

アジアにおける陸域水循環・物質循環プロセス研究と展望； 陸域－大気相互作用研究を中心として

Hydrological processes and biogeochemical cycles in Asia :
reviews and perspectives on land-atmosphere interaction studies

檜山 哲哉^{1*}・三枝 信子²・八木 一行³
Tetsuya HIYAMA^{1*}, Nobuko SAIGUSA² and Kazuyuki YAGI³

¹名古屋大学 宇宙地球環境研究所

²国立環境研究所 地球環境研究センター

³農業環境技術研究所

¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

²Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

³National Institute for Agro-Environmental Sciences

摘 要

BAHC と iLEAPS に関わるこれまでの世界的な動きや我が国の研究活動をレビューした後、今後の研究の方向性を展望する。iLEAPS が Future Earth に今後貢献するためには、大気化学的な物質循環研究とともに、25 年前に BAHC が目指した陸域水循環研究を発展させることが重要である。気候変動による水循環・物質循環の変動の定量評価とともに、緩和策や適応策の策定に貢献する学際・超学際研究の推進が不可欠である。

キーワード：炭素循環，地表面フラックス，統合陸域生態系－大気プロセス研究計画，水循環，水循環の生物的側面，陸域生態系

Key words : carbon cycle, surface fluxes, iLEAPS, water cycle, BAHC, terrestrial ecosystems

1. はじめに

ICSU (International Council for Science : 国際科学会議) の 1986 年総会で実施が決議された IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme : 地球圏－生物圏国際協同研究計画) は、我が国では日本学術会議による 1990 年 4 月の勧告の後、同年 7 月 31 日に学術審議会にて正式に建議されスタートした。この建議は、人類の生存に大きな影響を与える地球環境問題に対し、地球システムの学術的な解明を通じて貢献することの重要性を示したものであり、我が国での研究領域は、1) 大気微量成分と陸域生態系、2) 物質循環と海洋生態系、3) 陸域生態系と水循環、4) 地球環境のモデリング、5) 地球環境変化のモニタリング、6) 古環境の変遷、7) 地球環境に対する人間活動の影響評価、の 7 領域であった。

IGBP 第 1 期のコアプログラムとして設定された BAHC (Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle : 水循環の生物的側面) は、上記 3) に対応した計画であり、その後継と位置づけられる iLEAPS (Integrated Land Ecosystem - Atmosphere Processes Study : 統合

陸域生態系－大気プロセス研究計画) は、1), 3), 7) が統合した研究計画に相当する。

本論では、BAHC と iLEAPS に関わる世界の諸活動を紹介するとともに、アジアを含む我が国の研究活動を振り返り、今後の研究の方向性を展望する。

2. BAHC 研究と成果

BAHC は 1991 年に開始された陸域生態系と水循環に関わる研究計画である。開始時の SSC (Scientific Steering Committee : 科学運営委員会) はドイツ・ベルリン自由大学気象研究所の Hans-Jurgen Bolle 教授を委員長とし、第 1 期 10 年間 (前期 5 年、後期 5 年) の活動を開始した。初期の BAHC には、4 つのテーマが設定された (表 1)¹⁾。図 1 は時空間スケール別に BAHC の 4 つのフォーカスをまとめたものである。

BAHC 設立の翌年 (1992 年) の 11 月 16~18 日、“BAHC Open Meeting and Scientific Conference” と題した国際会議がフランス・トゥールーズで開催された。その内容は上記 4 つのテーマに関する研究成果の公表であり、BAHC 開始直後 (初期) の研究成果

受付：2015 年 3 月 23 日，受理：2015 年 8 月 10 日

* 〒 464-8601 名古屋市千種区不老町，e-mail : hiyama@nagoya-u.jp

表 1 BAHC 設立当初の 4 つのフォーカス。

Focus 1 フォーカス 1	Plot scale ¹⁾ research on fundamental soil – vegetation – atmosphere interactions 土壌－植生－大気間の相互作用に関するプロットスケール研究
Focus 2 フォーカス 2	Aspects of scaling and aggregation to regional scales ²⁾ as defined by the grid size of the mesoscale and global circulation models (GCMs) メソスケールモデルと大気大循環モデル(GCMs)のグリッドサイズを念頭に置いた、プロットスケールから領域スケールへのスケールアップ手法開発
Focus 3 フォーカス 3	Long-term (seasonal to decadal) dynamics of coupling between biosphere, hydrology and climate 生物過程－水文過程－気候システム間の長期(季節から十年スケール)のダイナミクス
Focus 4 フォーカス 4	Development of methods to disaggregate output of GCMs in a dynamically, physically and biologically consistent way to scales more appropriate for assessments of the impacts of global change on natural and man-made ecosystems さまざまな陸域生態系に対する気候変動のインパクトの、より適切な定量評価のための、GCMsの出力結果のスケールダウン手法開発

