

生態環境計測学 2019.04.24 の質問・補足

回答者 : 植山

1. 産業革命前後で、陸域の CO₂ 吸収量が増加した原因は？

[Answer]

今日の陸域生態系の CO₂ 吸収量が増加した理由については、いくつかの仮設が提唱されている。1) CO₂ 施肥効果：大気 CO₂ 濃度が増加したことによって、植物の光合成活性が活発になった。2) 窒素施肥効果：産業革命以降に大気中に放出された人為起源の窒素化合物が沈着することで、植物の生育に必要な無機窒素が供給された。3) 高緯度地域の温暖化等の気候変化が生じたために植物の生育環境が改善された。4) 植物の成長：森林伐採後に再び植林されたような場所では、林齢が若くなる。成長過程の若い森林は極相林よりも多くの CO₂ を吸収する。このような若い森林の面積が産業革命以降に増えた。例えば、日本やアメリカの森林は、一度、伐採された後に植栽された若い森林であるため、CO₂ 吸収を盛んに行っていると考えられている。

2. 産業革命以前は海洋の CO₂ 収支は放出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 CO₂ 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。海洋深層からの湧昇流により深層で無機化された比較的 CO₂ 濃度の高い深層水が表層に輸送されてくると、($pCO_{2a} - pCO_{2s}$) が負になり、海洋は CO₂ の放出源となる。産業革命以前は、この湧昇にともなう放出量が海洋表層の CO₂ 吸収量よりも多かったことにより、海洋が CO₂ 放出源だったと考えられる。大気中の CO₂ 濃度が高まれば、($pCO_{2a} - pCO_{2s}$) が大きくなり、 F が大きくなることが予想される。多くの CO₂ が海洋表層にとけると pCO_{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、 pCO_{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 CO₂ 濃度と平衡状態になるまでは、海洋は CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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. 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, 2018 年にアクセス：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

4. レイリー散乱とは何か？

[Answer]

レイリー散乱とは光の波長よりも小さいサイズの粒子による光の散乱である (Wikipedia, 2019 閲覧)。気象学ではレイリー散乱は空気分子による光の散乱を指すことが多い。レイリー散乱では、散乱の強さが電磁波の波長の 4 乗に逆比例する。このため波長の短い光 (紫外線や青色の光) がより強く散乱する。空が青く見えるのは青色の光がそのほかの波長の長い光よりもより強く散乱するからである。夕焼けや朝焼けの空が赤く見えるのは、レイリー散乱により波長の短い光が散乱し、相対的に波長の長い赤色のみが観測者の目に到達するためである。いっぽう、雲が白く見えるのはミー散乱によるものである。雲中の水滴や氷核は光の波長よりも大きな粒子で構成されている。このような微粒子に対しては、散乱の波長選択性が無くなり、すべての波長の光が同様に散乱し、結果として観測者には白く見えることになる。

参考・引用文献

農学・生態学のための気象環境学, 文字信貴・平野高司・高見晋一・堀江武・桜谷哲夫編, 丸善株式会社, 199pp.

Wikipedia (<http://ja.wikipedia.org>) 関連キーワード：レイリー散乱

5. 高層大気の計測方法について教えてほしい。

[Answer]

地上高度 30 km までの高層大気の観測は、気象観測機器をゴム気球につるして飛揚させて計測するラジオゾンデ観測によりなされる。詳細は、気象庁のホームページ

(<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/upper/kaisetsu.html>) を参照されたい。

6. 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 CO₂ 濃度上昇による放射強制力の表記「1.66 (1.49-1.83) 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) W m⁻²」の表記は、1750 年以降の人間活動に伴う CO₂ 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、CO₂ 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) W m⁻²」は、90%信頼区間を表し、CO₂ 濃度上昇の放射強制力が 90%以上の確立で 1.49~1.83 W m⁻²の間である事を表している。

CO₂ などの温室効果気体は正の放射強制力を持つものに対して、エアロゾル（大気中の粒子状物質）や土地利用変化に伴うアルベドの変化（森林破壊すると反射率が高くなる）は負の放射強制力を持つ。エアロゾルについては、すべてのエアロゾルが負の放射強制力を持つわけではなく、硫酸塩や硝酸塩などのエアロゾルは短波放射を反射する効果が短波放射を吸収する効果を上回るため負の放射強制力を持つが、黒色炭素（煤）は短波放射の吸収効果が優るため、エアロゾル全体としては正味の正の放射強制力を持つ。

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/>)

7. なぜ温室効果気体は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。物質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、物質を構成する分子によって吸収される赤外線の波長が異なる。

参考文献：

Wikipedia 「赤外分光法」「分子」

8. 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。

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

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1)。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、ウィーンの変位則を用いて 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2)。

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量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 にする場合もある。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。

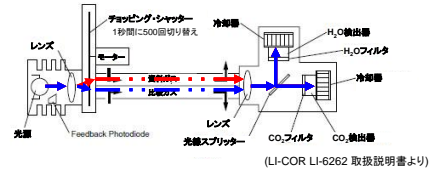


図1. LI-6262 赤外線 CO₂/H₂O 分析計 (LI-6262 マニュアルより)

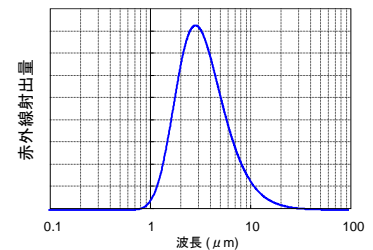


図2. 表面温度 1250 K の物体から射出される赤外線放射スペクトル

$$PV = nRT$$

$$n/V = P/RT \quad (2)$$

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、気体定数、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。

ガス分析計は、外気温の変化や分析計内部の除湿薬品の劣化等により、時間に伴って感度が増えるため頻繁に校正する必要がある。オープンパス型分析計であれば、降雨や粉塵などがミラーに付着することで赤外線が余分に吸収され、汚れの程度に伴って感度が増える。

参考文献：

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

9. 吸光分光法の計測精度を向上させる方法に関して説明がほしい。

[Answer]

光吸収により物質の濃度を計測する吸光分光法は、対象とする気体の濃度が極めて微量である場合、感度の問題から求められる精度が得られないことがある。吸光分光法による光の減衰率は、下記の式の通り光路長に依存するため、光路長を長くとることができれば、左辺での光の減衰率、即ち感度を高めることができる。

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

I_0 は媒質に入射する前の光の放射照度、 I_1 は媒質中を距離 L 移動したときの光の強度、 ϵ はモル吸光係数、 c は媒質のモル濃度、 l は光路長を表す。光路長を長くするために、セル内に2つの凹面鏡を使って何千回も光を反射させて実効的な航路を数 km にまで長くする技術が実用化された（例えば、Cavity Ring-Down Spectroscopy, CRDS; Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy, OA-ICOS）。

水蒸気など他の気体の影響を受けると測定精度は悪くなる。これについては、干渉となりえる気体（例えば、水蒸気）を同時に計測しておくことで、その影響を考慮することができる。また、赤外光源によって照射される赤外線は広い波長を含んでいることから、レーザー等の波長選択制が高い素子を光源に使えば、対象とする気体の吸収波長帯のみを計測でき、他の気体の影響を低減させることができる。

参考文献：

川崎昌博・江波進一, (2005) キャビティリングダウン分光法による微量物質検出, レーザー研究, 34, 1-6.