

陸域生態系—水文—大気プロセス研究における水の安定同位体比情報利用の最前線 Frontier of using stable water isotopic information in studies on land-ecological, hydrological, and atmospheric process

芳村 圭^{1*}
YOSHIMURA, Kei^{1*}

¹ 東京大学大気海洋研究所

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

陸域生態系—水文—大気プロセスにおける水循環の全体像についての理解は十分進んでいると思われがちである。しかしながら、例えば降水中の海洋起源の水の割合 (Gimeno et al., 2012) や、陸面からの潜熱フラックス、すなわち蒸発散量のうち、植生を経由する蒸散量と土壌からの蒸発量の割合 (Jasechko et al., 2013)、対流雲生成活動における激しい相変化を伴う雲中の水循環や雲底下の蒸発効率 (Moyer et al., 2012)、ハドレー循環の下降流地帯 (乾燥地帯) における水蒸気の挙動 (Frankenberg et al., 2009) などは、地球水循環を理解するうえの基本的な事項であるにもかかわらず未だ十分理解されているとは言えず、活発な議論が行われている最中である。いずれも将来気候の予測に大きな影響を与えるものであり、理解の向上は喫緊の課題である。水の安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$ と δD) は水の相変化に対して敏感であり、特に上記のような相変化を伴う水循環過程の理解向上への利用に適した指標である。これまでは質量分析計で測定していたため、液体の水を採集する必要があり、結果的に降水や地表水といった地表面のデータが大部分であったが、近年の技術進歩により、人工衛星搭載型の赤外線スペクトル分光計や可搬型のレーザー分光計を用いて水蒸気同位体比が圧倒的高頻度で測れるようになり、データ数が爆発的に増加している。また、水同位体を含む大循環モデル・領域モデル・雲解像モデルなどの開発が飛躍的に進み、これまで仮説の限定的な側面からの状況証拠程度にしか使われてこなかった同位体情報 (例えば高緯度への水蒸気輸送への証拠として同位体比に緯度傾度が生じていることなど) が、より詳細な物理過程の包括的な検証に使われるようになってきている (雲微物理過程におけるパラメタの同定に同位体情報を用いること (Risi et al., 2012) など)。しかしながら、そのように爆発的に増加した水蒸気データを多角度からまだ十分に使い切っていないという現状も依然として存在している。こういった背景から、著者は全球水同位体比データ同化システムを世界に先駆けて開発し (芳村ら, 2013; Yoshimura et al., 2014)、水蒸気同位体比データを同化することにより、水同位体比の時空間分布だけでなく気温・風速・湿度といった大気循環場そのものを拘束できることを示した。このことは、地球水循環研究において、水同位体比が持つ大気中での降水履歴と輸送経路などのユニークな情報を、他の気象要素との整合性を考慮しながら加えることによって、より正確な地球水循環の姿を描き出すことが可能であることを示している。また、降水の同位体比及びアイスコアや樹木セルロース、サンゴ殻、石筍などの同位体比をデータ同化システムへの入力情報として用いることによって、プロキシデータの拘束による、直接観測が存在しない過去の「気候再解析」実現への可能性を秘めている。

キーワード: 水安定同位体比, データ同化, 水循環, 気候プロキシ, 気候再解析, 分光分析

Keywords: stable water isotope ratio, data assimilation, hydrologic cycle, climate proxy, climate reanalysis, spectroscopic analysis

ハイパースペクトル日射観測の意義 Significance of hyper spectral solar radiation observation

久米 篤^{1*}; 秋津 朋子²; 奈佐原 顕郎²
KUME, Atsushi^{1*}; AKITSU, Tomoko²; NASAHARA, Kenlo²

¹九州大学農学部附属北海道演習林, ²筑波大学 生命環境系

¹Ashoro Research Forest, Kyushu University, ²Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

Land plants exhibit relatively weak absorbance of green light at around 550 nm, for reasons which remain elusive. Most research, however, has assumed that the solar radiation spectrum can be averaged without considering the spectral dynamics. The relations between the spectrum of incident radiation and light-harvesting pigments of organisms are crucial to understanding photosynthesis and light use efficiency. Although several light-harvesting pigments exist, most land plants use specific light harvesting chlorophylls, Chl a and Chl b, and carotenoids. Wavelengths longer than 700 nm or shorter than 400 nm are scarcely absorbed by chlorophylls, and cannot be used for photosynthesis. Radiation within the 400 to 700 nm waveband is defined as photosynthetically active radiation (PAR). However, chlorophylls do not absorb photons in the PAR waveband evenly. Only a few per cent of relative absorbance occurs in the green region (500 to 600 nm), nevertheless the photosynthetic quantum yields are equivalent to those from blue and red light.