*1：森林、草地、水田など、同じ地表被覆と考えられる数十メートルから数キロメートルの空間スケール。

*2：ここで言う regional scale とは、全球を格子状に区切った場合の空間スケールを想定しており、百～数百キロメートルの空間スケール。

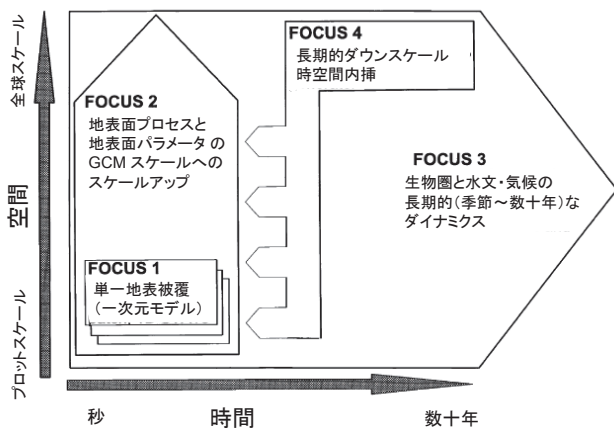
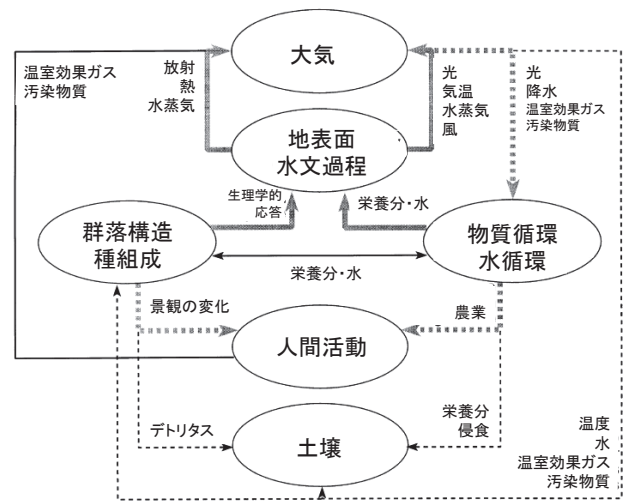


図 1 時空間スケール別の BAHC のフォーカス。(Hutjes ほか¹⁾の Fig. 1 を改変.)



—— 0.01 ～ 1 時間
 - - - - 一ヶ月 ～ 百年
 ——— 一年 ～ 千年
 - - - - - 十年 ～ 一万年

図 2 BAHC でフォーカスされた生物圏(陸域)－大気間の水循環と物質(生物地球化学)循環過程。(Hutjes ほか¹⁾の Fig. 2 を改変.)

が盛り込まれたものであった。この国際会議の内容は、その後の研究成果とともに Agricultural and Forest Meteorology 誌の第 73 巻に BAHC 特集号として出版されている²⁾。同様に BAHC スペシャルセッションが 1995 年の EGS(European Geophysical Society, 1971 年から 2004 年まで存在。2002 年 9 月に European Union of Geosciences(EUG)と合併して European Geosciences Union(EGU)に継承。)で企画・開催され、BAHC に関する当時の最新の研究成果の公表とともに、上記 4 つのテーマと将来のキーテーマについて議論された。これらの研究会を経て、オランダ・ワッハニンゲン大学の Pavel Kabat(当時)らによって、後述する BAHC 後期のサイエンスプランとキーテーマが設定された¹⁾。図 2 は、当時の議論によって生み出された BAHC 研究の概念図の一例である。

我が国では、1996 年 11 月 4～7 日、BAHC と同じく IGBP 第 1 期のコアプログラムであった LUCC(Land Use and Land Cover Change：土地利用と土地被覆変化)との合同国際会議が筑波大学の榎根 勇(当時)のリーダーシップのもと、京都市で開催され

た。この時の講演記録は Proceedings of IGBP/BAHC-LUCC Joint Inter-Core Projects Symposium on Interactions between the Hydrological Cycle and Land Use/Cover として出版されている³⁾。

