

陸域生態系の炭素収支のリモートセンシング[‡]

富山大学 極東地域研究センター

串田 圭司*

1. はじめに

衛星リモートセンシングは広域の情報を瞬時に得ることから、陸域生態系の炭素収支の地理的分布やその変動を見積もるのに使われる。ひとつは、可視から短波長赤外域の光学センサーで地表面の反射光を見ることにより、植生の光合成有効放射吸収率 (FAPAR) や葉面積指数 (LAI) を見積もる。これらと植物機能型 (plant functional type) ごとに得られている知見から、間接的に純一次生産量 (NPP) を推定する。原野・森林火災による影響は、その空間的広がりや特徴を光学センサー、熱赤外センサー、ライダー、合成開口レーダー (SAR) で把握し、地上観測で得られている知見と合わせてCO₂収支を推定する。これに対し、2009年1月に打ち上げられた温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT) などは、高分光解像度の観測で気体分子に起因する吸収スペクトルを得る^{1,2)}。それから直接的に大気中のCO₂およびメタンの濃度を見積もる。さらに、それと逆推定モデルにより、地表面のCO₂およびメタンのフラックスを得る。これら陸域生態系の炭素収支のリモートセンシング研究について、最新の研究動向と将来展望を述べる。

2. FAPARとLAIによるNPPの見積もり

光学センサーによるFAPARとLAIの見積もりは、気象衛星以外の最初の地球観測衛星Landsat 1号が打ち上げられた1972年に端を発する。1980年代には、近赤外光と赤色光の差をそれらの和で除して得られる正規化植生指数(NDVI)によりFAPARやLAIを見積られることが、各種事例で示されるとともに理論的に考察された^{3,4)}。折しも、大気中CO₂濃度の増加が観測され、大気大循環モデルによる温度上昇が予測されており、陸

域の炭素収支の早急な見積もりが重視されていた⁵⁾。

光合成有効放射吸収量 (APAR (MJ m⁻²))は、植物群落そのものの特徴を表す FAPAR (FAPAR)と太陽光と大気の状態に依存する光合成有効放射量 (PAR (MJ m⁻²)) の積で表される。

$$APAR = FAPAR \cdot PAR \quad (1)$$

ランベルト・ベールの法則が成り立つと仮定すると、群落内の光合成有効光の消散係数をKとしてLAI (LAI) とFAPARの関係は以下のように表される。

$$LAI = -\frac{\ln(1 - FAPAR)}{K} \quad (2)$$

年積算光合成有効放射吸収量 ($\Sigma APAR$ (MJ m⁻² yr⁻¹)) と年NPP (NPP (gC m⁻² yr⁻¹)) とは光利用効率 ϵ (gC MJ⁻¹) により、以下のように関係づけられる⁶⁾。

$$NPP = \epsilon \Sigma APAR \quad (3)$$

ϵ が植物群系 (北方針葉樹林、温帯湿潤針葉樹林、落葉樹林など) ごとに一定値だと仮定すると、FAPARとNDVIの相関関係から、NPPは年積算 NDVI($\Sigma NDVI$) と植物群系ごとに定める変換効率 ϵ' (gC m⁻² yr⁻¹) を用いて、以下の式で近似できる⁷⁾。

