

## 9-1. 基盤研究部門 | 陸域海洋圏生態研究部



### 陸域海洋圏生態研究部の研究テーマ・キーワード

- 環北極域における大気-陸域水循環の変動と地球温暖化の研究
- 気候変動や人間活動が陸上生態系に及ぼす影響の研究
- アジアモンスーン域の雲・降水変動とその変動機構の研究
- アフリカ半乾燥域における水-食料安全保障の研究
- 縁辺海や沿岸域における植物プランクトンの動態の研究
- 気候変化に伴う外洋生態系および物質循環過程の変化の研究
- 海洋の波動現象と気候変動との相互作用の研究
- 現地観測、データ解析および数値モデルによる総合的解析

### 陸域海洋圏生態研究部の紹介

地球表層に存在する陸域海洋圏は、太陽からのエネルギーを吸収し、エネルギーおよび水や二酸化炭素などの物質循環を通して、地球の気候システムの形成と維持に重要な役割を果たしています。この研究部では、地域から全球規模までの陸域海洋圏の生態系におけるエネルギー・水輸送と物質循環を、多地点での現地観測を行いつつ、全球を網羅する人工衛星データや大気再解析データ、数値モデル等を駆使して総合的に研究を行っています。

陸域については、熱帯域から北極域をフィールドにして、気候変動と陸域の水・物質循環の変化との関係を、現地観測、精緻な大気陸面結合モデル、大気再解析データなどの解析から明らかにします。熱帯から北極域の複数の観測サイトで、降水、蒸発散、土壌水分、二酸化炭素収支、メタン収支など観測しつつ、土地利用変化などの人間活動、海水面積や海面温度などの海洋表層の状態、植生の応答などが大気水循環を通してどのように気候システムに影響を及ぼすのか、あるいは逆に気候変動がどのように植生を変化させ、水循環や物質循環を変化させるのかについて研究しています。

海洋については、最新の人工衛星による観測や数値シミュレーションによる研究を、海洋の現場観測も行いながら進めています。海洋の熱収支や流れ・波浪が大気環境とどのように相互作用し、気候や台風などの気象現象とどのように関連しあっているのか、これによって起こる海洋の流れや混合過程が海洋の一次生産者である植物プランクトンを基盤とした海洋生態系にどのように影響を与えているのか、逆に生態系が物理現象や気候へ影響する可能性などについて、互に関連し合う海洋の物理・生物・化学過程さらに気候や気象現象を含め、総合的に研究しています。

### 2016年度 陸域海洋圏生態研究部の主要な成果

#### 1. 北極域における温室効果気体の動態解明と収支評価

文部科学省の補助事業である北極域研究推進プロジェクトを推進した。プロジェクト内では、アラスカ内陸部の永久凍土上に成立するクロトウヒ林からの温室効果気体であるメタンの放出を観測した。

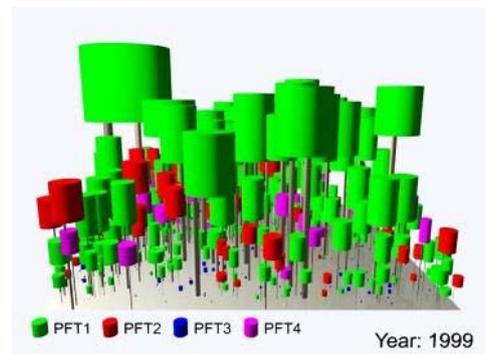
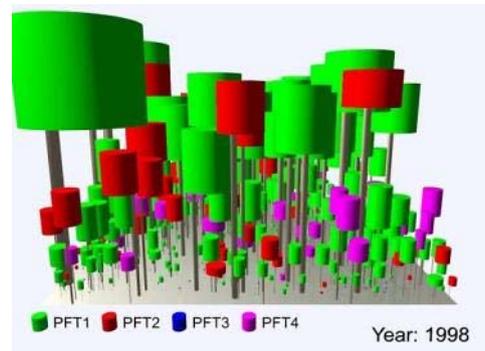
アラスカ大学フェアバンクス校内のクロトウヒ林を対象に、気象、渦相関法による各フラックス、土壌環境(温度・水分・融解深)、植生調査を実施した。また、土壌水・土壌空気をサンプルしそこに含まれるメタンの濃度を分析した。これまでに本試験地で取得された現地観測結果に加え、本年度に実施した現地観測から、融解深、嫌気層の厚さ(凍土面からの地下水位)が、土壌からのメタン放出に大きく寄与していることを明らかにした。特に冠水時はメタン放出量が劇的に増加することが分かった。本試験地における土壌水・土壌空気の分析結果より、メタンが土壌深部の土壌水中に溶存態として存在していることを明らかにした。試験地内の湿潤エリアでは、土壌表層も飽和していたが、表層近くの土壌水の溶存メタン濃度は低く、メタンの生成には深い土壌の存在が重要であることが示唆される。