その頃(1980 年代後半～1990 年代半ばにかけて)、上記 4 つのテーマに関係し、海外では陸域－大気相互作用に関するさまざまな大規模野外実験が実施されていた。それらは、米国カンザス・草原地帯の FIFE(First ISLSCP(International Satellite Land Surface Climatology Project)Field Experiment)⁴⁾、フランス西部・森林地帯の HAPEX-MOBILHY(Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment - Modelisation du Bilan Hydrique)⁵⁾、アフリカサヘル・半乾燥地帯の HAPEX-Sahel^{6), 7)}、カナダ中央部・北方林地帯の BOREAS(Boreal Ecosystem-Atmosphere Study)⁸⁾、スウェーデン南部・森林－農耕地－住宅地からなる複雑地表上で行われた NOPEX(Northern Hemisphere Climate-

Processes Land-Surface Experiment)^{9), 10)}等, 実に多種多様な気候帯・地表被覆で行われたプロジェクトであった。FIFE や BOREAS 等は WCRP(World Climate Research Programme: 世界気候研究計画)のイニシアティブのもとに実施された野外実験であったが, BAHC の目指すテーマと非常に重なっていたため, 1990 年代には, WCRP と BAHC との合同ワークショップが頻繁に開催されていた。

これらの陸域-大気相互作用に関わる大規模野外実験は, GCMs(Global(General)Circulation Models: 大気大循環モデル)のグリッドスケールの広域地表フラックス(正確にはフラックス密度)の算定方法, グリッドスケールよりも細かい空間スケール(サブグリッドスケール)を形成する地表被覆のフラックスの広域地表フラックスへの aggregate(グリッドスケールにスケールアップするためのモデル化)についての方法論, これらを目指す上で欠かせない人工衛星データ利用と手法開発の3つを主たる目的としていた¹¹⁾。我が国でも上記の大規模野外実験に倣い, TABLE 92(Tsukuba Atmospheric Boundary Layer Experiment 92)^{12) - 15)}が実施された。TABLE 92 は, 我が国における BAHC の研究活動の一環として位置づけられた。TABLE 92 は, 茨城県つくば市(筑波研究学園都市)をフィールドに, 百メートル程度の空間スケールを有する5種(牧草地, アカマツ林, アスファルト面, 芝地, 水田)の地表被覆上で放射・熱フラックスを測定し¹²⁾, 係留気球や気象研究所の高さ213メートルの鉄塔で得られた日中の大気境界層(混合層)内の風速・気温・湿度の鉛直プロファイルを同時期に測定することで, 個々の地表被覆のフラックスから十キロメートルスケールの広域地表フラックスの算定方法について議論した^{12), 13), 15)}。

TABLE 92 で得られた観測データにより, 茨城県つくば市のような平坦でさまざまな地表被覆が混在する複雑地表面上の広域地表フラックスは, 大気境界層観測地点の風上側十キロメートル弱の地表被覆の影響を受けることが明らかとなった¹⁵⁾。TABLE 92 によるこれら一連の研究は, 広域地表フラックスの aggregate に関わる我が国の実証的研究事例であり, 我が国の BAHC の代表的研究成果である。

上述した BAHC の4つのテーマのうち, フォーカス1, 2, 3については, 観測的研究と平行してモデル化の研究が進み, 1990 年代にはいわゆる陸面モデルと呼称されるモデル開発が進展し, 体系化した。必ずしも BAHC のみに帰属した研究ではないが, 1960 年代後半に始まる陸面モデルの進展を詳細にレビューした Pitman の論文¹⁶⁾は一読に値する。我が国でも複数の陸面モデルが開発・改良され, その流れは, 植生をある気候条件のもとに静的に表現する静的植生モデルから, 種の変遷と群落構造の変化を表現でき, 陸域と気候が相互作用することを表現できる DGVM(Dynamic Global Vegetation Model, 動的全球植生モデル)へと受け継がれている^{17), 18)}。

BAHC 後期のキーテーマは, 表2に示す8項目である¹⁾。

これらを概観すると, ポイントスケールでの熱・水・エネルギー・炭素フラックス測定(フラックス観測)から始まり, 陸域-大気過程とそのパラメタリゼーション, 領域スケールでの気候モデリング, グローバルスケールでの植生-気候モデリングを含んでおり, 今でも重要な研究テーマが並べられている。特に FLUXNET はアジアを含む世界各地で広く展開されているため, 研究イニシアティブとしての機能が十分に果たされたと言っても過言ではない。