Incident PAR comprises two main components, direct PAR (PARdir), which arrives directly from the sun, and diffuse PAR (PARdif), which is sunlight scattered by sky and clouds. These components are characterized by large differences in light quantity, directional characteristics and spectral quality. PARdir is highly directional and its energy can be concentrated and localized on a surface. PARdif is non-directional and its incident energy is well-averaged across a surface, allowing it to penetrate deeper into canopies. Consequently, PARdir and PARdif play different roles in the photosynthetic process both at the scale of individual leaves and of canopies. Most research, however, has assumed that the solar radiation spectrum can be averaged without considering the spectral and directional dynamics.

We had developed a precise solar tracking device for detecting direct and diffuse radiation. Direct and diffuse radiations were measured separately by two grating spectroradiometers (MS700, EKO Instruments Co. Ltd., Tokyo, Japan) fixed to sun trackers (STR-22G-S, EKO Instruments Co. Ltd.) equipped with a collimation tube (angle of view 5 degrees) for measurement of PARdir, and a shadow ball for measurement of PARdif.

Analyzing the relative absorption spectra of chlorophyll, we found that Chl a does not absorb direct solar radiation, while diffuse solar radiation is efficiently up-taken by Chl b. The spectrum of diffuse solar radiation is almost fixed with a peak wavelength (λ_{max}) around 460 nm. However, that of direct solar radiation shifts from a broad peak with λ_{max} around 700 nm towards a narrower peak around 540 nm, as solar zenith angle decreases. The absorption spectrum of Chl a lies outside the strongest energy regions of direct solar radiation. The λ_{max} of the Chl b absorption spectrum matches that of diffuse solar radiation; therefore, Chl b can absorb the most energetic parts of this radiation. The spectral differences between direct and diffuse solar radiation elucidate the meaning of slight spectral differences in pigments for terrestrial organisms.

Strong light is known to enhance accumulation of carotenoids. We found that β -carotene consistently absorbed more energy per photon than other pigments, indicating that it effectively filters (i.e. accepts) the 350-500 nm waveband, independently of PAR class.

Overall, the spectral differences between PARdir and PARdif, as well as the steady λ_{max} of PARdif, exert multiple effects on terrestrial organisms and may be effective drivers of diversification in pigment distribution and function. Further spectral-directional radiation observation at various sites is needed to reveal the effects of the dynamics of incident solar radiation on the terrestrial ecosystem.

キーワード: 分光放射計, 直達日射, 散乱日射, 光合成, 分光光利用効率, 光合成有効放射

Keywords: spectroradiometer, direct solar radiation, diffuse sky radiation, photosynthesis, spectral light use efficiency, PAR

マイクロ波衛星観測を利用した水文-陸上生態系結合モデルのパラメータ最適化 Simultaneous Estimation of Hydrologic and Ecologic Parameters in an Eco-Hydrological Model Assimilating Microwave Signal

