

1. 大気と陸域生態系間の炭素循環をつなぐ衛星観測の進展

今 須 良 一*

1. はじめに

地球温暖化の主要因である二酸化炭素 (CO₂) やメタン (CH₄) の地球表層圏における循環メカニズムや収支には、未だに多くの謎や不確実性がある。ここでは、その問題のすべてを列挙することさえできないが、この先10年ほどの間にブレークスルーとなり得る可能性を秘めた衛星観測データの利用や、異なる研究コミュニティを繋ぐアプローチについて、一つの視点を提示できればと考えている。

2. はじまりはいつも日本から

とかく、人工衛星による地球観測というと、日本はすべての面において欧米に水をあげられていて、重箱の隅を突くようなネタか、既存機器の後追いセンサーによる観測が関の山と思われている節がある。しかし、果たしてそうだろうか。米国の AIRS, TES, CrIS (以下、略号は末尾の一覧を参照)、欧州の MIPAS, IASI, MTG-IRS, カナダの ACE など、今でこそ当たり前のように打ち上げられ、各種微量気体成分の美しい全球マップを世に送り出している熱赤外分光器であるが、最初に大気成分観測が目的で打ち上げられたのは、1996年に日本の ADEOS 衛星に搭載された温室効果ガスセンサー (IMG) である (Ogawa *et al.* 1994)。当時、地球環境問題の意識が世に広まる中、宇宙産業としても貢献できるものを作りたいという旧通商産業省の要請に応え、東京大学の小川利紘先生の発案で、同センサーの開発が決まった。残念ながら衛星本体の不具合により、半年余りの観測しかできず、1997年後半のエルニーニョに関連し

た過去最大規模の森林火災などの現象を捉える直前で運用停止となったことは残念であるが、その分光分解能と校正精度は、未だにチャンピオンデータに近く、最近でもデータの引き合いがある。(以下、個人名が多々出てくるが、理由は最後に述べる。)

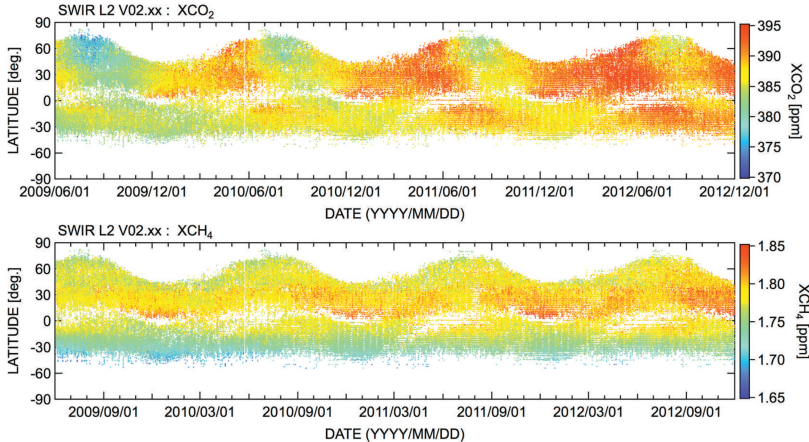
宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、国立環境研究所 (NIES)、環境省の温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT) しかり、である (Hamazaki *et al.* 2005)。NASA の OCO センサーによる CO₂ の全球観測計画と、発案はどちらが先かと言えば、意見が分かれるところもあるが、OCO よりも 1 ヶ月先に打ち上げられ、温室効果ガス観測専用衛星としての先陣を切った (残念ながら、OCO は打ち上げに失敗したが、2014年7月に、OCO-2の打ち上げが成功)。GOSAT の成果については、続く章で記す。

同じ空を飛ぶ物ではあるものの、隔測センサーではないが、はじめての観測ということでは忘れないのが航空機観測である。気象研究所の松枝秀和氏が世界に先駆けて商用定期旅客機 (日本航空) にプラスチックのサンプラーを載せ (Matsueda *et al.* 2002)、その後継プロジェクト (CONTRAIL) では国立環境研究所の町田敏暢氏が連続測定化して、CO₂などを計り続けている (Machida *et al.* 2008)。現在では、衛星による CO₂ や CH₄ の観測結果の検証に無くてはならなくなったこのデータは、取得が始まってちょうど20年だという。一方、商用ではないものの、東北大学の中澤高次先生らのグループの連続航空機観測の記録の長さは、ギネスものである (Nakazawa *et al.* 1991)。