Reference: Igarashi et al. (2016): Response of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emission from a poorly-drained black spruce forest over permafrost in an Interior Alaska, The Seventh Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan. 2016.12.

## 2. 陸域生態系動態モデルの開発とボルネオ島における突発的乾燥に伴う樹木枯死の再現

近年、気候変動による熱帯林への影響に注目が集まっている。アマゾンの熱帯林では雨季と乾季があり、将来の気候変動で乾季が長期化することで森林へのダメージが発生することが懸念されている。一方ボルネオ島の場合、アマゾンとは異なり、年間を通じて降水がある。しかし、ボルネオの樹種は同じ赤道熱帯のアマゾンの樹種に比べて乾燥に弱いことが指摘されている。そして、1997-1998年のエルニーニョ現象によって極端な乾燥が発生した際（1998年1月から3月までの降水量が例年の24%）、高木であるフタバガキ科の枯死率が通常年の12-30倍であった。そのため、もし将来の気候変動でエルニーニョ現象による突発的な乾燥期間が発生しやすくなった場合、ボルネオの熱帯雨林は高木を中心に大きなダメージを受ける可能性がある。

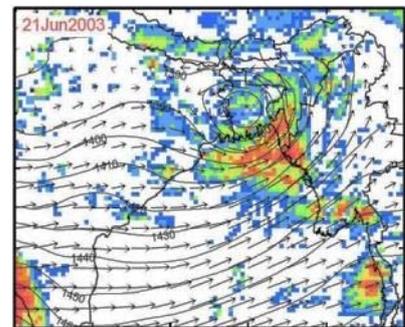
このような現象を含め、森林生態系が将来気候で直面するリスクを予測評価するためには、個々の樹木の生き方（例えば、光合成、呼吸、水分・栄養の利用、繁殖、成長、死亡）や植物集団としての振る舞い（例えば、光・水分・栄養の奪い合い）をモデル化する必要がある。これらをメカニスティックに表現するため、我々は新しい陸域生態系動態モデル S-TEDy を開発した。このモデルをボルネオ島のランビル国立公園における熱帯雨林に適用した結果、エルニーニョ現象にともなう突発的な乾燥で「高い木ほど死にやすい」という実際の観測結果を再現することに成功した。



S-TEDy による、ボルネオ島の熱帯雨林に対する突発的な乾燥の影響の再現例。

## 3. 夏季バングラデシュにおける渦状低気圧の発生環境場の解析

夏季バングラデシュは世界最多雨地域の一つであり、降水活動には約2週間周期で活発と不活発な状態を繰り返す季節内振動 (QBW) が顕著である。QBWの活発期の約60%でバングラデシュ周辺に渦状低気圧が存在し (LPS case)、約40%は渦状低気圧を伴わない (non-LPS case)。本研究は、夏季バングラデシュのQBWの活発期に豪雨をもたらす低気圧の発生環境を気候学的明らかにした。バングラデシュにおけるQBWのLPS caseとnon-LPS caseが、どのような機構によって発生するのかを統計的に解析した。その結果、アジアモンスーン域で卓越する2つの季節内振動モードで、異なる大気循環場の空間構造と伝播特性を示すQBWと25-60日周期の季節内振動 (BSISO) の時空間的な重ね合わせにより、LPS caseとnon-LPS caseが周期的かつ選択的に発生する傾向があることを明らかにした。LPS-caseは西太平洋から西進するQBWの下層の高気圧偏差がインドシナ半島西岸に位置し、赤道インド洋から北進するBSISOの低気圧偏差がインドからベンガル湾に位置する時に発生しやすい。QBWの高気圧偏差北西側の西風偏差とBSISOの低気圧偏差南側の西風偏差が、ベンガル湾北部で西風を強化し低気圧性シアが増大するため、バングラデシュ周辺は低気圧が発生しやすい環境となる。一方、non-LPS caseはQBWの高気圧偏差がベンガル湾に位置し、BSISOの高気圧偏差がインドからベンガル湾に位置する時に発生しやすい。BSISOとQBWの高気圧偏差の北側の西風偏差がバングラデシュ上に強い西風を形成し、周辺山岳域の風上斜面で降水が増える。このように、従来バングラデシュの降水変動には影響が小さいと考えられていたBSISOが、QBWの降水活発期における総観規模の降水発生機構に大きく影響を及ぼすことが明らかになった。