澤田 洋平^{1*}; 小池 俊雄¹
SAWADA, Yohei^{1*}; KOIKE, Toshio¹

¹ 東京大学工学系研究科

¹School of Engineering, the University of Tokyo

To improve the skill of reproducing land-atmosphere interactions in weather, seasonal, and climate prediction systems, it is necessary to simulate correctly and simultaneously the surface soil moisture (SSM) and terrestrial biomass in land surface models. Despite the performance of hydrological and ecosystem models depends highly on parameter calibration, a method for parameter estimation in ungauged areas has yet to be established. We develop an auto-calibration system that can simultaneously estimate both hydrological and ecological parameters by assimilating a microwave signal that is sensitive to both SSM and terrestrial biomass. This system comprises a hydrological model that has a physically based, sophisticated soil hydrology scheme, a dynamic vegetation model that can estimate vegetation growth and senescence, and a radiative transfer model that can convert land surface condition into brightness temperatures in the microwave region. By assimilating microwave signals from the Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System, the system simultaneously optimizes the parameters of these models. We test this approach at three in situ observation sites under different hydroclimatic conditions. Estimated SSM and leaf area index (LAI) exhibit good agreement with ground in situ observed SSM and satellite observed LAI, respectively. The root mean square error of SSM and LAI at all sites, estimated by the model with optimized parameters, is much less than that estimated by the model with default parameters. Using microwave satellite brightness temperature data sets, this system offers the potential to calibrate parameters of both hydrological and ecosystem models globally. This global-scale and automated parameter optimization system may contribute to many other research activities related to land surface, hydrological, and ecosystem modelling although the global-scale applicability of this approach should be investigated as a future work.

Keywords: Eco-hydrological model, passive microwave remote sensing, parameter optimization, data assimilation

永久凍土環境の変遷と長期的な気候変動への応答 Changes of permafrost environment and the response to the long term climate change

末吉 哲雄^{1*}; 齊藤 和之¹; 石川 守²; 原田 鈺一郎³; 岩花 剛⁴
SUEYOSHI, Tetsuo^{1*}; SAITO, Kazuyuki¹; ISHIKAWA, Mamoru²; HARADA, Koichiro³; IWAHANA, Go⁴

¹ 独立行政法人海洋研究開発機構, ² 北海道大学, ³ 宮城大学, ⁴ アラスカ大学
¹Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ²Hokkaido University, ³Miyagi University, ⁴University of Alaska

永久凍土は2年以上連続して凍結した状態の土壌・岩盤として定義され、北半球陸面の20%以上の面積を占める。主に高緯度地域に分布し、寒冷圏の陸面としては所与の状態である。定義上、永久凍土は必ずしも氷の存在を意味するわけではないが、高緯度の永久凍土では表層に氷体を含むことが多く、地球上の淡水の0.02%に相当するという推定もある。土壌中には未分解の炭素を多く含み、約1700Gt（陸上の有機炭素の約半分、大気中の炭素量の約2倍）の存在量を持つと推定されている。

永久凍土の分布は、現在の気候・地表面条件と過去の履歴によって決定されるが、依存する時間スケールは凍土中の各点の深さ・熱物性によって異なる。また、例えば土壌中の炭素蓄積量は地温とは異なる時間スケールの変動に依存し、様々なプロセスに複雑に依存して分布が決まっている。現在分布する永久凍土は、深い部分では最終氷期以降に形成されており、完新世の気候変化に緩やかに応答している過程であると考えられる。

本発表では、これら永久凍土の特性と今後明らかにすべき研究課題を整理し、長期的な気候変動に対する応答の一例として最終氷期以降の気候変動と現在の凍土分布に関する研究の一例を簡単に紹介する。

キーワード: 永久凍土, 気候変動, 地下水, 炭素循環

Keywords: Permafrost, climate change, ground ice, Carbon Cycle

気孔コンダクタンスモデルの違いが、21世紀の変動気候条件の元における水・炭素収支の予測に与える影響 Impacts of representation of stomatal conductance on vegetation distribution and functions under changing climate

佐藤 永^{1*}; 熊谷 朝臣²; Katul Gabriel³
SATO, Hisashi^{1*}; KUMAGAI, Tomo'omi²; KATUL, Gabriel³

¹ 海洋研究開発機構 地球環境変動領域, ² 名古屋大学 地球水循環研究センター, ³ デューク大学
¹RIGC, JAMSTEC, ²HyARC, Nagoya University, ³Duke University

