

「ユーラシア・アジアモンスーン地域の 気候-陸域相互作用研究会」の報告

安成 哲三^{*1}・熊谷 朝臣^{*2}・栗田 進^{*3}・立入 郁^{*4}
小野 朗子^{*5}・上野 健一^{*6}・徐 健青^{*7}・浅沼 順^{*8}
佐藤 友徳^{*9}・市井 和仁^{*10}・羽島 知洋^{*11}・馬淵 和雄^{*12}

日本気象学会2011年度秋季大会の前日の2011年11月15日に、名古屋大学地球水循環研究センター3階大講義室において、「ユーラシア・アジアモンスーン地域の気候-陸域相互作用研究会」が開催された。本研究会は、毎年春秋の年2回開催される気象学会大会に合わせて開催されている「日本気象学会統合的陸域圏研究連絡会」の拡大版として、名古屋大学地球水循環研究センターの協力の基に開催されたものである。

本研究会においては、ユーラシア大陸・アジアモンスーン地域における気候-陸域相互作用を主テーマとし、地点(プロット)スケールから大陸スケールにお

ける、水・エネルギー収支、物質循環、およびそれらと気候との相互作用に関する最近の研究成果について、観測研究・モデル研究両面から話題を提供していただき、現在までに明らかになっていること、さらに今後の展望などについて議論を深めることを目的とした。

研究会では、学会前日という日程であったにもかかわらず、約40名の参加者に集まっていただき、活発な質疑応答および討論が行われ、充実した研究会とすることができた。

各講演者による講演要旨は以下の通りである。

-
- *1 Tetsuzo YASUNARI, 名古屋大学地球水循環研究センター。
 - *2 Tomo'omi KUMAGAI, 名古屋大学地球水循環研究センター。
 - *3 Susumu KURITA, 気象庁気象研究所。
 - *4 Kaoru TACHIIRI, 海洋研究開発機構地球環境変動領域。
 - *5 Akiko ONO, 奈良女子大学理学部。
 - *6 Kenichi UENO, 筑波大学生命環境系。
 - *7 Jianqing XU, 海洋研究開発機構地球環境変動領域。
 - *8 Jun ASANUMA, 筑波大学陸域環境研究センター。
 - *9 Tomonori SATO, 北海道大学大学院地球環境科学研究院。
 - *10 Kazuhito ICHII, 福島大学共生システム理工学類。
 - *11 Tomohiro HAJIMA, 海洋研究開発機構地球環境変動領域。
 - *12 Kazuo MABUCHI, 気象庁気象研究所。
- © 2012 日本気象学会

1. 基調講演

「気候-植生相互作用：その地球科学的・生物科学的意味」

安成哲三 (名古屋大学)

地球の大気の特徴づけるオゾン層は、紫外線を遮断すると共に、水が地表から宇宙へ拡散することを防ぐ作用があり、これらを通じて地表面の生命活動を支えている。オゾン層は、そもそもシアノバクテリアに始まる植物による光合成開始とともに形成されたものである。このように生命活動は地球環境に大きな影響を与えることができ、よって植生と気候とは相互作用するシステムであると言える。しかし、生態学者と地球物理学者は異なる研究コミュニティに属しており、このような生物活動と環境との間の相互作用研究は十分とは言えない。

本講演では、東シベリアにおける、そのような生物活動と環境との相互作用の一例として、森林と永久凍土との「共生」系について我々が行った研究を紹介し

た。東シベリアの年降水量は僅か200～300mm程度であるが、落葉性針葉樹のカラマツを優占種とする世界最大の針葉樹林帯が広がる。そのように降水量の少ない環境下で大規模な森林帯が存続しているのは、永久凍土の存在が植物の水利用効率を高めているためだと指摘されている。その一方で、この地域における永久凍土の維持には、森林が太陽光を遮断することも大きく寄与しており、すなわち東シベリア域においては森林と永久凍土との間に一種の共生関係が存在する。

我々は、この共生関係の環境依存性を探るために、そのような相互作用を明示的に取り扱ったシミュレーションモデルを構築した。このモデルには山火事のサブモデルも組み込み、また植物の根の鉛直分布も実測データを元に取り込んでいる。このモデルは、現気候における山火事後の遷移パターン、すなわち落葉性広葉樹林から針葉樹林への遷移などを再現することに成功し、現在の環境条件における出力の妥当性が確認されている。そして4°Cの温暖化が生じた気候環境下でシミュレーションを行うと、永久凍土の融解に伴って土壌の乾燥が進行するため、カラマツに代わってより乾燥に強いアカマツが優占し、また森林全体のバイオマスも減少するという結果が得られた。これは、今後見込まれている温暖化が、永久凍土の融解を通じて、東シベリア域の植生の構造を大幅に変化させる可能性を示唆しており、これが更なる検討を要する重要な課題であることを強く示すものである。

ここで一例を示した「地球生命圏」を包括的に理解する科学の構築と推進、すなわち大気圏・水圏・地圏と生命圏が密接に相互作用するシステムの解明は、地球環境問題の解決に科学的根拠を提供するためにも重要である。英国の環境科学者ジェームス・ラブロックは、「ガイア (Gaia)」という概念で地球生命圏を捉え、地球環境が生命圏の能動的な役割で大きく調節されているのではないかという学説を提示した。しかし、実際の地球のシステムがどの程度「ガイア」なのか、あるいはどのような「ガイア」なのか、ということは未解明な大きな問題として残されている。この大問題の解明を含む地球システムの基本的な理解を通して、私たち人類と生命が拠りどころとしている地球とは何かを考究する新しい「地球学」の構築が今後重要となると考えられる。

2. 気候変動により加速されるボルネオ熱帯雨林の大量枯死：SPACと確率過程を用いたモデリング

熊谷朝臣 (名古屋大学)