表2 BAHC 後期の8つのキーテーマ。

1)	Energy, water and carbon fluxes at the patch scale ^{*1} - FLUXNET ^{*2} パッチ(プロット)スケールでのエネルギー・水・炭素フラックス
2)	Evaluation of the role of below ground processes 地表面下の水・物質循環過程の役割の定量評価
3)	Parameterization ^{*3} of land-atmosphere interactions 陸域-大気相互作用のパラメタリゼーション
4)	Land use climate interactions at the regional scale ^{*4} 領域スケールでの土地利用と気候の相互作用
5)	Global vegetation-climate interactions 全球での植生-気候相互作用
6)	Influence of climate change and human activities on mobilisation and transport through riverine systems 気候変化と人間活動の河川システム(陸-川-海の物質輸送)への影響
7)	Mountain hydrology and ecology 山岳域の水文と生態
8)	Development of global data sets 全球データセットの構築

*1: プロットスケールとほぼ同じ空間スケール。

*2: 初期の FLUXNET の詳細については, Baldocchi ほか¹⁹⁾を参照されたい。

*3: 水や物質の流れを数式化し, 輸送係数等を定量化すること。

*4: ここで定義される regional scale は, 大陸スケールよりも小さい空間スケール。例えば, アマゾン川や黄河などの河川流域スケールに相当する。

この FLUXNET は、その後の iLEAPS における重要な研究課題(推進プロジェクト)の1つとなっている。

3. iLEAPS 研究と成果

iLEAPS は、IGBP の第2期に設定されたコアプロジェクトの1つで、陸域-大気間の境界で生じる諸過程の理解を目的とした研究計画である。IGBP 第2期においては、地球システムを構成する3つの重要な要素である大気(IGAC: International Global Atmospheric Chemistry Project: 地球大気化学国際協同研究計画)、海洋(IMBER: Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research: 海洋生物地球化学と生態系の統合研究)、陸域(GLP: Global Land Project: 全球陸域研究計画)を対象とするコアプロジェクトに加え、それぞれの境界領域で起こる相互作用を対象とする3つのコアプロジェクトが設置された。それが、大気-陸域間を担う iLEAPS、大気-海洋間の SOLAS (Surface Ocean-Lower Atmosphere Study: 海洋・大気間の物質相互作用研究計画)、陸域-海洋間の LOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone: 陸域-海域相互作用研究計画)である。

iLEAPS は、従来の BAHC がカバーしてきた陸域-大気間のエネルギーと物質の交換、およびこれらの変動に関連する物理的、化学的、生物学的過程を含むと同時に、IGBP 第1期の GCTE(Global Change and Terrestrial Ecosystems: 地球環境変化と陸域生態系)で中心課題であった陸域生態系における炭素循環過程、IGAC に含まれていた陸域の温室効果関連ガス動態、同じく IGAC の中心課題であった陸域起源エアロゾル粒子の発生過程とその雲・降水過程への影響、などを包括する内容になっている。この

ように現状の iLEAPS は、陸域-大気間の物理・化学・生物過程の相互作用を対象として、分子規模から全球規模まで、また、過去から現在を経て未来に至る幅広い時空間スケールの現象について、地上観測・航空機観測・衛星観測などの多様な観測と、素過程のモデルから地球システムモデルに至る広範な数値モデルを統合的に用いる研究を推進することを目指している。iLEAPS イニシアティブ(iLEAPS の推進研究課題: <http://www.ileaps.org/> 参照)は、表3に示す8項目となっている。

これらを概観すると、iLEAPS は第1期の BAHC から継続している陸域-大気間の熱・水・物質循環の観測や相互作用のモデリング、GCTE が取り組んできた陸域生態系への気候変化影響研究を基盤としつつも、新しい研究対象である生物起源・人為起源エアロゾルの生成とその雲-降水過程への影響、気候変化、特に地球温暖化に伴う極端現象の変化予測などにも焦点を当て、気候適応研究を視野に入れたプログラムに進化してきたことがわかる。また、GLP の主要なテーマの1つでもある人為的な土地利用・土地被覆変化の現状把握と地球システムへの影響評価もカバーし、地球環境問題の理解と解決のため、社会・経済システムの在り方にも研究を広げていく方向に軸足を移しつつある。

2004年からおよそ10年にわたるこれまでの iLEAPS の活動は、主に SSC での議論に基づいてイニシアティブごとに研究が推進され、およそ3年に1回世界各地で開催する国際会議において、研究成果発表や若手育成の取組を行うという方法で推進されてきた。初期の SSC は、IGBP 第1期に BAHC の研究を先導してきた Pavel Kabat と、IGAC を主導してきたドイツ・マックスプランク化学研究所の Meinrat Andreae が共同議長を務め、彼らの強いリーダー