夏季の降水活発期にバングラデシュ周辺で発達する渦状低気圧の例 (LPS case)。陰影域が降水量。ベクトルは850 hPaの風。等値線は850 hPaの高度場。

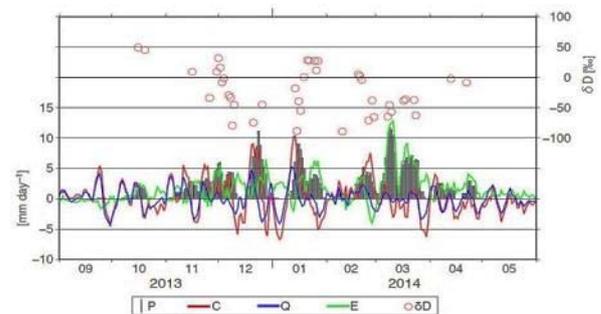
Reference: Hatsuzuka, D. and H. Fujinami (2017): Effects of the South Asian monsoon intraseasonal modes on genesis of low pressure systems over Bangladesh, *Journal of Climate*, 30, 2481-2499, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0360.1.

#### 4. 大気水収支解析および水の水素・酸素安定同位体分析によるナミビア北中部・季節小湿地における水の起源

水文気候学研究室は、国際科学技術共同研究推進事業・地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) の研究領域「生物資源の持続可能な生産・利用に資する研究」の採択研究課題「半乾燥地の水環境保全を目指した洪水-干ばつ対応農法の提案」(研究代表者: 近畿大学農学部教授・飯嶋盛雄) の水文学領域を担当し、ナミビア北中部の台地上に多数存在する小湿地の水環境を改変することなく、多雨-少雨といった気候の年々変動に適応しつつ食料(穀物)を確保するための「水-食料安全保障」研究を進めた。

ナミビア大学オゴンゴキャンパスで一雨毎に採取した降水の水素・酸素安定同位体組成を分析し降水の起源解析を実施するとともに、複数の季節小湿地における地表水と浅層地下水の起源解析を行った。浅層地下水については、トリチウム濃度の分析も行った。その結果、季節小湿地の地表水と浅層地下水は、この地域にもたらされた降水が降下浸透し、最近涵養されたものであることが分かった。すなわち、ナミビア北中部・季節小湿地の浅層地下水は、北隣国の多雨国アンゴラからの伏流水を起源とせず、ローカルな降水により数年-数十年前に涵養されていることが分かった。大気水収支解析を行った結果、この地域の蒸発散量(E)と降水量(P)の比(E/P)は雨季平均で0.7-0.8であり、雨季後半ほど地表面から蒸発散した水によって再び降水がもたらされる割合が高いことが明らかとなった。複数の小湿地の中央部に観測井を設けて水位のモニタリングを行った結果、雨季の前半よりも後半の方が水位の低下速度は緩やかであった。小湿地の水位低下量に対する蒸発散量と地下浸透量の割合を推定したところ、雨季前半で蒸発散量が4割、雨季中盤で5割、雨季後半で8割となり、水の安定同位体分析や大気水収支解析と整合的であった。

Reference: Hiyama et al. (2017): Analysing the origin of rain- and subsurface water in seasonal wetlands of north-central Namibia. *Environmental Research Letters*, 12, 034012, doi:10.1088/1748-9326/aa5bc8.