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は、温暖化による気候変動は世界各地で高温化・乾燥の長期・頻発化を引き起こすと警告している。また、既に世界各地で、高温・乾燥によるストレスに起因するとみられる樹木の大量枯死が観測されている。森林は巨大な炭酸ガス吸収源であるが、大量の枯死木はその分解により森林を炭酸ガス放出源に変えてしまう。また、森林は、太陽放射エネルギーを効率良く吸収し、蒸発散によりその多くを潜熱に変換する。そのため、大量の樹木が枯死すると、地表面状態が大きく変化し、大気－陸面間の熱交換過程にまで影響する。枯死の規模によっては気候システムにまで影響が及ぶことも考えられる。気候変動を含む地球システムの理解のためには、温暖化の進行に対して陸上生態系がどう反応するのかを知る必要があり、その中でも高温・乾燥という環境因子による樹木の大量枯死のメカニズムの解明は最重要課題の一つであると言えよう。ところが、高温・乾燥ストレスによる樹木の枯死・森林の衰退は、世界中で多くの観測事例が存在するにもかかわらず、驚くべきことに、乾燥ストレスで樹木が死に至る生理学的メカニズムについて解明されていることは実に少ない。

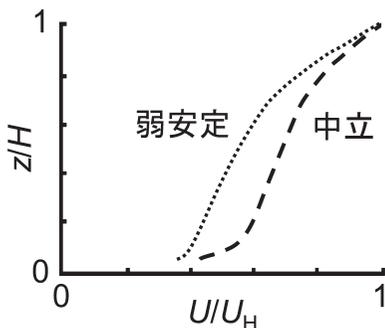
ボルネオ熱帯雨林は、地球スケールの炭素・水循環の観点で最も重要な生物圏の一つである。本地域では、未来において、より強烈的な乾燥が頻繁に起きると予測されており、また、それは特にエルニーニョ条件下で頻発化すると言われている。この強烈的な乾燥は、領域スケールの樹木枯死率を跳ね上げるだろう。本研究では、現地観測データ、全球気候モデル (GCM) シミュレーションの結果、Kumagai and Porporato (2012) の研究で確率過程生態水文モデルの援用により開発した“樹木枯死指標”のコンビネーションを利用して、ボルネオ熱帯雨林の乾燥ストレス枯死が将来予測された降水変化によってどのように変えられるのかを調べた。“樹木枯死指標”モデル中の全てのパラメータには明確な物理的意味があり、また、現地観測により取得されていることに注意されたい。モデルの第一駆動力としての降水統計変数は、20世紀後半の長期降水データと21世紀後半の14個のGCMモデル計算結果から構築された。これらの降水統計は、エルニー

ニョに対応して突発的な強い乾燥が起こること、その強い乾燥は1～3月に起きること、そして、降水の季節性をもっとはつきりしてくること（乾燥する1～3月はより乾燥、湿潤な10～12月はより湿潤になる）を示した。計算された“樹木枯死指標”は、1997～1998年のエルニーニョ期間における強烈な乾燥で大量の枯死が生じたことをうまく表現できた。また、モデル計算は、現在の1～3月の高い枯死率と10～12月の低い枯死率を示し、この差が将来には甚だしくなることをも示した。さらには、湿潤期である10～12月の貯留土壌水分の利用があることで続く1～3月の乾燥ストレスが軽減される効果があったとしても（この効果は、21世紀後半には、さらに高まると予想されているが）、1～3月の枯死確率は将来強烈に高まるだろうと予測された。

3. 粗度・ゼロ面変位の安定度依存性と、そのキャノピー内乱流との関係について（観測的研究への適用に向けて）

栗田 進（気象研究所）

大気境界層の重要なパラメータとして、地表面の粗度長（ z_0 ）とゼロ面変位（ d ）がある。通常、これらは地表面の形状によってのみ決まり、大気状態には依らないとして扱われている。しかしながら、地表面が森林や都市のように大きなキャノピーで考えてみると、内部に温度成層が形成され、乱流構造も大きく変形するであろう。例えば「中立」と「弱安定」を比べると、後者では中層以下でより弱風になるであろう（第1図、キャノピー高： H ）。これは、安定度が増すにつれ d が大きくなり、 z_0 が小さくなる事を想定



第1図 キャノピー内の平均風速鉛直分布の模式図（規格化したもの）。太破線：中立時、細点線：弱安定時。

させる。そこで、種類の異なる2つのキャノピー模型（疎林と都市に対応）を使って、 z_0 と d の安定度依存性（安定のみ）に関する風洞実験を行った（Kurita 2003）。その結果、想定のように z_0 、 d が大きな安定度依存性を持つ事と、 z_0 はキャノピーによる違いが無いのに対し、 d はキャノピーにより大きな差があることが分かった。

一方、Zilitinkevich *et al.* (2008) は北方林での野外観測から、そのキャノピーに対する z_0 と d の安定度依存性の式を提案した。

栗田 (2011) は上記風洞実験と安定条件に対する彼らの式を比較し、都市や林を含む異なるキャノピーに適用できる式（ $K-Z$ 式）として、 z_0 に関しては彼らの式がそのまま使えることを示し、 d に関しては彼らの式中の定数を $R_n (=d_n/H)$ の関数としたものを導いた（添え字 n は中立）。

今回、上記風洞実験でキャノピー内乱流の安定度依存性がキャノピー依存の定数 γ で表される事を示した。（ここで、 $A=A_n \exp(-\gamma S_c)$ 、 $U/U_H = \exp\{(z/H-1)/A\}$ 、 $S_c=H/L_0$ 、 L_0 はオプコフ長、 U は平均風速、 U_H はキャノピー上端の平均風速）。次に、この結果を使って d の安定度依存性に関する理論を導き、 $\gamma-R_n$ 関係を求めた。さらに、この $\gamma-R_n$ 関係を使うと、上記 $K-Z$ 式中の d の表現を導く事ができることを示した。この $\gamma-R_n$ 関係は、大気境界層におけるMonin-Obukhovの相似則に相当するもので、キャノピー内の相似則と云える（Kuritaの相似則）。

4. 全球植生モデルのLAIをどう評価するか

立入 郁（海洋研究開発機構）

全球植生モデルの結果を観測データを用いて制約（不確実性の幅を狭める）しようとする、NPP、土壌炭素量、土壌呼吸量を用いた結果は互いに整合するのに対し、LAIの衛星データを用いた場合はこれらと大きく異なる結果となった。この理由として考えられることとして、グリッド内のヘテロ性、低LAI領域の再現性（低LAI安定状態のモデルによる再現性の難しさ）、土地利用の影響などがある。他の変数でこれらの影響が出ないのは、これらに該当する地域では観測が行われないためだと考えられ、衛星データの場合は全球を均一に観測できることが逆に解析の際に解釈を難しくしていると思われる。この問題の対処法としては、1. 土地利用、火事、雪などを現実