表3 iLEAPS イニシアティブ(iLEAPS が推進する研究課題)。

1)	Aerosols, clouds, precipitation and climate (ACPC) エアロゾル-雲-降水過程
2)	Climatic impacts of adaptation measures 気候影響と適応の指標開発
3)	ESA ¹ -iLEAPS biosphere-atmosphere-society index 生物圏-大気-社会間の指標開発
4)	Emission, exchange, and processes of reactive compounds 反応性エアロゾルの放出-交換過程
5)	Extreme events and environments (EEE) 極端気象と環境
6)	Bridging the gap between iLEAPS and GEWEX ² land-surface modelling iLEAPS と GEWEX 間の陸域-大気モデリングに関する共同研究
7)	Interdisciplinary biomass burning initiative (IBBI) 原野火災に関する学際研究
8)	Interactions among managed ecosystems, climate, and societies (IMECS) 人類管理下の陸域生態系と気候-社会間の相互作用研究

*1: European Space Agency の略。

*2: GEWEX(Global Energy and Water Cycle Experiment: 全球エネルギー・水循環観測計画)は WCRP のコアプログラムの1つである。

シップのもと、陸域-大気間の物理・化学・生物過程を広範に扱う iLEAPS の基本方針がつけられた。

第 1 回 iLEAPS 国際会議は、2006 年 1 月、米国・ボルダーにて開催された。この時に併設して開催されたのが“Flux Measurements in Difficult Conditions”という専門家向けのワークショップ²⁰⁾であり、熱・水・二酸化炭素フラックス観測の難しい場所(複雑地形地など)でどのように質の高い観測をするかといった問題が議論された。iLEAPS が陸面プロセスから雲・エアロゾルまで広範にカバーすると称しても、初期の段階では、個々の観測技術の高度化や精度向上も大きな課題であったことがわかる。

続いて第 2 回 iLEAPS 国際会議は、2009 年 8 月 24 ~ 28 日、第 6 回 GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment: 全球エネルギー・水循環観測計画)会議と合同で、オーストラリア・メルボルンにて開催された。iLEAPS は陸面モデリングを重要課題の 1 つと位置づけており、それが WCRP/GEWEX のテーマおよび研究者コミュニティと重なる。この会議のテーマは“Water in a Changing Climate: Progress in Land-Atmosphere Interactions and Energy/Water Cycle Research”であったため、陸域-大気相互作用の研究者が数多く参加した²¹⁾。

この頃までに、iLEAPS の重要な国際共同研究であるアマゾン川流域での LBA (Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia: 生物圏-大気圏大規模相互作用実験)が大きな科学的成果を挙げた。例えば、従来の仮説では、森林伐採の影響を除く天然の熱帯林においては大気からの二酸化炭素吸収量と森林からの二酸化炭素放出量はほぼ同じ(平衡)状態になっているのではないかと予想されたが、実際には、エルニーニョ等の気候変動の影響を受け、特に 2005 年や 2010 年には強い乾燥が起こり、樹木の大量枯死に続いて大気への二酸化炭素放出量が大幅に増加するなど、大気と生態系間の二酸化炭素交換は予想以上にダイナミックに変動していることがわかった。このほか、森林火災やエアロゾル生成過程を含む森林-大気間フィードバックの研究、社会システムや森林管理の変革と持続的資源利用など、多岐にわたる新しい研究が数多く生まれた²²⁾。しかし、同時にいくつかの疑問も示された。研究が多岐に発展するのは成功の証であり、実際に成果を挙げた個別研究の数も多いが、当初設定された課題は本当に解決したのか? 熱帯林で、広域炭素収支・水収支の観測精度は格段に向上し十分に検証されたのか? 植物の生理生態プロセス、大気境界層の物理プロセス、エアロゾル生成等の大気化学プロセス、そして降水プロセスは、本当に一連の現象として捉えられ、そこから新たに重大な発見があったのか? こうした疑問は、その後も iLEAPS 特有の課題として議論され続けることになる。