$$NPP = \epsilon' \Sigma NDVI \quad (4)$$

これに対していくつかの議論が挙がる。まず ϵ は水分ストレスや温度、養分にも依存するという点⁸⁾であ

[‡] 解説特集「光合成研究 —生態学からのアプローチ—

* 連絡先 E-mail: kkushida@sci.u-toyama.ac.jp

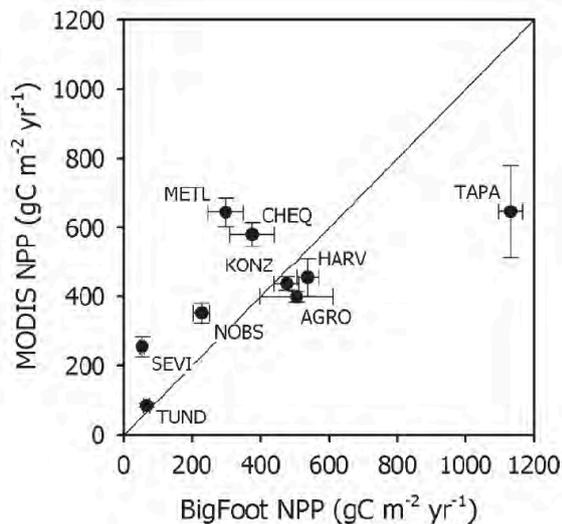


図1 地上タワー観測に基づくNPP (BigFoot NPP: 横軸) と衛星搭載センサーMODISによるNPP (MODIS NPP: 縦軸) との関係¹⁰⁾。

北方森林(NOBS)、広葉樹林(HARV)、混交林(CHEQ)、針葉樹林(METL)、熱帯湿潤林(TAPA)、極地ツンドラ(TUND)、砂漠とステップ(SEVI)、草地(KONZ)、トウモロコシ畑と大豆畑(AGRO)ごとに示している。

る。水分ストレスと温度については、気象データによって与えられた。また、 $\Sigma APAR$ は NPP よりも総生産量 (GPP) に関係しており、GPPとNPPの差である植物呼吸量は LAI と比葉面積、アロメトリー式、気温データによるモデルで与えられた。これらの内 LAI はリモートセンシングにより与えられた。このように NPP見積もりは陸域炭素循環モデルBiome-BGCを用いて行われ、地球観測衛星 (EOS) 搭載の中分解能撮像分光放射計 (MODIS) のプロダクトMOD17として提供されている⁹⁾。図1¹⁰⁾に地上タワー観測に基づくNPPとMODISによるNPPの関係を示す。

全球で見積もろうとすると、地域レベルでは考慮できる因子でも、どうしても近似、省略しなければならないものが生じる。同一の植物群系では植生種による ϵ の違いは水分や温度の条件による違いに比べて小さいと言われる一方で、同一の植物群系でも植生種の違いによって ϵ が異なる場合¹¹⁾がある。NDVIとFAPARの関係も、植生種¹²⁾や同一種であっても生育状況に依存し¹³⁾、それが無視できない場合も考えられる。北方森林では林床のNPPが林冠のNPPに匹敵する。林冠と林床はそれぞれ別々の仕方で群落のNDVIに寄与するため、それらのリモートセンシングによる分離も研究されている¹³⁻¹⁵⁾。

実際の陸域の炭素収支は、NPPから土壌呼吸量を引

いた純生態系生産量(NEP)や、さらに原野・森林火災による燃焼、収穫による持ち出し、および側方への炭素の移流などを考えた純生物相生産量(NBP)に基づかなければならない。土壌呼吸量は、土壌の化学および物理特性に依存するためその評価が難しいが、温度、降水量およびリモートセンシングによって得るLAIをパラメータとしたモデル化の試み¹⁶⁾もある。陸域の炭素収支を考える上で大きな位置を占めるのが、次章で述べる原野・森林火災の評価である。

3. 原野・森林火災の影響

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル)第4次報告書¹⁷⁾によると、世界の原野・森林火災は、人為起源の二酸化炭素放出量 (化石燃料の燃焼とセメント生産: $7.2 \pm 0.3 \text{ GtC yr}^{-1}$) の20~60%のCO₂を燃焼時に放出している。これは陸域の正味の炭素吸収量 ($0.9 \pm 0.6 \text{ GtC yr}^{-1}$) の1.6~4.8倍である。植生の回復に伴いCO₂が吸収されるが、火災の頻度が増すと植生が十分回復しない内に火が入り、植生や土壌中の炭素貯蔵量が減る。このことは、陸域から大気へのCO₂の放出を意味する。温度上昇によって焼失面積が増えているという結果¹⁸⁾もある。火災による炭素収支を考える場合、燃焼時のCO₂放出と植生回復過程でのNEPの両方を考えなければならない。