付けるべくモデル向上を図り、その上で比較、2. 直接比較できそうなグリッドだけ使って評価する、が考えられるが、より簡単な方法として今回は後者を試みた。ここでは、CMIP5の実験で用いられる土地利用データを用い、一次植生が多く残る地域のみを使用して、モデルパラメータの制約を試みた。一次植生の比率が80%以上のグリッドのみを用いると、結果は他の変数の場合に近づいた。さらに90%以上のグリッドのみの場合も試みたが、結果は80%以上の場合とあまり変わらなかった。この際、一次植生の比率を考慮することで、評価対象のバイオーム（生態系に含まれる植物集団）タイプが偏るという問題が残った。また、一次植生の割合が高い地域と低い地域の誤差を同時に小さくすることは難しかった。バイオームごとでみると、熱帯・亜熱帯常緑針葉樹林及び熱帯乾季落葉性疎林・低木林で誤差が大きかった。

最後に、地球システムモデルのLAI出力を用いた地域研究の例として、発表者らによるモンゴルの将来の干ばつリスク評価例を紹介した。ここで用いた地球システムモデルではT42と呼ばれる一辺約2.8°のグリッドが使われており、地域研究には若干粗すぎる。また中緯度乾燥地は気象条件に敏感な地域であって、地域研究を行う上で注意が必要である。今回の例では、衛星データとの間に大きな矛盾が無く、背景のプロセスを注意深く考慮しながらという条件つきであれば地域スケール研究にも使えると結論し、解析を行った。この結果、モンゴルのLAIは将来上昇し、干ばつのリスクは小さくなるという結果を得た。

今後、二次植生（pasture, cropland含む）が多い地域について簡単な操作でモデルと衛星のLAIデータを比較可能にする術はないかを考えていきたい。モデルによるバイオームタイプごとのLAI再現性の差については、バイオームタイプごとのパラメータチューニングが有効に働く可能性がある。また、気象モデルでなされているような地域モデルの全球モデルに対する埋め込みを炭素循環入りモデルでも実現できれば、地域研究に役立つかもしれない。

5. 植物の生育状況からみる水循環の変化

小野朗子（奈良女子大学）

気候変動に関する政府間パネル IPCC の第4次評価報告書で、地球温暖化は既に世界中の自然と社会に影響を及ぼしているというまとめがなされた。世界の穀物生産国は次々と記録的な早魃に直面しており、穀物

の生産量通減、国際価格の急騰が懸念されている。このように、世界では早魃や集中豪雨などの気候変動や水不足・食糧危機の兆候が現れ始めていて、地球温暖化に対する人々の関心や地球の環境変動を把握することの重要性が高まっている。

地球温暖化を抑制する役割の1つとして、地球上の広大な森林植生の二酸化炭素吸収能力を上げることができる。植生は地に根をはり、光、水、栄養の三要素を十分に得ることで生長し、これら三要素のうちどれか1つでも欠ければ生育活動に支障が生じる。植生は生育地の環境要因（光、水分、栄養状態）に敏感に対応するので、植生の生育・活性状況（質）や生長量（生産量）を把握すれば、地球温暖化によって引き起こされる水や食糧に関する各地での問題、変化の理解に役立つ。即ち、植生の監視によって生態系の変化や森林破壊、沙漠化など、地球の環境変動の把握に役立つ指標を得ることができる。そこで我々はこれまでGCOM-C1/SGLI陸圏プロダクトに提案されていて、植物の生産量と質の見積もりに対して重要な位置づけとなる新しい植生指数、水ストレス傾向WST（Water Stress Trend）の開発を行ってきた。

地上計測の実験結果から、植物の水ストレス傾向の把握に温度の変化量がパラメータとして有用であることがわかっている。そこでグローバルな解析への適用と、長期的な環境変動の把握を目指し、低分解能（0.05度格子）の人工衛星Terra/MODIS（2000-2011年）データを用いて、昼夜の温度差を水ストレス傾向に対応させ、全地球域で月ごとにその値を求め、水ストレス傾向の有用性、汎用性について調べてみた。

近年、記録的な早魃に見舞われ、大規模な農作物被害を受けたオーストラリア、アルゼンチンについて調べてみると、水ストレス傾向の季節（月）変化は降雨量分布に対応していて、農作地の乾燥状況をよく表しており、食糧（穀物）生産量との相関がよい。また、気象庁などが報告する降水量や早魃、熱波などの気象災害と水ストレス傾向との相関がよい。これらの結果から、昼夜の温度差が乾燥化の検知に有効で、それを適用した水ストレス傾向は汎用性のある植生指数として適応性が高い。

ところで、短波長赤外域は土壌や植物の水分量に敏感に応答する波長帯である。水の吸収帯 $1.6\mu\text{m}$ の輝度値と水ストレスの関係を調べると、 $1.6\mu\text{m}$ はストレスあり・なしの差は顕著であるが、ストレス強度の弱い段階で変動が小さく、ストレス初期段階の状態把

握に不向きである。また、正規化植生指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) も $1.6 \mu\text{m}$ と同じ傾向を示す。

以上の結果から、植物の水ストレスに着目した、植物の乾湿状態、生育状況を把握する指数、水ストレス傾向は乾燥化の検知に有効で、かつ、降雨量の分布とも対応が良く、NDVI よりも早期の段階で水ストレスの検出が可能であることがわかる。今後指数のさらなる改善に取り組んでいきたい。

6. チベット高原周辺で発生するメソ対流系 (MCS) と陸面過程

上野健一 (筑波大学),

杉本志織 (北海道大学大学院)