3. トップダウンからの歩み寄り

GOSAT が打ち上げられてから4年を経過した (講演当時、現在は5年以上経過)、日本の大気環境観測

* 東京大学大気海洋研究所。
imasu@aori.u-tokyo.ac.jp
© 2015 日本気象学会



第1図 GOSATの主センサーTANSO-FTS(短波長赤外)データの解析により得られた、CO₂(上段)とCH₄(下段)の気柱平均濃度の緯度・時間変化(国立環境研究所 吉田幸生氏提供)。

衛星(TRMMは除く)で、これほど定常運用期間が長いセンサーは他にない。第1図は、GOSAT搭載センサーにより測定されたCO₂とCH₄の気柱平均濃度の緯度分布であり、この図からは4年間のトレンドさえ明確に読み取れる。

このプロジェクトの第一の目標は、インバージョン解析と呼ばれるCO₂の収支解析における誤差を半減することである。インバージョン解析というのは、物質輸送モデルで予測計算された気体濃度と、実際の観測値との差から、その物質の発生・吸収強度の、より正しい値を求めようという、一種のデータ同化手法である。最終的な輸送の結果である大気中の気体濃度データから推定するという意味で、トップダウンアプローチと呼ばれる。これに対し、地上におけるタワー観測などに基づいたCO₂の吸収量評価や、バイオマス変化の算出、各種プロセス評価などを通じた積み上げにより、対象領域における発生・吸収量を評価する方法をボトムアップアプローチと言う。この2つのアプローチによる結果には、未だに大きな隔たりがあることが問題となっている。

同分野における今後10年を考えるにあたり、各種観測データとモデルの統合利用により、より高度な炭素循環変動を把握するため、このボトムアップとトップダウンの融合が、その中心的なコンセプトとして挙げられている。これを実現するとすると、どちらかからの“歩み寄り”(具体的にはなかなか思いつかない!)か、あるいは、ギャップを埋めるものの創出が不可欠

であろう。

ボトムアップのことは素人なので、ここではあまり触れず、トップダウンについて考えてみる。トップダウンの手法で重要となるのは、何と言っても物質輸送モデルの計算精度と気体濃度の測定精度である。これらの高精度化が、“歩み寄り”の大前提となる。

まず、モデルによるCO₂の輸送計算についてであるが、最終的に個々の積雲対流によるCO₂の鉛直輸送まで表現できる発展性を考えると、非静力学モデル

が望ましい。これをベースにした物質輸送モデルは、世界的にはいくつか稼働しているが、物質保存性の優れたスキームを採用している点から、大気大循環モデルNICAM(Satoh *et al.* 2008)をベースにした輸送モデル(NICAM-Transport Model)は、特に優れている。このモデルをCO₂やCH₄の輸送計算に適用できるように改良した気象研究所の丹羽洋介氏は、CONTRAILなどの航空機により観測された上空の濃度データが、対流活動の活発な熱帯地域などにおいて、CO₂地表フラックスの推定に非常に有効であることを示した(Niwa *et al.* 2012)。

このような計算ツールの精度向上を生かすためには、高い精度の観測データが必要である。その一つが、CONTRAILデータであろう。衛星データでも熱赤外センサーでは、これら航空機とほぼ同じ高度のデータが得られるが、解析精度の点で、1桁以上劣る。しかし、衛星データの利点は、広域的なカバレッジ…と言いたいところだが、熱帯では特に雲の影響があり、有効なデータがほとんど得られない。最もデータが欲しいとされるアマゾン上空では、太陽同期のGOSATの観測時刻である午後1時頃には、いつも雲がある。数年前からGOSATの後継機の準備が始められているが、改良点の一つとして、事前スキャンされた画像データから晴天域を狙い撃ちする機能を持たせることがJAXAにおいて検討されており、実現が期待される場所である。いっそ、雲があっても解析できる手法を…という発想が当然のように出てくる