気孔コンダクタンスは、水蒸気飽差 (VPD; water vapor pressure deficit)、大気中 CO₂ 濃度、光量、葉の水ポテンシャルといった環境要因によって制御されている。このような気孔コンダクタンスの挙動を記述するために、様々な経験的・半経験的なモデルが構築されてきた。これら気孔コンダクタンスモデルが、21世紀中に生じうると考えられる気候条件(高 CO₂・高気温・高 VPD)の下においても的確に挙動するか否かは、水循環や気候の予測において重要な問題である。なぜならば蒸散は、全球の陸面から大気に戻る水の8割から9割を占めていると推定されており、また地表面に吸収される放射エネルギーの約半分を消費していると推定されているからである (Jasechko et al. 2013)。

Kumagai et al. (2004) は、21世紀中に予測される気候変動が、ボルネオ島の熱帯林地域における水・炭素循環に与える影響を予測した。この予測は、2種類の気孔コンダクタンスモデルの元で行われたが、いずれのモデルも現在の気候条件下における出力には大きな差は生じなかったものの、予測される21世紀末の気候条件下においては顕著な差を示した。そして、その差は、気孔コンダクタンスを、湿度の関数とするか VPD の関数にするかの違いが生じさせたことを示した。なぜならば、気候温暖化は VPD を上昇させるものの、湿度には大きく影響を与えないという傾向が予測されているためである。しかし、このようなモデル間の挙動の差が、より広い地域の水・炭素循環に与える効果については、未だ検討が行われていない。

他方で、従来の経験的・半経験的な手法に代わり、気孔開閉の制御が経済性合理性を有している(気孔から失われる水の量に対して光合成速度を最大にするという)と仮定する進化的手法による気孔コンダクタンスモデルの発展が近年著しい (Katul et al. 2010)。そして、この手法による気孔コンダクタンスモデルは、予測される高 CO₂・高気温・高 PD といった様々な環境条件に対して、定量的に適切な応答をすることが示されている。

本講演では、乾燥度が植生の分布を強く制御しているアフリカ大陸を対象に、気孔コンダクタンスの定式化の方法が、21世紀に予測されている気候変化の元で植生の分布や機能に与える効果を検討する。この検討には、動的全球植生モデル SEIB-DGVM を利用する。過去の開発と研究において、SEIB-DGVM はアフリカ大陸の乾燥度に応じた植生の分布や機能を的確に出力させることが検証されている (Sato et al. 2012)。

・引用文献

Jasechko S, Sharp ZD, Gibson JJ, Birks SJ, Yi Y & Fawcett PJ (2013) Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496.

Katul G, Manzoni S, Palmroth S et al. (2010) A Stomatal Optimization Theory to Describe the Effects of Atmospheric CO₂ on Leaf Photosynthesis and Transpiration. *Annals of Botany* 105: 431-442.

Kumagai, T., Katul, G. G., Porporato, A., Saitoh, T. M., Ohashi, M., Ichie, T. and Suzuki, M. (2004) Carbon and water cycling in a Bornean tropical rainforest under current and future climate scenarios. *Advances in Water Resources*, 27(12), P1135-1150.

Sato H & Ise T (2012) Effect of plant dynamic processes on African vegetation responses to climate change: Analysis using the spatially explicit individual-based dynamic global vegetation model (SEIB-DGVM). *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 117.

キーワード: 気孔コンダクタンス, 水循環, 炭素循環, 動的全球植生モデル, 地球温暖化, アフリカ

Keywords: Stomatal Conductance, Hydrological Cycle, Carbon Cycle, Dynamic Global Vegetation Models, Global Warming, Africa

北極陸域変動モデル相互比較プロジェクトの概要 Overview for terrestrial model intercomparison project in Arctic

宮崎 真^{1*}; 斉藤 和之²; 山崎 剛⁴; 伊勢 武史³; 森 淳子¹; 荒木田 葉月⁵; 羽島 知洋²; 保坂 征宏⁶; 飯島 慈裕²; 伊藤 昭彦⁷; 松浦 陽次郎⁸; 庭野 匡思⁶; 大石 龍太¹; 太田 岳史⁹; 朴 昊澤²; 佐藤 篤司¹⁰; 末吉 哲雄²; 杉本 敦子¹¹; 鈴木 力英²; 山口 悟¹⁰; 芳村 圭¹²