チベット高原周辺で発生するメソ対流系 (MCS) に関する研究は、山岳水河涵養、陸面水文過程と植生、風下での気象災害、広域への対流応答など様々な観点から重要視されている。研究会では、日々～季節内変動スケールに焦点を絞り、水蒸気輸送、高原上での擾乱発生、日変化モードを伴う風下域での大雨発生、広域循環場への影響、に関する研究成果をまとめて紹介した。インドモンスーンの季節内振動と連動して、トラフ卓越時に間欠的に水蒸気が高原内に輸送される。この時、ヒマラヤ南面で卓越する局地循環が高標高に水蒸気をポンプアップさせ、さらにトラフ通過後の北風成分により南東域に局在化する (Sugimoto *et al.* 2008)。この仕組みは高原上での土壤水分の東西コントラストを強化し、チベット高気圧卓越時に高原の南東域で発生する MCS をより助長する効果を持つ。ヒマラヤ山麓で夜間に卓越する降雨帯が日中の谷風減衰および夜間の山風に伴う収束により発生する事を考えると、同じだけの水蒸気量が日中は谷風により高原内に輸送されているとも解釈できる。土壤水分の増加に先行する降水システムと、土壤水分増加により

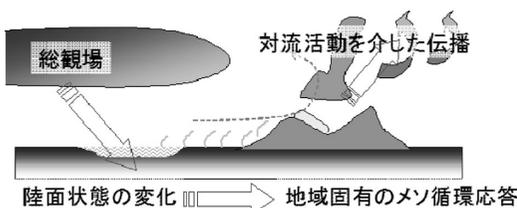
助長される MCS 発生的前後関係をより詳しく分析する必要がある。一方、四川盆地内で発生する災害を伴う大雨発生域は一部で夜間に MCS が頻発する地域と一致する事が明らかとなった。四川盆地南東部では、四川盆地北部の山脈の局地循環が日没後に弱体化すると同時に発生する北風と、対流不安定気層を伴う南西モンスーンとの下層収束で、夜間に急激に MCS が発生・発達する (Ueno *et al.* 2011)。チベット高原風下で発生する MCS は、北部では高原上の前線帯形成に伴う渦移流が影響し、南部では今回の解析結果に示された盆地地形周辺での下層収束が重要であると予想され、西部太平洋上の広域循環場の違いが両者の区別をもたらす事も示唆された。一方で、アジア域の MCS 集中域の中でもチベット高原東部～風下域で発生する MCS は対流圏上層の昇温を伴い、その後数日にわたる総観場変調も伴う事が解析された。同地域は湿潤モンスーンとタクラマカン砂漠からの乾燥気団がぶつかる世界でも有数の乾湿コントラストが発生し、一方で衛星推定土壤水分量にはデータセットにより大きな差が見られる。大気陸面相互作用研究には、総観場の長期変調－陸面状態の変化－メソ循環場の応答－総観場へのフィードバック、という地域固有の連動過程を統合的に理解する努力が不可欠であると考え (第 2 図)。

7. チベット高原における地表面熱・水収支について

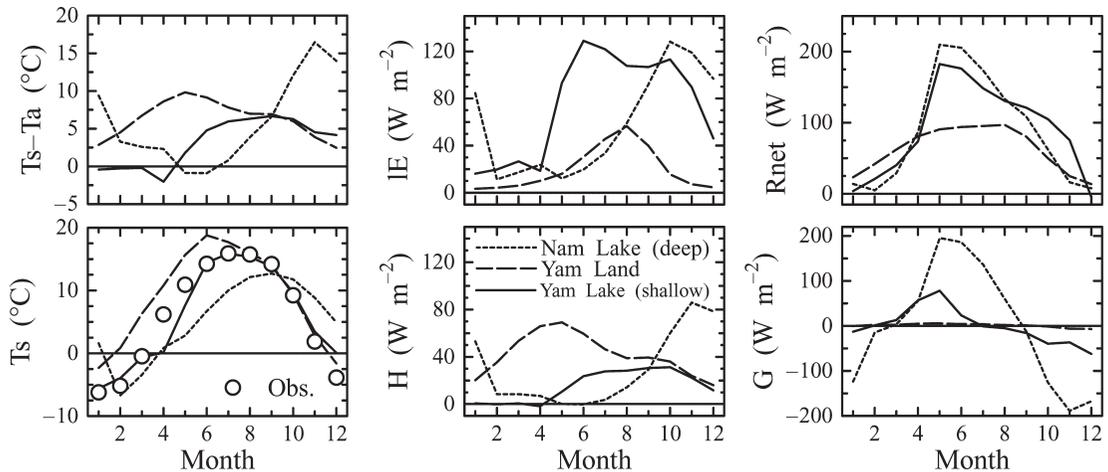
徐 健青 (海洋研究開発機構)

チベット高原は大気との相互作用を通じて多量の運動量・熱・水蒸気を交換し、大気大循環や気候変動に影響を及ぼし、グローバルな気候に対して大きな役割を果たしている。そのひとつがアジアモンスーンの形成である。本研究の目的は地上観測データによるチベット高原全体の広域水循環諸過程を解析し、衛星データと地上データによって検証し、高解像気候モデルでの物理過程改良に役に立つことである。Xu and Haginoya (2001), Xu *et al.* (2005) では、チベット高原の陸面について、熱・水収支的に解析した。しかし、チベット高原上の湖の面積は約 $45,000\text{km}^2$ で、 1.0km^2 以上の湖は 1091 個存在している。その面積は高原全体の 3% を占めている。これから湖は乾燥・半乾燥の高原全体に対して、どのような役割を果たしているのかについての解明を試みた。

扇状で浅い Yamdrok 湖、深い Nam 湖、浅い Siling



第 2 図 陸面状態の変化を介した総観場とメソ対流系の関係に関する概念図。



第3図 浅い湖、深い湖と陸地の熱・水収支の季節変化。左：温度 (T_s は表面温度, T_a は気温), 中：顕熱 H と潜熱 IE , 右：正味放射量 R_{net} と湖の貯熱量 G 。