が、雲物理量の導出精度を考えると、現実的には、かなり難しい。

さらに少しでも、ボトムアップに近づく方法として、気体の地表濃度を何とか推定できないかと考える。GOSATの現行機を含むほとんどの計画中のセンサー（中国 TanSAT, 欧州 CarbonSat など）は、短波長赤外域のデータから、CO₂の気柱平均濃度を求める。しかし、植生などに取り込まれるCO₂は、地表付近の濃度、混合層が発達している場合には、その層内の平均濃度が重要な意味を持つ。これを推定できないかということで、GOSATでは上空濃度、さらに、気温のプロファイルから混合層の高さが求められるよう熱赤外バンドも搭載された。これまでのところ、分光スペクトルの校正などがまだ不完全なこともあり、期待された成果が出ていないが、スペクトルのバイアスも同時算出することにより、上記パラメータを解析する試みなど、引き続き努力が続けられている。（講演当時、2014年8月に熱赤外バンドから解析されたCO₂、CH₄の鉛直濃度データが公開された。）

4. ボトムアップアプローチに役立つ衛星データ

ボトムアップアプローチについては触れないと記したが、バイオマス量推定と森林火災に関連したリモートセンシングデータの利用については触れておこう。衛星から陸域生態系内のバイオマス量を求めることは、古くからの課題であり、様々な努力が続けられてきているが、なかなか難しい。そもそも、衛星から見えるのは、どう頑張っても地表より上にある分だけである。植物によるCO₂の取り込み量に相当するのはバイオマス量の変化分なので、せめてこの差分的な量だけでも精度良く押さえたいところである。

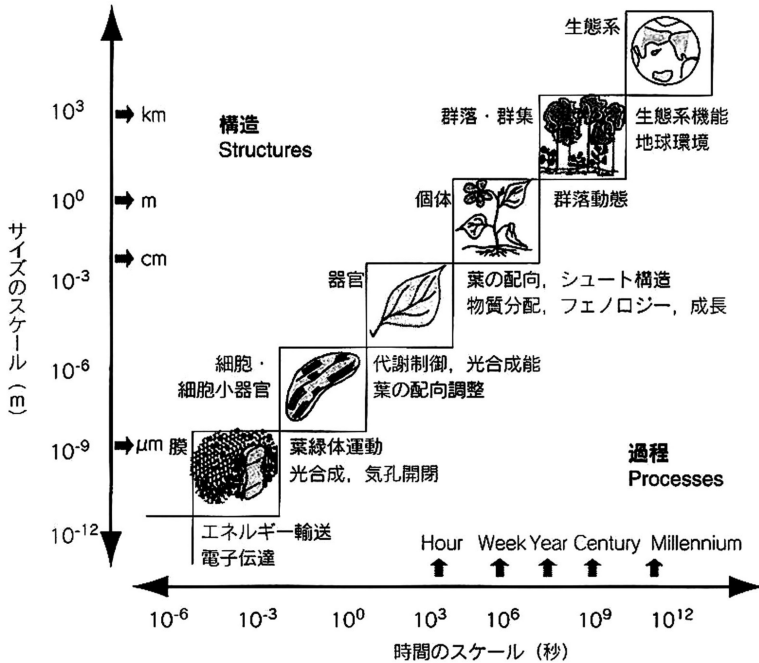
一つの試みとして、東大生産研の竹内 渉先生らによる植生指数（NDVI）の時間的な変化を利用した研究がある（Takeuchi *et al.* 2013）。この解析では、別の衛星から測定された土壌水分量などの補助的データと、陸域生態系モデル（国立環境研究所 伊藤昭彦氏）による計算結果とを組み合わせることで、最終的にバイオマス量を導出している。ここで評価されたバイオマス量に、火災の場所を示すホットスポットデータを掛け合わせ、燃焼継続時間や燃焼効率などを仮定すると、森林火災から発生するCO₂量が求められる。一連のこの手法は、NDVI値とバイオマス量に相関が高い草地などでは非常に有効であることが確認されている。広く利用されているCO₂発生量に関する