燃焼時のCO₂放出は、熱赤外リモートセンシング、可視—短波長赤外リモートセンシング、および降水量分布によりそれぞれ算出する、燃焼面積、地上炭素蓄積量、および燃焼度合いの3者の積により見積もる¹⁹⁾。しかしながら、現在の地球観測衛星による火災検知は、実際の火災の半分程度の火災を検知するに止まる²⁰⁻²³⁾。また燃焼度合いは、森林全体が燃えるか枯死する樹冠火、林床が燃えて林冠が燃え残る地表火といった火災の種類にも依存する。シベリアのタイガ林では50~80%の火災が地表火であり²⁴⁾、樹冠火は地表火の10倍のCO₂を燃焼中に放出する²⁵⁾。シベリアカラマツ林の樹冠火と地表火は火災直後の Landsat ETM+ (地上分解能 30 m) によれば区分できるが、大陸規模を覆うMODIS (地上分解能1km) では難しい。両者を組み合わせて樹冠火と地表火の割合の地理的分布を見積もることが研究されている²⁶⁾。

植生回復過程でのNEPは、前章の見積もり法に包含されるが、火災後の回復過程では、前章の炭素収支見

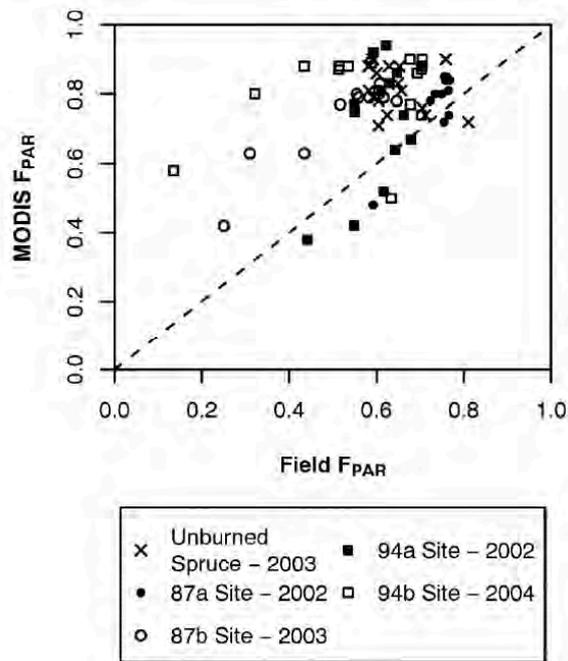


図2 アラスカ黒トウヒ林火災地の地上観測によるFAPAR (Field F_{PAR}: 横軸) とMODISによるFAPAR (MODIS F_{PAR}: 縦軸) (ともに8日間平均)との関係²⁷⁾。

xは対照区、●は火災後15年の区(1987年に燃えた)、○は火災後16年の区(1987年に燃えた)、■は火災後8年の区(1994年に燃えた)、□は火災後10年の区(1994年に燃えた)を示す。各区に対応する複数の点は異なる季節のものを示す。

積もりモデルの前提条件からの乖離が大きくなる。森林が燃え残った森林、焼け跡、草地、若い森林といったものに置き換わることにより、NDVIとFAPARの関係や ϵ が変化する。火災後のMODISによる、FAPAR見積もりが実測に対して平均0.16の過大評価になったという結果²⁷⁾や、LAI見積もりが実測の1.5~2倍になったという結果²⁸⁾がある。図2²⁷⁾にアラスカ黒トウヒ林の火災後のFAPARの実測値とMODISによる見積もり値との関係を示す。植生の更新は火災の重度にも関わる。土壌呼吸量については、火災後増加する場合と減少する場合がある。燃え残りの枯死した植物の分解や土壌表面の温度上昇は土壌呼吸量を増加させ²⁹⁾、土壌炭素の変質や土壌微生物の減少は土壌呼吸を減少させる³⁰⁾。このように、植生回復過程での炭素収支は、それぞれの生態系の特徴に合った見積もり法の検討が求められている。