湖 (近年面積拡大中) について、湖とその流域の熱・水収支の季節変化を解析した。Yamdrok 湖と Nam 湖の湖面に入射する正味放射量 R_{net} は湖の深さに関係なく、陸地の約1.4倍で、ピークは5月である (第3図)。陸地に比べて貯熱量の寄与が大きいことが湖の特徴である。特に深い湖での貯熱量の寄与が大きい。しかし、浅い湖からの年間蒸発量 (潜熱) がもっとも大きく、降水量の3倍で、陸地からの蒸発量の3.7倍、深い湖からの蒸発量の1.4倍である。逆に浅い湖からの顕熱 (H) は最も小さい。浅い湖は大気に対して、モンスーン期に多量の潜熱を放出している。深い湖では、モンスーン期終了後に多量の潜熱と顕熱の両者で大気を加熱している。すなわち深い湖は、冬季に入るチベット高原のホットスポットの役割を持っている (Haginoya *et al.* 2009; Xu *et al.* 2009)。

また、最近50年間、Siling 湖流域も Yamdrok 湖流域も気温は上昇傾向である。Siling 湖流域の日射量は増加傾向である。大気放射量も正味放射量も増加している。Yamdrok 湖流域では、年間日照時間は5.7%減少している。しかし、気温上昇によって、水蒸気圧が上昇し、大気からの長波放射は Siling 湖流域と同じ上昇傾向である。Siling 湖流域の降水量は増加傾向にある。1960年代の平均年降水量は220mmであったが、最近20年間は350mmである。Yamdrok湖流域の降水量は有意な減少・増加傾向が見られない。Siling 湖流域ではポテンシャル蒸発量のトレンドは見られないが、パン蒸発計蒸発量の観測値は減少傾向である。

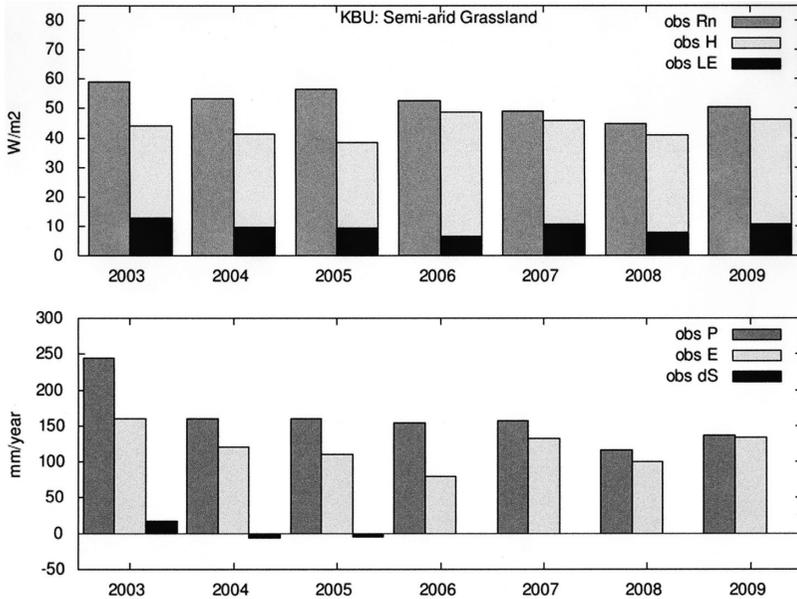
Siling 湖流域の降水量の増加によって、気候湿度度 (=降水量/ポテンシャル蒸発量) は増加傾向にある。この傾向はYamdrok湖流域と同じである。Siling 湖流域の総雲量は減少傾向にあるが、下層雲量は増加傾向である。Siling 湖の降水量の増加の原因は下層雲量の増加で、雲の出現パターンが変化したと思われる。以上の解析から、Siling 湖の面積拡大の原因は降水量の増加による可能性が大きい。

8. モンゴル半乾燥草原水熱収支の年々変動

浅沼 順 (筑波大学)

乾燥地の気象学的、水文学的、生態学的特徴は、降水量が少ないという静的な特徴だけでなく、降水の年々変動がその気候値に比して大きく、それに対応した植生の変動や、土壌水分の挙動で大きく異なることが予想される。

筑波大学を中心とするグループは、2003年よりモンゴル国の首都、ウランバートル東方約150km 東方の草原地帯に位置するヘルレンバヤン (Kherlenbayan Ulaan, KBU) と呼ばれる村落の近郊に、水・熱・炭素・放射収支観測ステーションを設置し、継続的な観測を行ってきた (Sugita *et al.* 2007; Li *et al.* 2005)。一帯は、平均年降水量約150mmで、半乾燥草原に属し、LAI はおおむね夏の最盛期でも最大で1程度である。また、首都ウランバートル近郊に位置するため、過放牧の影響を強く受けている (Li *et al.* 2005)。観測システムは、超音波風速計と赤外線ガス



第4図 KBUにおける熱収支(上), 水収支(下)各項目. R_n , H , LE , P , E , dS はそれぞれ放射収支量, 顕熱フラックス, 潜熱フラックス, 降水量, 蒸発量, 土壌水分量変化の観測値.

分析計による渦相関システム, 4成分放射計, 土壌水分・地温計測システムを中心としたものであり, 2003年3月に設置された. これまで, 短期的な欠測を除いては, おおむね安定して連続した観測が継続されている.

これらのデータから, 長期の熱・水・放射収支を計算するにあたり, データの品質管理 (Quality Control) や欠測データの補完は, FluxNet や AsiaFlux で用いられている手法を用いている (Hirata *et al.* 2008). なお, 欠測の時には, 必要に応じて隣接する気象局データを用いている.

第4図は, 2003年から2009年の7年間の年平均の熱収支(上)と水収支(下)の観測値である. 熱収支と水収支のドライバーとしての放射収支量と降水量の年々変動を比較すると, 放射収支量に比べて降水量の年々変動が大きいのが分かる. 特に2003年は, アジアの各地で異常気象となるなど特異な年として位置づけられている (Saigusa *et al.* 2010). 降水量の増減に応じて蒸発量も増減し, 放射収支量の残りが顕熱フラックスに充てられる, という乾燥地域の一般的な熱収支の性質が表れている. また, dS は土壌水分の鉛直深度方向観測から得られたその時間変化量であるが, 極

端に多雨の2003年に正となり, その正の偏差が2004年からの2年間にわたって消費されていると考えられることができる.