MIYAZAKI, Shin^{1*}; SAITO, Kazuyuki²; YAMAZAKI, Takeshi⁴; ISE, Takeshi³; MORI, Junko¹; ARAKIDA, Hazuki⁵; HAJIMA, Tomohiro²; HOSAKA, Masahiro⁶; IIJIMA, Yoshihiro²; ITO, Akihiko⁷; MATSUURA, Yojiro⁸; NIWANO, Masashi⁶; O'ISHI, Ryouta¹; OHTA, Takeshi⁹; PARK, Hotaek²; SATO, Atsushi¹⁰; SUEYOSHI, Tetsuo²; SUGIMOTO, Atsuko¹¹; SUZUKI, Rikie²; YAMAGUCHI, Satoru¹⁰; YOSHIMURA, Kei¹²

¹ 国立極地研究所, ² 海洋研究開発機構, ³ 東北大学, ⁴ 兵庫県立大学, ⁵ 理化学研究所, ⁶ 気象研究所, ⁷ 国立環境研究所, ⁸ 森林総合研究所, ⁹ 名古屋大学, ¹⁰ 防災科学技術研究所, ¹¹ 北海道大学, ¹² 東京大学

¹National Polar Research Institute, ²Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ³Tohoku University, ⁴University of Hyogo, ⁵RIKEN, ⁶Meteorological Research Institute, ⁷National Institute for Environmental Studies, ⁸Forestry and Forest Products Research Institute, ⁹Nagoya University, ¹⁰National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ¹¹Hokkaido University, ¹²The University of Tokyo

1. はじめに

2011年度から文部科学省の「グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス (GRENE) 事業北極気候変動分野「急変する北極気候システム及びその全球的な影響の総合的解明 (GRENE Arctic Climate Change Research Project (GRENE-ACCRP))」が開始された。同事業の研究課題「環北極陸域システムの変動と気候への影響 (GRENE Terrestrial Ecosystem in Arctic: GRENE-TEA)」は、気候システムにおける北極陸域システムの役割と機能を明らかにして、全球の気候への北極域の変化の影響を評価する事を目的としている。GRENE-TEA のモデリンググループは、大気海洋結合全球気候モデル (CGCMs) の既存の陸域スキームを含む北極陸域変動モデルにおける物理・生態過程の改良と、次世代の北極陸域モデル開発の基礎を据えることを目標としている。その一環として、北極陸域における観測値 (stage 1) やモデル出力値 (stage 2) を用いたモデルの相互比較となる「北極陸域モデル相互比較プロジェクト (GTMIIP)」を行う。そこでは、幅広い視野でモデルの較正、検証、改良と開発をより効果的に行えるようにするために、現場観測研究者、リモートセンシング観測研究者とモデル研究者間で観測データや情報を変換する為に必要な情報交換を促進する。

2. GTMIIP で使用するデータと参加モデル

2.1 データ

Stage 1 はモデル間およびサイト間の比較を目的とし、既存ならびに GRENE-TEA で展開する観測サイトの観測値を主体として陸域モデルへの入力データおよび検証データを作成する。観測値には欠測値や、モデル入力として必要であるが観測されていない項目があるため、そのままではモデル入力データとして十分でない。そのため、再解析データ (NCEP/NCAR など) とグローバルな観測ベースのデータ (CRU) を用いて、モデル入力用の連続データを Ver. 0 として 4 地点 (アラスカ・フェアバンクス、ロシア・ヤクーツク、ティクシ、チョクルダ、フィンランド・ケボ) で作成した。各観測サイトでの観測値をこの Ver. 0 データに埋め込むことにより、各サイトの実情を反映した入力データ Ver.1 が作成される。Ver. 1 データはフェアバンクスにおいて作成済みで、他地点も順次作成予定である。これらのモデル入力用のデータは極地研の Arctic Data Archive System (<https://ads.nipr.ac.jp/index.html>) にて公開予定である。