データベース、GFED-3（van der Werf *et al.* 2010）とも優劣を競うレベルにある。

一方、合成開口レーダー（SAR）のデータから、キャノピー内のバイオマス量を推定しようという試みもあるが、限られた条件のもとでしか、良い結果がえられていないようである。また、奈良女子大学の小野朗子氏により、マイクロ波ではなく、可視域のデータから、“陰指数”なる量を導出し、バイオマス量と関連づけようという試みもされている（小野・小野 2013）。ただし、現時点では、有効性は確認されているものの、理論的解釈などにまだ検討課題があるようである。

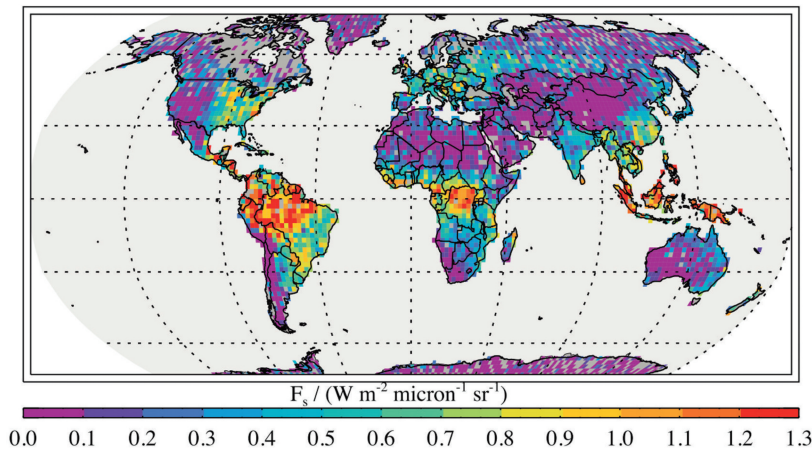
最近では、レーザレーダなどの計測技術が進み、樹木一本一本のサイズや形の計測が可能となってきた。飛行体に搭載されたシステムでは、飛行経路に沿って樹冠の輪郭の抽出が可能である（Mallet and Bretar 2009）。一方、地上設置のシステムでは、計測範囲は限られるものの、幹の太さまで抽出でき、手作業による計測を行わなくてもバイオマスとしての量の推定が行えることから、衛星観測データの検証手法として非常に有効と考えられる（千葉大学 CEReS 2012）。

このようなりモートセンシングデータがあることを念頭に、見て頂きたい図がある（第2図）。この図は、植物の生理生態学的な機能のサイズと時間スケールを表したものである（種生物学会編 2003）。「はて、どこかで見たような」と、気象学の教科書を開いたことのある人は、皆、思うだろう。そう、気象現象の空間スケールと時間スケールの関係を説明する図にそっくりである。下はミクロンサイズから、上はkmのサイズまで。まるで、エアロゾルが雲形成を通して、気象、気候場を変えるというストーリーと同じような現象が起きているのではと想像が膨らむ。気候モデルの中には、さまざまな小さなプロセスがパラメタライズされ、より大きなスケールの現象の中に組み込まれて表現される（最近の気候モデルは、エアロゾルの粒径分布までも扱い始めているが）、同じ事が、陸域生態系モデルでも行われているはずで、その高精度化のためには、プロセススタディーが最も重要であることは確かである。しかし、「全球での総量は？」といった問いかけをした途端、別の手段で得られたデータの持ち込みが必要となる。その一つが、衛星データによる全球観測であろう。第2図のスケールングの中で、どの部分に、どのような“拘束条件”を与えられるかとい



第2図 植物における生理生態学的機能のサイズと時間スケール。「光と水と植物のかたち」(種生物学会編 2003)より。オリジナルは, Osmond and Chow (1988) と Ackerly (1997)。

A Chlorophyll a fluorescence at 755 nm, June 2009 through May 2010 average



第3図 GOSAT 衛星搭載センサー-TANSO-FTS のバンド1のデータ解析により得られたクロロフィル-a 蛍光の強度。データは、2009年6月から2010年5月までの平均。(Frankenberg et al. 2011より改変)

5. 大気と陸域生態系をつなぐもの?