ただし, 第4図において, 水の収支が完全に閉じていない, いわゆる収支のクロージャー問題 (Energy closure problem) が明らかであることから, さらなる詳細な解析による検証が必要である.

9. モンゴルにおける大気－陸面相互作用の数値実験

佐藤友徳¹,

Yongkang Xue²,

Altangerel Batbold¹,

石川 守¹

(¹ 北海道大学, ² UCLA)

領域気候モデルを用いた力学的ダウンスケールは近年地球温暖化の予測などで広く用いられるようになってきており, その付加価値や適用限界についての議論が行われている. 本研究では, 北東アジアの乾燥・半乾燥地域に位置するモンゴルにおいて, ダウンスケールの能力評価を大気－陸面相互作用に着目して行った. 計算には WRF-ARW (Skamarock *et al.* 2008) を使用し, 水平格子50km, 鉛直20層で実験を行った. 初期値および境界値には, NCEP-DOE reanalysis 2 (Kanamitsu *et al.* 2002) を用いて, 5月25日から9月1日までの積分を行い, 6～8月を解析対象とした (以降, CNTL). 実験は1993年～2003年の11年分について行った. 計算対象領域は, 70–130°E, 20–60°N である.

実験を行った11年間の平均では, CNTLの降水量は東アジアモンスーンによる夏季降水量の特徴を良く再現している. また, 幾つかの先行研究で指摘されているように, 山岳周辺の降水強化についても, 強制データとして与えた再解析データには見られない細かな分布まで良く表現している. モンゴル域 (90–120°E, 42–52°N) では, 観測データ (APHRODITE, Yatagai *et al.* 2009) に対する空間相関は0.68であ

り、再解析データによる降水をより詳細化する効果が発揮されている。この傾向は、計算を行った11年間のほとんどの年で確認できる結果であり、力学的ダウンスケールによって降水量の詳細化を行うことが可能であることを示している。一方、降水量の平均誤差は、ダウンスケールによって正に増幅されていた。原因を調べるため、次に土壤水分を修正した実験を行った。

GSWP (The Global Soil Wetness Project) による複数の陸面モデルによる推定値と比較すると、領域気候モデルの初期条件として使用している再解析データではモンゴル周辺の乾燥地域では、土壤水分が非常に高いことが分かった。そこで、GSWP による推定気候値を初期条件として同様の実験を行った（以降、GSWP ラン）。GSWP ランでは土壤水分が小さいことにより陸面からの蒸発が抑制され、降水量の正バイアスが大幅に改善された。このことから、CNTL では湿潤な土壤によって蒸発散－降水の再循環が過剰に表現されていたものと考えられる。

次に、年ごとにダウンスケールの性能評価を行った。モンゴル領域では、多くの年で、降水量の再現性が向上するものの、対象とする年によって、大幅な改善が見られる場合と、そうでない場合があることが分かった。具体的には、1993、1994年など降水量の多い年については、ダウンスケールによって降水量の分布やバイアスが大幅に改善された。逆に、乾燥していた2001年や2002年については改善が見られなかった。乾燥年の再現では、陸面過程がより重要となり、前で述べた土壤水分の初期値の影響が強く現れると考えられる。土壤水分の初期値を補正したGSWP ランでは、これらの乾燥年についても改善が確認された。

10. アジア域の陸域水・炭素循環の把握：観測とモデルの統合解析

市井和仁（福島大学）

アジア（主に東アジア・極東アジア・東南アジア）については、近年の観測網の広がりや衛星観測データの整備などによって、様々な観測データが入手可能になりつつある。そのため、これら最新データ等を用いて、アジアの炭素循環や水循環を把握することは重要である。例えば、CarboEastAsia プロジェクト (<http://www.carboeastasia.org>) においては、アジア域の約30のタワー観測サイトのデータが、補正・補間等のデータ処理などもされた形で整備され始めている。

本発表では、地上観測・衛星観測・陸域生態系モデリングの3つの手法の統合に主な焦点を当てて、これらの統合手法の方針といくつかの事例を紹介した。統合の手法としては、(1)地上観測データを衛星観測データを利用して広域化を行い、(2)広域化された物理量を用いて陸域モデルに制約を与えモデルを改良する、の2段階で構成される。これらの初期解析をアジア域を対象に行った。

まず、サイト観測と衛星観測を組み合わせた広域化手法の紹介を行った。一つのアプローチとしては経験モデルによる方法がある。様々な経験的な手法が提案されており、地域から全球スケールまで、蒸発散や光合成量などの広域化が試みられている。本研究では、サポートベクタマシン回帰モデルによる広域光合成量・蒸発散量の推定手法を適用した。CarboEastAsia データセットに含まれる25の観測地点において、Terra 衛星 MODIS センサの観測データより構築された陸面プロダクト（地表面温度・日射・植生指数・土地被覆）を入力として、サイトレベルでのモデルを構築した。これらはおおむね良好な結果を得ることができ、サイトスケールでの妥当性を示すことができた。これをアジア広域に適用し、蒸発散量・光合成量などの空間分布を8日程度の時間分解能で推定した。

次に、様々なデータの統合解析例として、2003年夏における東アジア地域の異常気象が陸面炭素収支に及ぼす影響の解析を行った。先行研究 (Saigusa *et al.* 2010) に比較して、陸域炭素収支モデルを利用した解析などを加え、解析を向上させた。今回は、経験的な広域化手法（上述）で構築された陸域光合成量、複数の地球観測衛星データによる植生観測、複数の陸域生物圏モデルを用いて、それらの相互比較を行った。いくつかの気象データの解析の結果、先行研究と同様に、2003年夏には、東アジア・極東ロシア域などにおいて、冷夏・寡照の傾向が見られた。そして、これらの気候のアノマリは、陸域生態系にとっては光合成量が小さくなり、呼吸量も小さくなり、そのトータルとしては、陸域 CO₂ 吸収量も例年に比較して小さくなる傾向が見られた。ただし、一部のモデルでは、それらとの反対の傾向を示すものもあり、今後のモデルの改良（おそらくは光合成に対する水ストレスの度合い）の必要な項目の抽出ができた。