第 3 回 iLEAPS 国際会議は、2011 年 9 月、ドイ

ツ・ガルミッシュパルテンキルヒェンにて開催された。この頃までに、各種生態系での BVOCs (Biogenic Volatile Organic Compounds: 生物起源揮発性有機化合物)の交換・輸送過程に関する観測技術が進展し、特に熱帯生態系起源の BVOCs の役割がエアロゾル前駆物質としても重要視され、実態解明に多くの研究者が取り組むようになっていた²³⁾。一方、BAHC 時代から継続して推進されてきた世界各地の生態系における熱・水・二酸化炭素フラックス観測は、世界に数百点もの観測点を抱えるネットワーク (FLUXNET) に拡大し、そのデータベースは全球炭素循環や全球蒸発散量の評価に重要な研究²⁴⁾に成長させると同時に、陸域プロセスモデルの検証にも利用され、モデルを用いた気候変化や土地利用変化の影響評価研究(図 3)²⁵⁾を発展させた。こうした中、2010 年頃までに、Pavel Kabat と、Meinrat Andreae に替わって共同議長に就任したフィンランド・ヘルシンキ大学の Markku Kulmala と米国・ワシントン州立大学の Alex Guenther らは、さらに長い時間スケールでの生態系の応答を理解するために、FLUXNET のような世界規模の観測点ネットワークを基盤としつつ、世界のいくつもの重要な生態系において、生物・物理・化学的手法による研究を複合的に重ね、長期的にモニタリングする観測点を整備することが重要であると提唱するようになっていた(図 4)^{26) - 28)}。アマゾン川流域で実施された LBA の頃に呈された個々の疑問が解決されたわけではないが、世界各地の観測点が協力して、気候変化に伴う生態系の複合的な応答を長い時間スケールで観測すべきという考え方が定着し、その一部は、米国の National Ecological Observation Network (NEON)、欧州の Integrated Carbon Observation System (ICOS) の開始にも生かされていると考えられる。

最後に、第 4 回 iLEAPS 国際会議は、2014 年 5 月、中国・南京市にて開催された。会議のテーマは、“Terrestrial Ecosystems, Atmosphere, and People in the Earth System”である。この頃までに、iLEAPS SSC の現在の共同議長 Alex Guenther とスウェーデン・ストックホルム大学の Hans-Christen Hansson のリードにより、iLEAPS が Future Earth や Global Sustainability Studies にどのように貢献できるかについて何度も議論が重ねられた。例えば、これまでの欧米中心だった科学研究を真に地球規模の活動に拡大するための取組についても意見交換が行われ、アジアやアフリカにも向けて研究コミュニティを強化しようという努力が続けられている。これまで長く欧州に IPO (International Project Office: 国際事務局)を置いて活動してきた iLEAPS が、2015 年 1 月より中国の南京大学に IPO を移設することを決定したのも、こうした背景が関与していると思われる。真に地球規模の科学研究をどこまで育成できるか、アジアから持続可能な社会のための研究をどこまで

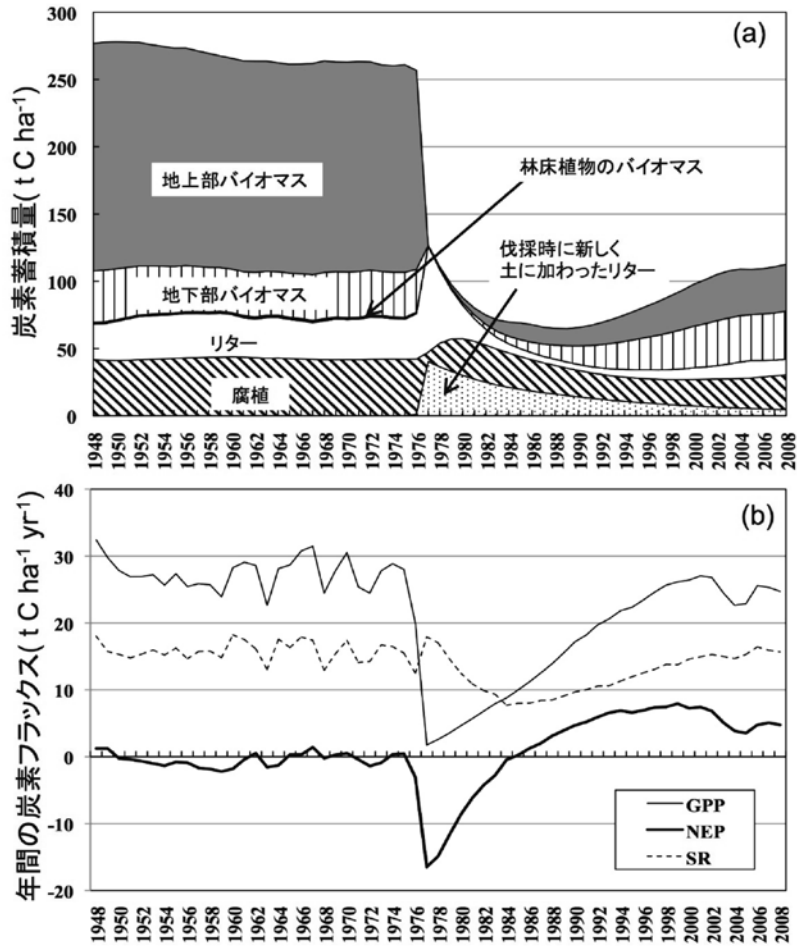


図3 熱帯雨林を伐採してアブラヤシを植栽した場合の(a)炭素ストック、および(b)炭素フラックスの経年変化。GPPは Gross Primary Production(総一次生産量)、NEPは Net Ecosystem Production(純生態系生産量)、SRは Soil Respiration(土壌呼吸量)である。これらは陸域生態系モデルを使った計算結果である。(Adachi ほか²⁵⁾の Fig. 7を引用、一部改変。)