一クロロフィル蛍光—
GOSAT プロジェクトでは、思わぬ副産物があった。それは、植物のクロロフィル蛍光強度(絶対値)の導出である。考えたのは日本人ではなく、第2章の“はじめ”の話しからは残念であるが、そのインパクトは徐々に広がりつつある。そもそもこれはどういうことかということ、GOSATの主センサーであるTANSO-FTSのバンド1は、0.758~0.775 μm付近にある酸素の吸収バンド(O₂-A)に感度があり、そのデータからCO₂の気柱平均濃度を求めるときに必要な地表気圧を導出している。ところが、ちょうどこの波長付近は、植物のクロロフィルが太陽光を受けたときに発する蛍光の波長域でもあり、スペクトロメーターであるTANSO-FTSでは、その強度も測定が可能というのである。ただし、同波長域には、光源となる太陽光中に太陽上層の元素などによる吸収線であるフラウンホーファー線が多く含まれ、その影響を正確に取り除かなければ、蛍光強度が求められない。そのため、当初はその算出に、ほとんど期待感がなかった。しかし、Frankenberg et al. (2011)は、データの正確な取り扱いにより、それを可能にした。第3図は、植物の光合成により生産された有機物量である総一次生産量(GPP)推定の元となった蛍光強

う見方が、衛星観測の役割を考える上で、新たな角度からの視点を与えるように思う。

データの正確な取り扱いにより、それを可能にした。第3図は、植物の光合成により生産された有機物量である総一次生産量(GPP)推定の元となった蛍光強

度の全球マップである。一般に、クロロフィルに関連のある量として、植生指数があるが、彼らの論文の中では、多くの地域で、その値がクロロフィル蛍光強度と一対一の直線上に乗ることが示されている。結果、「はい、両者は良い相関ですね」で、終わりそうである。しかし、この意味するところは、実は非常に奥深い。仮に両者の値が、単にクロロフィル量のみに関係するものであるならば、これらの値は瞬時視野内に存在する植物の量や、植物の一個体が持つクロロフィル量に比例するのみである（実際は、もう少し複雑であるが）。しかし、蛍光の放出される理由を考えると、途端に悩ましくなる。そもそも植物が蛍光を出すと言うことは、せっかく吸収した光を光合成には使わず、植物にとって意味のない蛍光という形でエネルギーを外に放出しているということである。つまり、蛍光が強いほど、ある条件下では、光合成を行っていないということの指標ともなり得るのである。同じ光を受けながら、光合成を行わない場合というのは、どういう場合か。時に、水不足で強い渇水ストレスを受けているのかもしれない。または、低温による影響かもしれない。あるいは数年前にヨーロッパであった熱波の影響のように高温が原因のダメージかもしれない。植生指数とクロロフィル蛍光強度の相関を示す直線から大きく外れた観測データこそ、植物が我々に伝えたいと思っている情報なのではないかという気がしてくる。こうなると、まさに、東北大学の彦坂幸毅先生らが専門とするような植物生理生態学の出番なのではないだろうか。先に書いた、“ボトムアップとトップダウンのギャップを埋める物”の一つは、まさにこれなのではないかと、今後の研究の進展に期待が高まるばかりである。

最後になるが、本文書を書くに当たり、論文の引用ではなく、本人の了承も得ないまま、個人の名前をあげて挙げさせて頂いた。それは、ボトムアップとトップダウンという2つのアプローチ、あるいは、もっと広く、大気科学と陸域生態学の二つの分野を本当に繋ぐものは、新たな物理量の導入なのではなく、これらの分野を専門とする人と人との交流にあるのではないのかとの思いからである。どうか、その思いに免じて、場違いな論調で勝手な掲載をしたことをお許し願いたい。