今後は、より多くの観測データをモデルの制約に利用したモデル改善手法の構築、複数モデルの比較研究などを進めていく予定であり、その計画についても簡

単に紹介した。

11. 地球システムモデル（気候－炭素循環モデル） における大気－陸域相互作用

羽島知洋（海洋研究開発機構）

植物の活動や植生分布は、気候から一方的に規定されるだけではなく、陸面におけるエネルギーバランスや物質循環を介して気候へと作用（フィードバック）する。温室効果ガスの排出は、気候に大きな変動を引き起こすことが見込まれると同時に、植生にも大きく作用する可能性が考えられる。本研究では、今後予想される気候変動下において、植生分布と気候の対応がどのように変化してゆくのかを調べた。

実験には地球システムモデル（MIROC-ESM）を用いた。このモデルにはAOGCMに加え、海陸の炭素循環が組み込まれている。また陸の炭素循環はDynamic Global Vegetation Model (DGVM) を元にしており、気候の状態に応じて植物の成長や分布が変化し、さらに大気へとフィードバックする。このモデル内で予測される植生分布と気候との対応を調べた。実験に用いたシナリオはRCP4.5シナリオであり、これは2100時点でCO₂濃度が約540ppmに到達し、2100年以降の放射強制力は4.5Wm⁻²で安定化する。過去のフォーシング（1850-2005年）およびRCP4.5シナリオ（2006-2300年）のフォーシングを地球システムモデル（MIROC-ESM）に与え、気候変動予測実験を行った。

現在気候では、年平均気温および暖かさの指数（植物の生育に有効であるとされる気温の年積算値）のモデルの再現性は良好であった。一方、年降水量および気候湿潤度（降水量／可能蒸発量）は、高標高の地域や乾燥地帯で過大評価している傾向があることが確認された。その結果、モデル気候値からケッペン気候区分を作成すると、乾燥地域の面積が過小評価される。同時にMIROC-ESM内の植生モデルによって予測される植生の分布でも、本来乾燥地帯であるべき地域や高標高地帯に植物が繁茂する傾向があった。これらの原因は、T42グリッドにおいて標高の情報が平準化されていること、雲の再現性の不十分さ、陸域生態系モデルにおける乾燥ストレスの過小評価、などが原因として考えられた。RCP4.5シナリオを用いた予測実験では、21世紀中にツンドラ気候の多くの地域が亜寒帯気候にシフトし、以降大きな変化を見せなくなる。しかし、植物の成長が追いつくにはさらに100年程度時

間を要するという結果が得られた（100年ステップでの解析結果）。また予測される温帯気候や熱帯気候は、現在の分布に比べて一部拡大し、予測される植物の分布もそれに伴って拡大していた。しかし温帯気候や熱帯気候の一部では気候変動に加えて土地利用変化の影響も大きく、これらの影響を分離するためには更なる解析が必要である。また、植生分布の予測は地表面の状態とそこからの大気へのフィードバックを決める上でも非常に重要であるが、未だ不確実性が大きく、さらなるモデル高度化およびモデル間比較などを通した不確実性評価が必要であると考えられる。

12. 大気中CO₂濃度変動と北半球陸域過程との関係に関する数値実験解析

馬淵和雄（気象研究所）

大陸スケールでの陸域物理・生物過程の変動と炭素収支変動、およびそれらと気候との相互作用のメカニズムはどのようにになっているのか？ エルニーニョ前後の気候場の変動と陸域諸要素の変動・炭素収支変動を対象として数値実験解析を試みた。

1990年代後半から2000年代前半においては、97年から98年および02年から03年にかけてエルニーニョが発生している。大気中CO₂濃度観測結果から、エルニーニョ発生期に大気中CO₂濃度の年々変動に変化が現れることが明らかにされている。その原因を解明するため、陸域物理生物過程モデルBAIM2を導入した全球気候モデル（T63L21）を用い、上記のエルニーニョ前後の期間を対象とした数値実験を行い、大気中CO₂濃度変動と陸域過程および大気－陸域相互作用の変動の関係について、陸域エネルギー収支および炭素収支変動を対象として解析を行った。数値実験方法は以下の通りである。BAIM2をフルカップルで導入した全球気候モデルによる上記エルニーニョ期間を含む2例の5年積分を行った（1996-2000および2001-2005）。それぞれの実験においては、大気側物理量の初期値として24時間ごとの00Z客観解析データ（気象庁作成再解析データ）を使用した48時間積分の並列連続実行を行い、大気中CO₂濃度および陸域諸要素の値は、それぞれの5年積分期間中、モデル計算結果をそのまま引き継ぐ手法を採用した。SSTおよび海氷については、HadISSTデータセットによる月平均値を与えた。CO₂人為排出量はCDIACデータを与え、海洋－大気間CO₂フラックスは、TransComプロジェクトで用いられたデータセットにより与えた。

解析は、各48時間積分後半の24時間の計算結果を対象とした。これらにより、現実に近い大気環境を再現しつつ、大気－陸域物理生物過程相互作用をフルカップルで再現できる。

実験対象期間における大気中CO₂濃度の年々変動を、地点観測データと比較した結果、モデルは各期間の年々変動を良く再現していることが分かった。特に、97年夏季の相対的な低濃度傾向から98年夏季の高濃度傾向、および03年夏季の相対的高濃度傾向から04年の低濃度傾向の特徴が再現できている。この間の夏季におけるモデルの降水量の再現性をCMAP解析雨量データと比較した結果、モデルはその年々変動の特徴を再現できていることが分かった。これらの結果を踏まえ、上記2例の夏季の大気中CO₂濃度の相対的高濃度年と低濃度年について、陸域諸要素の変動を比較した。その結果、夏季高濃度年においては、ユーラシア大陸における高温乾燥傾向、北米大陸における高温乾燥傾向、東アジアにおける日射量減少傾向など、共通する要因によるGPPの減少およびNEPの低減が生じ、これらにより、夏季における大気中CO₂濃度が相対的に高濃度になったことが分かった。また、北半球中高緯度の夏季の500hPa高度場の97年と98年の差および03年と04年の差は、差のパターンが非常に良く似ており、エルニーニョと中高緯度高度場偏差に何らかの関係があることが示唆された。これらの大気場の偏差と上記の北半球陸域における植生活動の偏差は密接に関係していることが考えられる。

