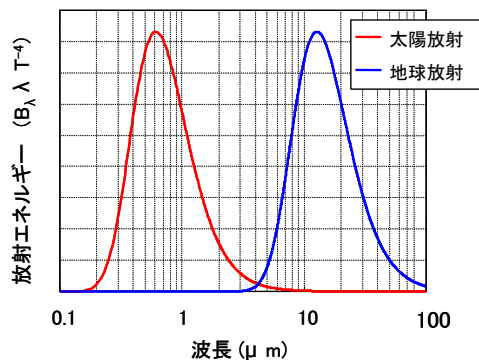


図 2 プランクの式による規格化された太陽放射と地球放射

なされるようになっている。気象庁による放射観測では、測定波長 200~4000 nm に感度のある直達日射計と 200~3600 nm に感度のある散乱日射計で日射量の計測が行われている（地球環境・海洋部環境気象管理官, 2012）。また、4.5~42 μm に感度のある赤外放射計で長波放射の観測が行われている。放射量の比較を行う際は、計器による波長感度の違いなどを考慮する必要がある。

参考文献：

地球環境・海洋部環境気象管理官（2012）新しい日射放射観測の開始について，測候時報，79，15-37.

Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Shortwave_radiation) 関連キーワード：Shortwave radiation

7. 長波放射と短波放射とは何か？また、熱収支式に関する補足がほしい。

[Answer]

全ての物体は、その表面温度に応じた波長の電磁波を射出している。高温な物体ほどより波長の短い電磁波を射出するため、表面温度が約 5800K の太陽からは短い波長の電磁波、表面温度が約 287K の地球からは長い波長の電磁波が射出される。このとき、太陽から射出される電磁波を短波放射、地球から射出される電磁波を長波放射とよぶ。地表面における熱収支は、短波放射(S)と長波放射(L)の収支として以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} Rn &= S \downarrow - S \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \\ &= (1 - ref) S \downarrow + L \downarrow - L \uparrow \\ &\cong H + IE + G \end{aligned}$$

ここで、 Rn は純放射量($W m^{-2}$)、 ref は地表面の反射率、 \downarrow は下向き、 \uparrow は上向きを表す。また、 H は顕熱フラックス($W m^{-2}$)、 IE は潜熱フラックス($W m^{-2}$)、 G は地中熱流量($W m^{-2}$)を表す。上記の熱収支式は、短波放射、長波放射の収支として受け取った純放射量が、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱流量に分配されることを表す。

8. 温室効果がない場合の地球表層温度の算出法

[Answer]

地球が受け取る短波放射量の総量は下記のように表すことができる。

$$S = S_0(1 - a)\pi r^2$$

ここで、 S_0 は地球表面が受け取る短波放射量、 S_0 は太陽定数 ($1370 W m^{-2}$;)、 a は地球表層のアルベド (おおよそ、0.3)、 π は円周率、 r は地球の半径を表す。地球からの長波放射は以下の式で表すことができる。

$$I = \sigma T^4$$

ここで、 I は地球表面から射出される単位面積当たりの長波放射量、 T は地球表面温度(K)、 σ はステファーン・ボルツマン定数を表す。地球が球体である事を考慮すると、地球表面全体から射出される長波放射量 (R) は以下のようなになる。

$$R = 4\pi r^2 \sigma T^4$$

放射平衡にある場合、 S と R がつりあっているため以下のように表面温度を計算することができる。

$$S_0(1-a)/4 = \sigma T^4$$

上式を解くと、表面温度 T を 255 K (-18°C)と得ることができる。

参考文献：

渡部雅浩, 2007: 温室効果気体と温暖化の原理, *地球温暖化の科学*, 北海道大学大学院環境科学院編, pp. 9-24.

9. 放射強制力の定義についてよく理解できなかった。また、産業革命以降の CO_2 濃度上昇による放射強制力の表記「 $1.66 (1.49-1.83) \text{ W m}^{-2}$ 」の表記法

[Answer]

放射強制力とは、大気中の温室効果気体等の濃度変化などによって引き起こされる対流圏界面での下向き正味放射の変化をいう（農業気象学用語解説集）。IPCC (2007)による放射強制力とは、現在と工業化時代の開始（およそ 1750 年）の地球全体での平均された正味放射の差と定義され、 W m^{-2} の単位で表される。

IPCC の報告書に記載されている「 $1.66 (1.49-1.83) \text{ W m}^{-2}$ 」の表記は、1750 年以降の人間活動に伴う CO_2 濃度上昇が、 1.66 W m^{-2} の正味の正の放射強制力を持っていた事を表す。即ち、 CO_2 濃度の上昇が、地球全体での純放射量を 1.66 W m^{-2} 上昇させたことを表す。ここで、「 $(1.49-1.83) \text{ W m}^{-2}$ 」は、90%信頼区間を表し、 CO_2 濃度上昇の放射強制力が 90%以上の確立で $1.49 \sim 1.83 \text{ W m}^{-2}$ の間である事を表している。

参考文献：

日本農業気象学会編, 1997: 新編 農業気象学用語解説集—生物生産と環境の科学—, 63pp.