森林火災後の植生変化に伴う炭素収支の見積もりでは、ライダーによる樹高の見積もり³¹⁾や合成開口レーダーによる現存量の見積もり³²⁾が活用されている。分光情報と樹高や現存量の情報を組み合わせることによ

り、複雑な森林火災後の生態系を把握しようというものであり、その有効性が示されている。

4. 温室効果ガス観測衛星

これまで述べた陸域炭素収支のリモートセンシングが、植生の状態をリモートセンシングにより得て、気象データと合わせて炭素収支を求めるという方法であった。これに対し、温室効果ガス観測衛星による方法では、高分光解像度の観測で気体分子に起因する吸収スペクトルから、大気中のCO₂およびメタンの濃度を見積もる^{1,2)}。得られた濃度の地理的分布から、逆推定モデルにより、地表面のCO₂およびメタンのフラックスを得る。2つの方法は異なった原理に基づくため、相互の比較が可能である。2つの方法で算出した地表面のフラックスを比較することには、それぞれの方法を改良する方策を与えるであろう。植生の状態から炭素収支を求める方式は、既往の炭素循環モデルから外れるケースを除外してしまうに対し、温室効果ガス観測衛星による方式は、そうしたケースについても、拾うことができると期待される。また、植生の状態から求める方式は、CO₂については有効であるが、湖沼³³⁾や湿地³⁴⁾からのメタン放出については、放出量の空間的時期的変動が大きいため、リモートセンシングによる見積もりが難しかった。温室効果ガス観測衛星による方式は、原野・森林火災や湖沼や湿地のメタン発生や天然ガスパイプラインのガス漏洩などの他にも、これまで見落とされていた素過程を見つけることができるかも知れない。

5. 地上観測およびモデルとの関わり

気候モデルと陸域炭素収支モデルを合わせたモデルによれば、将来の地球温暖化と陸域炭素収支との相互作用や各種の対策の効果を予想することができる³⁵⁾。そこでは、温暖化と陸域炭素収支の相互作用の素過程の観測研究が根幹をなしている。特に、原野・森林火災、植物機能型の変化などの扱いが鍵になると考える。リモートセンシングによる陸域炭素収支の地理的分布は、こうしたモデルの検証に用いることができる。最初の地球観測衛星が稼働して40年近く経ち、多くのデータが集積されているが、衛星データから何が読み取れるかという、衛星データと地上情報との対応について、今後より一層の研究による精緻化が求められる。

6. おわりに

陸域生態系の炭素収支のリモートセンシング研究では、全球の陸域の炭素収支を近似するという方向性が、研究の大きな流れを作ってきた。地域レベルでは考慮できても全球レベルでとらえることが難しい要素は省略されてきた。近年、原野・森林火災の影響や植物機能型の変化の影響が、地上観測を通して少しずつ明らかになり、陸域の生態系の炭素収支を考える上で無視できないことが分かってきた。これらの影響とリモートセンシングデータとの関係は、それぞれの生態系ごとに検討する必要があり、今後生態系ごとに、炭素収支の構造とリモートセンシングとをより密接に結びつけるような観測が求められる。それと合わせて、直接大気のコ₂やメタンの濃度を把握するGOSATなどの衛星や樹高を見積もるライダーといった、新しいセンサーの可能性を探らなければならない。こうしたリモートセンシングデータは、気候モデルと陸域炭素収支モデルを合わせたモデルの検証に用いることができ、さらなるモデルや将来予測の進展に寄与するであろう。