これらの結果から、大気場、陸域諸過程、および炭素収支の相互作用に関して、2例のエルニーニョに共通した変動メカニズムが存在することが示唆され、これらは地球規模の組織的連動メカニズムの例と言える。今後さらに、プロットスケールでのグランドトゥールズ観測の展開、リモートセンシング技術の向上と観測データの蓄積、およびそれらと3次元的モデル実験解析との連携による実態把握とメカニズムの解明により、気候変動の将来予測の精度の向上が期待される。

謝辞

ご多忙のところ講演を快く引き受けていただいた講演者各位、および研究会に参加していただいた多くの方々に感謝申し上げます。

世話人：

馬淵和雄（気象研究所）、大谷義一（森林総合研究

所）、奈佐原顕郎（筑波大学）、伊藤昭彦（国立環境研究所）、佐藤 永（名古屋大学）、大石龍太（東京大学）、立入 郁（海洋研究開発機構）、近藤雅征（福島大学）

略語一覧

- CDIAC：Carbon Dioxide Information Analysis Center
二酸化炭素情報解析センター
- CMAP：Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation 気候予測センター統合解析雨量データ
- CMIP5：Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 大気－海洋結合モデル相互比較プロジェクト第5期
- GCOM-C1：Global Change Observation Mission - Climate 1 地球環境変動観測ミッション第1期気候変動観測衛星
- GPP：Gross primary production 総一次生産
- LAI：Leaf area index 葉面積指数
- NCEP-DOE：National Centers for Environmental Prediction - Department of Energy アメリカ環境予測センター－アメリカ合衆国エネルギー省
- NEP：Net ecosystem production 純生態系生産
- NPP：Net primary production 純一次生産
- RCP4.5：Representative Concentration Pathway 4.5 代表的濃度経路シナリオ4.5
- SGLI：Second Generation Global Imager 多波長光学放射計
- SPAC：Soil-Plant-Atmosphere Continuum 土壌－植生－大気連続体
- WRF-ARW：Weather Research and Forecasting modeling system - Advanced Research WRF 米国大気研究センター・米国環境予測センターなどで開発されている領域気象モデルシステム

参考文献

- Haginoya, S., H. Fujii, T. Kuwagata, J. Xu, Y. Ishigooka, S. Kang and Y. Zhang, 2009: Air-lake interaction features found in heat and water exchanges over Nam Co on the Tibetan Plateau. SOLA, 5, 172-175.
- Hirata, R., N. Saigusa, S. Yamamoto, Y. Ohtani, R. Ide, J. Asanuma, M. Gamo, T. Hirano, H. Kondo, Y. Kosugi, S.-G. Li, Y. Nakai, K. Takagi, M. Tani and H. Wang, 2008: Spatial distribution of carbon balance in forest ecosystems across East Asia. Agric. For. Meteor., 148, 761-775.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). Bull. Amer. Meteor. Soc., 83, 1631-1643.

- Kumagai, T. and A. Porporato, 2012: Strategies of a Bornean tropical rainforest water use as a function of rainfall regime: isohydric or anisohydric? *Plant Cell Environ.*, **35**, 61-71.
- Kurita, S., 2003: Effects of stability within sparse canopies on aerodynamic resistance in roughness sub-layer obtained by wind tunnel experiment. IUGG2003 abstract, Sapporo, B55.
- 栗田 進, 2011: 粗度・ゼロ面変位の安定度依存性に関する“Zilitinkevich *et al.* (2008) の式”の検証 (弱安定時) と一般化 (キャノピー依存性). 日本気象学会2011年度春季大会講演予稿集, (99), 344.
- Li, S.-G., J. Asanuma, W. Eugster, A. Kotani, J.-J. Liu, T. Urano, T. Oikawa, G. Davaa, D. Oyumbaatar and M. Sugita, 2005: Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Glob. Change Biol.*, **11**, 1941-1955.
- Saigusa, N., K. Ichii, H. Murakami, R. Hirata, J. Asanuma, H. Den, S.J. Han, R. Ide, S.-G. Li, T. Ohta, T. Sasai, S.-Q. Wang and G.-R. Yu, 2010: Impact of meteorological anomalies in the 2003 summer on gross primary productivity in East Asia. *Biogeosciences*, **7**, 641-655.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J. G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-475+STR.
- Sugimoto, S., K. Ueno and W. Sha, 2008: Transportation of water vapor into the Tibetan Plateau in the case of a passing synoptic-scale trough. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 935-949.
- Sugita, M., J. Asanuma, M. Tsujimura, S. Mariko, M. Lu, F. Kimura, D. Azzaya and T. Adyasuren, 2007: An overview of the rangelands atmosphere-hydrosphere-biosphere interaction study experiment in northeastern Asia (RAISE). *J. Hydrol.*, **333**, 3-20.
- Ueno, K., S. Sugimoto, T. Koike, H. Tsutsui and X. Xu, 2011: Generation processes of mesoscale convective systems following midlatitude troughs around the Sichuan Basin. *J. Geophys. Res.*, **116**, D02104.
- Xu, J. and S. Haginoya, 2001: An estimation of heat and water balances in the Tibetan Plateau. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 485-504.
- Xu, J., S. Haginoya, K. Masuda and R. Suzuki, 2005: Heat and water balance estimates over the Tibetan Plateau in 1997-1998. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 577-593.
- Xu, J., S. Yu, J. Liu, S. Haginoya, Y. Ishigooka, T. Kuwagata, M. Hara and T. Yasunari, 2009: The implication of heat and water balance changes in a lake basin on the Tibetan plateau. *Hydrol. Res. Lett.*, **3**, 1-5.
- Yatagai, A., O. Arakawa, K. Kamiguchi, H. Kawamoto, M. I. Nodzu and A. Hamada, 2009: A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *SOLA*, **5**, 137-140.
- Zilitinkevich, S. S., I. Mammarella, A. A. Baklanov and S. M. Joffre, 2008: The effect of stratification on the aerodynamic roughness length and displacement height. *Bound.-Layer Meteor.*, **129**, 179-190.