「放射強制力 (radiative forcing)」

IPCC 第四次報告書, 日本語訳 (<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/>)

10. 赤外線ガス分析計の原理について：1) 資料セルと比較セルの役割、2) 光線スプリッタ、3) 光源の色温度が 1250 K に維持されている理由、4) CO₂/H₂O 検出器の役割

[Answer]

赤外線ガス分析計は、ランベルト・ベールの法則（1式）に基づき、赤外線の吸光度から対象空気の状態を計測する機器である。

$$\log(I_1/I_0) = \varepsilon c l \quad (1)$$

ここで、媒質に入射する前の光の放射照度 (I_0)、媒質中の距離 l を移動した後の光の強度 (I_1)、モル吸光係数 (ε)、媒質のモル濃度 (c)、セル長 (l) である。分析計は、光源から赤外線を出し、セル通過後の赤外線の量を検出器(lead selenide solid state device)で計測することで、赤外線の減衰率を測定している。即ち、赤外線ガス分析計では、 I_0 、 ε 、 l が既知であるため、 I_1 を計測することで、 c を算出する。ここで、セルとはガス分析のために赤外線が通過する部分をあらわす。

Li-Cor 社の Li-6262 では CO₂ と水蒸気を同時に計測するために、光源から照射されセルを通過した赤外線は、光線スプリッタによって二方向に分けられる(図3)。分けられた赤外線の一つは、CO₂ 計測のための 4.26 μm のフィルタを通過して CO₂ 検出器に送られ、もう一方は、2.59 μm のフィルタを通過して H₂O 検出器に送られる。LI-6262 では、赤外線のセル中での反射率を高め、曇りを防ぐためにセルが金でコーティングされている。

光源のフォトダイオードの色温度は、1250 K に維持されている。物体から射出される赤外線のピーク波長(赤外線強度が最大となる波長)は、物体の温度により変化する。ここで、ウィーンの変異則を用いて 1250 K の表面温度において赤外線射出量が最大となる波長を計算すると 2.94 μm となり、CO₂ の吸収帯である 4.26 μm 付近の波長となっていることがわかる(図4)。

光源からの赤外線の射出量を厳密に調整することは難しいため、検出器で正しく赤外線を計測したとしても光源からの赤外線量のふらつきが計測誤差になりうる。この問題を解決するために、Li-6262 では、資料セルと比較セルの2つのセルを持つ。資料セルには分析対象とする空気が流され、比較セルには赤外線吸光が生じない CO₂ と H₂O が含まれない空気が流される。実際の CO₂ と H₂O 濃度は、資料セルと比較セルの分析結果の差から算出される。

比較セルには CO₂/H₂O 濃度が 0 ppm のガス(N₂ガスなどがよく用いられる)が流されることが多いが、資料セルへの配管内に過マンガン酸カリウムとソーダライムを取り付けることで CO₂/H₂O を除去して比較セル中の CO₂/H₂O 濃度を 0 ppm を作り出す場合もある。比較セル中のガスの CO₂/H₂O 濃度は任意の濃度でよいと思われるが、特別な理由がない場合は 0 ppm 以外の濃度のガスが流されることはない。

赤外線ガス分析計で計測される濃度は、セル体積中に占める CO₂/H₂O のモル数である。

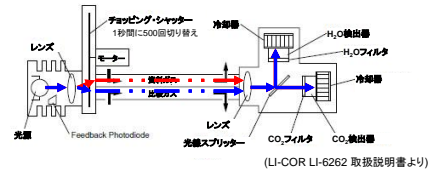


図3. LI-6262 赤外線 CO₂/H₂O 分析計 (LI-6262 マニュアルより)

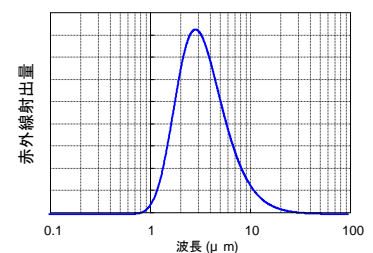


図4. 表面温度 1250 K の物体から射出される赤外線放出スペクトル

$$\begin{aligned}PV &= nRT \\ n/V &= P/RT\end{aligned}\quad (2)$$

ここで、 P 、 V 、 n 、 R 、 T はそれぞれ、セル内気圧、セル体積、 CO_2 （あるいは H_2O ）のモル数、セル内温度を表す。2式から、計測される n/V は n が一定であってもセル内気圧やセル内温度により変化することがわかる。分析計では、 T を一定とするような工夫がなされているが、 T や P が変動すると誤差要因となりえることに注意が必要である。ただし、 T や P を正確に評価することができれば2式により後で計測値を補正することもできる。

参考文献：

LI-COR, 1996: LI-6262 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ Analyzer instruction manual.

アイ・アール・システム HP：<http://www.irsystem.com/application/sensor/ndir.html>

11. ランベルト・ベールの法則の導出方法

[Answer]

以下の Web site に記載がありますので、参考にしてください。

参考ホームページ：

茶山健二, 2013: 環境計測のための機器分析法.

http://kccn.konan-u.ac.jp/chemistry/ia/contents_02/06.html