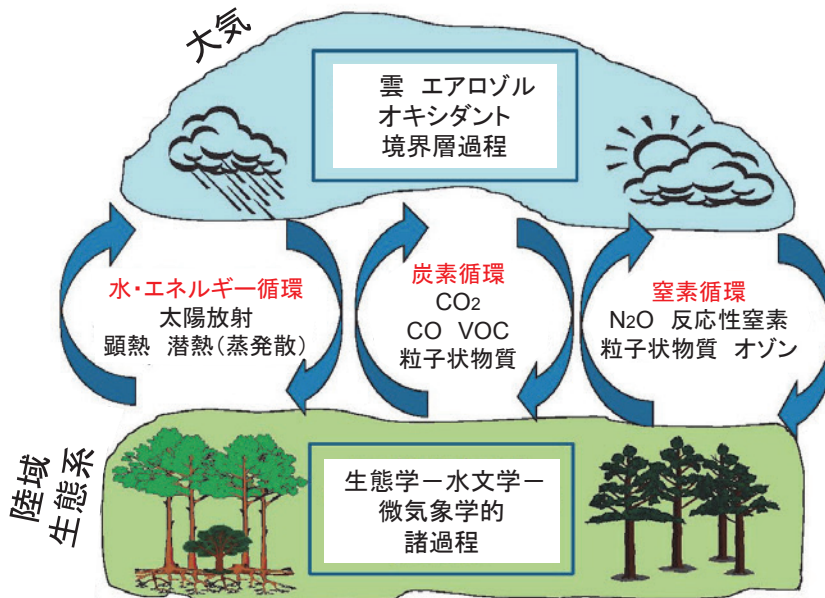


図4 陸域-大気相互作用と階層的観測ネットワークの概念図。(Guenther ほか²⁷⁾の Fig. 1を改変。)

先導できるか、iLEAPSのIPOをアジアに移設したこと自体が大きな実験であるとも言えるかもしれない。

このように、我が国を含むアジア域のiLEAPSコミュニティには、これまで以上に大きな期待と成果が求められている。これまでの我が国のiLEAPS諸活動は、関連コミュニティの協力と連携によって着実に、堅実に実施されてきたと言えるが、今後はヨーロッパ主導の意識から脱却し、日中韓が連携してアジア主導のiLEAPSに移行していく必要がある。幸い、この機運を世に示すかのように、日本土壤肥料学会の英文誌 *Soil Science and Plant Nutrition: SSPN* に、“Soil and plant aspects in the Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Processes Study(iLEAPS)”と題した特集号(スペシャルセクション)が企画され、本年2月に出版された²⁹⁾。この特集号にはアジアを含む我が国のiLEAPSのアクティビティが9本の論文として掲載されている。それらは、主に土壌-植生系の温室効果ガスフラックスと陸面モデルに関する論文群であり、耕作地における土壌-植生系におけるCH₄やN₂O放出に関するレビュー³⁰⁾、DGVMを含む最近の陸面モデルの現状と将来展望に関するレビュー³¹⁾の他、モンゴル・草原地帯における総一次生産量と生態系呼吸量の観測結果とそのモデル化についての論文³²⁾等が掲載されている。是非一度ご覧頂きたい。

4. Future Earth 時代の iLEAPS 研究と今後の展望

Future Earth は、地球環境問題の解決を目指して、自然科学者と人文・社会学者間の学際研究(interdisciplinary research)を推進するとともに、研究者とさまざまなステークホルダー間の超学際研究(transdisciplinary research)を推奨している。iLEAPSのイニシアティブ(表3)のうち、2), 3), 7), 8)は、Future Earthが目指す学際研究・超学際研究に沿ったものである。これらは「社会のための科学」を実践するものであり、文字通り、社会からの要請に応えるためのiLEAPSの目玉である。一方、本論の副題にある「陸域-大気相互作用研究」が関わるのは、6)iLEAPSとGEWEX間の陸域-大気モデリングに関する共同研究のみである。このイニシアティブは「科学のための科学」に立脚したテーマであり、直接的に「社会のための科学」を目指していない。実は、筆者らは「社会のための科学」を今後推進すべきと考えながらも、「科学のための科学」の要素は研究の基本であるとも考えている。すなわち、「陸域-大気相互作用研究」がすでにその役目を終えたとは考えておらず、益々重要な研究になってくると考えている。Future Earthへの参画を表明しているiLEAPSは、「社会のための科学」をさまざまなステークホルダーと共に計画(co-design)・実践