略語一覧

ACE : Advanced Composition Explorer

ADEOS : Advanced Earth Observing Satellite
 AIRS : Atmospheric Infrared Sounder
 CarbonSat : Carbon Monitoring Satellite
 CONTRAIL : Comprehensive Observation Network for Trace gases by AirLiner
 CrIS : Cross-track Infrared Sounder
 GFED-3 : Global Fire Emission Database-3
 GOSAT : Greenhouse gases Observing SATellite
 GPP : Gross Primary Production
 IASI : Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
 IMG : Interferometric Monitor for Greenhouse gases
 MIPAS : Michaelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding
 NDVI : Normalized Difference Vegetation Index
 NICAM : Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model
 MTG-IRS : Meteosat Third Generation-InfraRed Sounder
 OCO : Orbiting Carbon Observatory
 SAR : Synthetic Aperture Radar
 TanSAT : Chinese Carbon Dioxide Observation Satellite
 TANSO-FTS : Thermal And Near-infrared Sensor for carbon Observation - Fourier Transform Spectrometer
 TES : Tropospheric Emission Spectrometer
 TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission

参考文献

- Ackerly, D., 1997: Allocation, leaf display, and growth in fluctuating light environments. *In*: F. A. Bazzaz and J. Grace (eds.), Plant Resource Allocation, Academic Press, London, 231-264.
- 千葉大学環境リモートセンシング研究センター (CEReS), 2012 : 年報. 第17号, 89pp.
- Frankenberg, C. *et al.*, 2011: New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L17706, doi:10.1029/2011GL048738.
- Hamazaki, T., Y. Kaneko, A. Kuze and K. Kondo, 2005: Fourier transform spectrometer for Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT). *Proc. SPIE*, **5659**, 73-80.
- Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, Y. Nakagawa, K. Hirokuni, N. Kondo, K. Goto, T. Nakazawa, K. Ishikawa and T. Ogawa, 2008: Worldwide measurements of atmospheric CO₂ and other trace gas species using commercial airlines. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **25**,

- 1744-1754.
- Mallet, C. and F. Bretar, 2009: Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **64**, 1-16.
- Matsueda, H., H. Yoshikawa-Inoue and M. Ishii, 2002: Aircraft observation of carbon dioxide at 8-13 km altitude over the western Pacific from 1993 to 1999. *Tellus*, **54B**, 1-21.
- Nakazawa, T., K. Miyashita, S. Aoki and M. Tanaka, 1991: Temporal and spatial variations of upper tropospheric and lower stratospheric carbon dioxide. *Tellus*, **43B**, 106-117.
- Niwa, Y., T. Machida, Y. Sawa, H. Matsueda, T. Schuck, C. A. M. Brenninkmeijer, R. Imasu and M. Satoh, 2012: Imposing strong constraints on tropical terrestrial CO₂ fluxes using passenger aircraft based measurements. *J. Geophys. Res.*, **117**, D11303, doi: 10.1029/2012JD017474.
- Ogawa, T., H. Shimoda, M. Hayashi, R. Imasu, A. Ono, S. Nishinomiya and H. Kobayashi, 1994: IMG, interferometric measurement of greenhouse gases from space. *Adv. Space Res.*, **14**, 25-28.
- 小野朗子, 小野厚夫, 2013: バンド和で正規化した分光放射率を用いた落葉針葉樹カラマツ林の植生解析. *日本リモートセンシング学会誌*, **33**, 200-207.
- Osmond, C. B. and W. S. Chow, 1988: Ecology of photosynthesis in sun and shade: Summary and prognostications. *In*: J. R. Evans, S. von Caemmerer and W.W. Adams III (eds.), *Ecology of Photosynthesis in Sun and Shade*, CSIRO Australia.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comput. Phys.*, **227**, 3486-3514.
- 種生物学会編, 2003: 種生物学シリーズ「光と水と植物のかたち」植物生理生態学入門. 村岡裕由, 可知直毅 責任編集, 文一総合出版, 319pp.
- Takeuchi, W., A. Sekiyama and R. Imasu, 2013: Estimation of global carbon emissions from wild fires in forests and croplands. *IGARSS 2013*, 1805-1808.
- van der Werf, G. R., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, M. Mu, P. S. Kasibhatla, D. C. Morton, R. S. DeFries, Y. Jin and T. T. van Leeuwen, 2010: Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009). *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 11707-11735.