謝辞

北海道大学低温科学研究所の原登志彦教授には、本誌に出版の機会を与えていただいた。ここに感謝します。

Received March 19, 2010, Accepted March 24, 2010,
Published April 30, 2010

参考文献

1. Yokota, T., Yoshida, Y., Eguchi, N., Ota, Y., Tanaka, T., Watanabe, H., and Maksyutov, S. (2009) Global Concentrations of CO₂ and CH₄ Retrieved from GOSAT: First Preliminary Results, *SOLA* 5, 160-163.
2. 井上元 (2008) GOSATと炭素循環研究, 日本リモートセンシング学会誌 28, 114-118.
3. Sellers, P. J. (1987) Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration, II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence, *Remote Sens. Environ.* 21, 143-183.
4. Running, S. W. and Nemani, R. R. (1988) Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates, *Remote Sens. Environ.* 24, 347-367.
5. Emanuel, W. R. and Killough, G. G. (1984) Modeling Terrestrial Ecosystems in the Global Carbon Cycle With

Shifts in Carbon Storage Capacity by Land-Use Change, *Ecology* 65, 970-983.

6. Monteith, J. L. (1972) Solar radiation and productivity in tropical ecosystems, *J. Appl. Ecol.* 9, 747-766.
7. Goward, S. N., Tucker, C. J., and Dye, D. G. (1985) North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer, *Vegetatio* 64, 3-14.
8. Nemani, R. R. and Running, S. W. (1989) Testing a theoretical climate-soil-leaf area hydrologic equilibrium of forests using satellite data and ecosystem simulation, *Agric. For. Meteorol.* 44, 245-260.
9. Zhao, M., Heinsch, F. A., Nemani, R. R., and Running, S. W. (2005) Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set, *Remote Sens. Environ.* 95, 164-176.
10. Turner, D. P., Ritts, W. D., Cohen, W. B., Gower, S. T., Running, S. W., Zhao, M., Costa, M. H., Kirschbaum, A. A., Ham, J. M., Saleska, S. R., and Ahl, D. E. (2006) Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes, *Remote Sens. Environ.* 102, 282-292.
11. Turner, D. P., Gower, S. T., Cohen, W. B., Gregory, M., and Maier-Sperger, T. K. (2002) Effects of spatial variability in light use efficiency on satellite-based NPP monitoring, *Remote Sens. Environ.* 80, 397-405.
12. Myneni, R. B., Nemani, R. R., and Running, S. W. (1997) Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 35, 1380-1393.
13. Kushida, K., Kim, Y., Tanaka, N., and Fukuda, M. (2004) Remote sensing of net ecosystem productivity based on component spectrum and soil respiration observation in a boreal forest, interior Alaska, *J. Geophys. Res.* 109, doi: 10.1029/2003jd003858.
14. Kobayashi, H., Delbart, N., Suzuki, R., and Kushida, K. (2010) A satellite-based method for monitoring seasonality in the overstory leaf area index of Siberian larch forest, *J. Geophys. Res.* 115, doi: 10.1029/2009JG000939.
15. Kushida, K., Isaev, A. P., Maximov, T. C., Takao, G., and Fukuda, M. (2007) Remote sensing of upper canopy leaf area index and forest floor vegetation cover as indicators of net primary productivity in a Siberian larch forest, *J. Geophys. Res.* 112, doi: 10.1029/2006jg000269.
16. Hibbard, K. A., Law, B. E., Reichstein, M., and Sulzman, J. (2005) An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems, *Biogeochemistry* 73, 29-70.
17. Denman, K. L., Brasseur, G., Chidthaisong, A., Ciais, P., Cox, P. M., Dickinson, R. E., Hauglustaine, D., Heinze, C., Holland, E., Jacob, D., Lohmann, U., Ramachandran, S., da Silva Dias, P. L., Wofsy, S. C., and Zhang, X. (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* (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller Eds.) pp 499-588, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
18. Gillett, N. P., Weaver, A. J., Zwiers, F. W., and Flannigan, M. D. (2004) Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires, *Geophys. Res. Lett.* *31*, doi:10.1029/2004GL020876.
 19. van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Collatz, G. J., Kasibhatla, P. S., and Arellano, A. F. (2006) Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004, *Atmos. Chem. Phys.* *6*, 3423-3441.