2.2 参加モデル

GTMIIP 参加モデルは、陸面過程モデル (MATSIRO、2LM、CHANGE、HAL)、物質循環モデル (VISIT)、陸域生態モデル (STEM-NOAHbgc)、動的生態系モデル (SEIB-DGVM)、領域気候モデル (WRF)、1 次元物理積雪モデル (SNOWPACK)、積雪モデル (SMAP)、凍土モデル (FROST) である。参加モデルのうち CGCMs や RCM (領域気候モデル) との結合が可能なモデルは全体の 70% を占めている。対象とする空間スケールはサイトレベルから全球までわたっている。

3. 結果

3.1 Ver.0 データと観測値の比較

Ver.0 データ (65.713° N, 148.125° W) とフェアバンクス近郊の 2 地点 (Poker Flat Research Range: PFRR、65.123° N, 147.487° W、Caribou Peak: CP、65.189° N, 147.500° W) の観測値との比較を行った。日平均気温は Ver.0 と PFRR の値がほぼ同じであったが、日最高・日最低気温の幅が Ver.0 の方が PFRR に比べて小さかった。年降水量は Ver.0 (238.2mm) と PFRR (247.0mm) はほぼ同じであったが、CP (353.5mm) は前者より大きかった。

3.2 Ver.0 データによるモデル出力

Ver.0 データを GTMIIP 参加モデルに入力した結果の例をいくつか示す。2011 年の地温の PFRR における観測結果とモ

ACG34-06

会場:213

時間:5月1日 16:15-16:30

デルによる計算結果 (CHANGE、凍土改良版 MATSIRO(MATSIRO-r)、PB-SDM) は、冬季にモデルによる計算値の方が観測値に比べて低めの傾向がどのモデルにおいても見られた。1988年～2011年の積雪深と活動層の厚さの CHANGE、MATSIRO-r と PFRR の観測値の 2011 年の積雪深は、モデルが観測値の半分程度の積雪深であった。2LM による熱フラックスの主要な項が顕熱と潜熱フラックスが 6 月頃に入れ替わった。CHANGE による CO₂ フラックスの季節変化では、夏季に吸収が見られ、年々変動は GPP に増加傾向がみられた。SEIB-DGVM の 2000 年ランの GPP、木本バイオマス、草本バイオマス、土壌有機物は、オリジナル MATSIRO では小さかったが、MATSIRO-r は気温=地温と仮定したのと同程度か最大だった。

謝辞：本研究は GRENE 北極気候変動事業により実施された。

キーワード: 北極, 陸域モデル, 積雪, 永久凍土

Keywords: Arctic, Terrestrial model, Snow cover, Permafrost

ISI-MIPにおける複数RCP, GCM, 生態系モデルによる陸域生態系炭素収支の将来予測不確か性評価 The assessments of projection uncertainties of global C budget in ISI-MIP study

仁科 一哉^{1*}; 伊藤 昭彦¹; 加藤 悦史¹; 横島 徳太¹; ISI-MIP team²
NISHINA, Kazuya^{1*}; ITO, Akihiko¹; KATO, Etsushi¹; YOKOHATA, Tokuta¹; ISI-MIP, Team²

¹ 国立環境研究所, ²ISI-MIP team

¹National Institute for Environmental Studies, ²ISI-MIP team

Global net primary production (NPP), vegetation biomass carbon (VegC), and soil organic carbon (SOC) changes estimated by six global vegetation models (GVMs) obtained from an Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project study were examined. Simulation results were obtained using five global climate models (GCMs) forced with four Representative Concentration Pathway (RCP) scenarios. To clarify which component (emission scenarios, climate projections, or global vegetation models) contributes the most to uncertainties in projected global terrestrial C cycling by 2100, we applied analysis of variance (ANOVA) and wavelet clustering to 70 projected simulation sets. ANOVA revealed that the main sources of uncertainty are different among variables and depend on the projection period. We determined that in the global SOC and VegC projections, GVMs dominate uncertainties (90% and 60%, respectively) rather than climate driving scenarios, i.e., RCPs and GCMs. The clustering wavelet spectra of VegC and SOC time series data could identify more specific characterization of simulations in each GVM. Our study suggests that the improvement of GVMs is a priority concern for reduction of total uncertainties in projected C cycling for climate impact assessments.

Keywords: Model inter-comparison, Global carbon cycle, Uncertainties, RCP, GCM