ナミビア大学オゴンゴキャンパス(ナミビア北中部)で採取した降水の水素安定同位体比( $\delta D$ )と、大気水収支成分(P:降水量、C:水蒸気収束量、Q:可降水量の変化量、E:蒸発散量)の時系列変化。

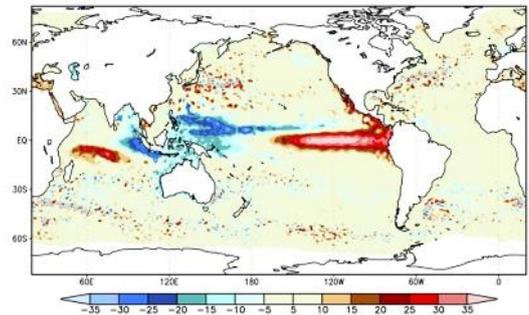
#### 5. 高速反復蛍光光度計による基礎生産の推定について

海洋の植物プランクトンによる基礎生産は、漁業生産を決める上でも、地球の炭素などの物質の循環を考える上でも重要である。これまで基礎生産は、炭素の同位体を利用した培養法で測定されてきたが、この作業を行うのは手間と時間がかかり、船舶を利用して広域に頻繁にデータを取得することは容易ではない。最近では衛星リモートセンシングを利用してモデル的に基礎生産を計算できるようになりつつあるが、このモデルのパラメータを決め、検証を行う上でも、現場での基礎生産の測定は欠かせない。高速反復蛍光光度計(FRRf)を利用することによって、最近では光化学系IIでの瞬間的な電子伝達速度(ETR)を測定することが可能になりつつある。炭素固定に必要な電子数( $K_c$ )が分かれば、このETRから基礎生産を推定することが可能であるが、これまで多くの研究ではこの $K_c$ を一定と仮定してきた。また、一般的に基礎生産では一日あたりの純基礎生産が必要であるが、そのための $K_c$ に関してはこれまで報告されていない。本研究では、まず有明海において、昼間2時間おきにETRを観測し、その積算から一日あたりのETRを求めた。また同時に、培養法によって基礎生産を推定し、これらのデータから一日あたりの $K_c$ を求めた。様々な環境要因と比較することによって、一日あたりの $K_c$ が一日あたりの光合成有効放射と良い相関を持つことを明らかにした。次に、東シナ海で同様の解析を行ったところ、やはり一日あたりの $K_c$ が光合成有効放射とよい相関を持つことが確認できたが、そこに含まれる植物プランクトンのサイズ組成によって、その傾きが異なることを明らかとした。東シナ海では、大型( $>20 \mu m$ )の植物プランクトンが多い時には傾きが大きく、同じ光合成有効放射での日あたりの $K_c$ は高かった。このことから、ある条件下でこのような関係を求めれば、植物プランクトンのサイズ組成と一日あたりの光合成有効放射を用いて、高速反復蛍光光度計のETRを基礎生産に変換することが可能となった。しかし、大型の植物プランクトンが多いと考えられる有明海では、東シナ海よりも傾きが小さく、栄養塩環境など別の要因もある可能性が示唆された。

Reference: Zhu, Y., J. Ishizaka, S. C. Tripathy, S. Wang, Y. Mino, T. Matsuno, and D. J. Suggett (2016): Variation of the photosynthetic electron transfer rate and electron requirement for daily net carbon fixation in Ariake Bay, Japan. *Journal of Oceanography*, 72(5), 761-776, doi:10.1007/s10872-016-0370-4.