 20. Csiszar, I. A., Morisette, J. T., and Giglio, L. (2006) Validation of active fire detection from moderate-resolution satellite sensors: The MODIS example in northern Eurasia, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* *44*, 1757-1764.
 21. Kushida, K. (2010) Detection of active wildland fires using multitemporal MODIS images, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, doi: 10.1109/LGRS.2009.2034029, in press.
 22. Morisette, J. T., Giglio, L., Csiszar, I., and Justice, C. O. (2005) Validation of the MODIS active fire product over Southern Africa with ASTER data, *Int. J. Remote Sens.* *26*, 4239-4264.
 23. Morisette, J. T., Giglio, L., Csiszar, I., Setzer, A., Schroeder, W., Morton, D., and Justice, C. O. (2005) Validation of MODIS active fire detection products derived from two algorithms, *Earth Interactions* *9*, 13.
 24. Conard, S. G., Sukhinin, A. I., Stocks, B. J., Cahoon, D. R., Davidenko, E. P., and Ivanova, G. A. (2002) Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia, *Climatic Change* *55*, 197-211.
 25. Conard, S. G. and Ivanova, G. A. (1997) Wildfire in Russian boreal forests - Potential impacts of fire regime characteristics on emissions and global carbon balance estimates, *Environ. Pollut.* *98*, 305-313.
 26. Kushida, K., Isaev, A. P., Takao, G., Maximov, T. C., and Fukuda, M. (2007) Remote sensing of total and surface burn ratios following a wildfire in East Siberia using 30 m - 1 km resolution images, *Eurasian J. Fore. Res.* *10*, 105-114.
 27. Steinberg, D. C., Goetz, S. J., and Hyer, E. J. (2006) Validation of MODIS F-PAR products in boreal forests of Alaska, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* *44*, 1818-1828.
 28. Chen, X., Vierling, L., Deering, D., and Conley, A. (2005) Monitoring boreal forest leaf area index across a Siberian burn chronosequence: a MODIS validation study, *Int. J. Remote Sens.* *26*, 5433-5451.
 29. Bergner, B., Johnstone, J., and Treseder, K. K. (2004) Experimental warming and burn severity alter soil CO₂ flux and soil functional groups in a recently burned boreal forest, *Glob. Change Biol.* *10*, 1996-2004.
 30. Waldrop, M. P. and Harden, J. W. (2008) Interactive effects of wildfire and permafrost on microbial communities and soil processes in an Alaskan black spruce forest, *Glob. Change Biol.* *14*, 2591-2602.
 31. Goetz, S. J., Sun, M., Baccini, A., and Beck, P. S. A. (2010) Synergistic use of spaceborne lidar and optical imagery for assessing forest disturbance: An Alaska case study, *J. Geophys. Res.* *115*, doi: 10.1029/2008JG000898.
 32. Minchella, A., Del Frate, F., Capogna, F., Anselmi, S., and Manes, F. (2009) Use of multitemporal SAR data for monitoring vegetation recovery of Mediterranean burned areas, *Remote Sens. Environ.* *113*, 588-597.
 33. Walter, K. M., Zimov, S. A., Chanton, J. P., Verbyla, D., and Chapin, F. S. (2006) Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming, *Nature* *443*, 71-75.
 34. Tokida, T., Miyazaki, T., Mizoguchi, M., Nagata, O., Takakai, F., Kagemoto, A., and Hatano, R. (2007) Falling atmospheric pressure as a trigger for methane ebullition from peatland, *Glob. Biogeochem. Cycle* *21*, doi: 10.1029/2006GB002790.
 35. Randerson, J. T., Hoffman, F. M., Thornton, P. E., Mahowald, N. M., Lindsay, K., Lee, Y. H., Nevison, C. D., Doney, S. C., Bonan, G., Stockli, R., Covey, C., Running, S. W., and Fung, I. Y. (2009) Systematic assessment of terrestrial biogeochemistry in coupled climate-carbon models, *Glob. Change Biol.* *15*, 2462-2484.

Remote Sensing of Terrestrial Ecosystem Carbon Budgets

Keiji Kushida*

Center for Far Eastern Studies, University of Toyama