## 6. 太平洋・インド洋・大西洋・南大洋における各種波動と気候変動の相互関係の解析

赤道域の海洋は「波動現象の宝庫」と呼ばれ、海洋の赤道ケルビン波や赤道ロスビー波は、太平洋のエルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象のような熱帯の気候変動において、重要な役割を担う。大気や海洋の擾乱エネルギーが、励起源からどのような経路で何によって空間的に運ばれるのか？という、水平方向の伝達経路やその強さの気候地理学的同定についての研究は、これまで殆ど行われなかった。例えばエルニーニョ/ラニーニャ現象の解説において従来の研究では「赤道上の海面水温アノマリーが、赤道ケルビン波によって東向きに伝搬し、南北アメリカ大陸沿岸に到達すると波は向きを変えて、沿岸ケルビン波として高緯度側に伝搬して中緯度ロスビー波の励起源になる」という説明がよく行われる。このように位相伝搬だけを根拠にしてイラスト的な矢印を地図上に描くのは問題があった。何故ならば「波の位相伝搬方向とエネルギー伝搬方向が逆になる」場合が大気海洋力学においてはよくあるからである。私たちは多種多様な波動理論を調査した結果、上記の熱帯域と亜帯域の接続問題を解決するヒントを得た。そして、緯度帯に関するシームレス機能と波の種類に関するオートフォーカス機能の両方を有するエネルギーフラックス(群速度ベクトル)計算式を導く事に成功した(Aiki et al., 2017 PEPS)。このブレークスルーを応用して、世界的に誰も挑戦した事がない研究テーマ「波動・渦エネルギーの伝達経路の気候地理学的同定による海洋・大気変動の理解」を開拓することが、我々の研究グループの長期目標である。

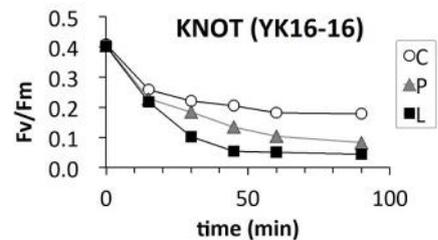
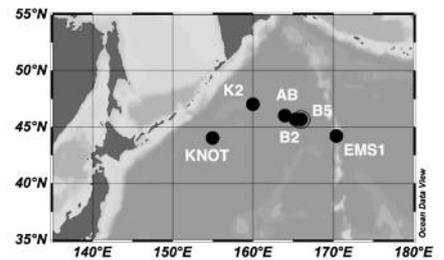


人工衛星搭載海面高度計によって観測された1997/1998年のエルニーニョ現象[cm]。

Reference: Aiki et al. (2017): Towards a seamlessly diagnosable expression for both equatorial and mid-latitude waves. *Progress of Earth and Planetary Sciences*, 4, 034012, doi 10.1186/s40645-017-0121-1.

## 7. 西部北太平洋亜寒帯域における植物プランクトン群集の強光応答および光防御メカニズム

温暖化に伴う海洋表層混合層の浅化は、層内平均光量の増加を介して、植物プランクトンの光化学系 (PS) II の光損傷リスクを潜在的に増大させる。特に HNLC 海域である西部北太平洋亜寒帯域では、鉄利用が制限された条件での植物プランクトンの強光応答が将来の生産力および CO<sub>2</sub> 吸収量を左右する鍵になる。天然プランクトン群集の強光ストレス応答を調べた結果、亜寒帯プランクトン群集の持つ PSII の方が亜熱帯群集に比べて光損傷を受けにくいことが明らかになっている。このことは、亜寒帯種が過剰な光エネルギーをより効率的に消費することを示し、そのメカニズムの候補として、リニア電子伝達系の PQ プールから電子を受け取って酸素還元を行う PTOX 経路が挙げられる。本研究では亜寒帯プランクトン群集(右図:上)を用いて強光照射実験を行い、PSII 最大量子収率 (Fv/Fm) の短時間変化から強光ストレスに対する PSII 応答を検討した。また PTOX 阻害剤を添加した試料を用いることで PTOX 経路の役割について検討した。全ての実験結果でコントロール試料に比べて PTOX 阻害試料の Fv/Fm 低下が見られた(右図:下)。更に同試料の PSII 光吸収断面積も小さくなることが明らかになった。これらは、PTOX 経路によるエネルギー消費がリニア電子伝達系の過還元状態を緩和する働きがあること (PSII 光失活を 20-35% 軽減する)、更にこの働きが阻害された場合に光吸収系の変化が生じることを示している。以上のように、亜寒帯プランクトン群集にとって PTOX 経路が強光に対する初期応答過程として重要な役割を担うことが確認できた。同プランクトン群集は鉄制限によって PSI 含量が相対的に低いため、光防御メカニズムとして PSI 上流側のエネルギー消費への依存度が高いと推察した。



上: 実験試料を採取した観測点。  
 下: 観測点 KNOT で実施した強光照射実験中の Fv/Fm 変化。  
 ○: コントロール試料(C)、  
 ■: 色素合成阻害剤添加試料(L)、  
 ▲: PTOX 阻害剤添加試料(P)。