(co-production)しつつ、「科学のための科学」を包含した枠組みで推進されるべきものなのである。

我が国では、大学共同利用機関法人人間文化研究機構 総合地球環境学研究所(略称:地球研)が地球環境問題の解決に資する学際研究・超学際研究を展開している。これまでに終了した25の研究プロジェクトのうち、研究計画策定段階でiLEAPSが大きく関わった研究プロジェクトは無いものの、黄河プロジェクト(正式名称:近年の黄河の急激な水循環変化とその意味するもの)やシベリアプロジェクト(正式名称:温暖化するシベリアの自然と人-水環境をはじめとする陸域生態系変化への社会の適応)など、BAHCやiLEAPSに密接に関わるものは多い。黄河プロジェクトは、黄河の河川水が1990年代に下流や河口域に達しなくなった現象(黄河断流)の原因解明とともに、その渤海湾への生態学的影響を調査したプロジェクトである。またシベリアプロジェクトは、温暖化が顕著に進行している東シベリアの水循環変化(降水量、融雪時期、河川・湖沼の凍結融解時期の変化)が永久凍土と陸域生態系の変化を介し、どのようにトナカイ牛馬飼育や野生動物の狩猟などの生業に影響を与え、人々がそれらの変化にどのように適応しているのか、そして今後の適応策はどうあるべきについて検討したものである。両プロジェクトとも最終ゴールは問題解決型の政策提言に向けた研究(設計科学)であったものの、問題発見型の研究(認識科学)としての「陸域-大気相互作用研究」が包含されたプロジェクトであった。

さて、表3に示したiLEAPSの研究課題にいわゆる水文学的研究はほとんど無い。今後のiLEAPSは、BAHCが実施した水循環研究の推進を引き継ぐと同時に、シベリアプロジェクトのような学際研究をさらに発展させ、気候変動による水循環変動とそれによる人類への影響を見極め、適応策の策定に貢献する研究を推進すべきである。今後、iLEAPSがFuture Earthに貢献する活動を展開するには、大気化学的な物質循環研究とともに、25年前にBAHCが目指した陸域水循環研究を発展させる必要がある。そして、気候変動による水循環・物質循環の変動の定量評価とともに、緩和策や適応策の策定に貢献するような学際・超学際研究を推進すべきである。

5. おわりに

上述のように、iLEAPSのIPOは、2015年1月、フィンランドのヘルシンキ大学から中国の南京大学に移った。今後のIPOの牽引と活動にご期待頂きたい。また、iLEAPSの詳細についてはiLEAPSホームページ(<http://www.ileaps.org/>)をご参照頂きたい。

我が国では、日本学術会議に設置されたiLEAPS小委員会^{注1)}を司令塔として、国立研究開発法人農業環境技術研究所と国立研究開発法人国立環境研究所

をはじめとする研究機関の人材と機能を活用しながら、名古屋大学宇宙地球環境研究所^{注2)}で事務局機能を担っていく予定である。今後益々、我が国を含むアジアでのiLEAPS諸活動が広く深く展開できるよう、努力していきたい。関係各位には、ご協力とご鞭撻を頂戴できれば幸いである。

謝 辞

我が国のBAHC研究を牽引された筑波大学名誉教授の榎根 勇先生、総合地球環境学研究所名誉教授の福嶋義宏先生に感謝申し上げます。日本土壌肥科学会の英文誌(SSPN 誌)のiLEAPS特集号では、国立研究開発法人 農業環境技術研究所 物質循環研究領域の林 健太郎主任研究員に大変お世話になりました。また図3は、東京大学生産技術研究所の安立美奈子博士にご提供頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

注

注1) 日本学術会議 環境学委員会・地球惑星科学委員会 合同IGBP・WCRP・DIVERSITAS(An International Programme of Biodiversity Science: 生物多様性科学国際共同研究計画)合同分科会iLEAPS小委員会

注2) 名古屋大学の太陽地球環境研究所、地球水循環研究センター、年代測定総合研究センターが統合し、2015年10月1日に発足した新しい附置研究所。基盤研究部門の他に、国際連携研究センター、統合データサイエンスセンター、飛翔体観測推進センターがある。このうち国際連携研究センターは、今後のiLEAPS国内事務局を担う。

引用文献

- 1) Hutjes, R. W. A., P. Kabat, S. W. Running, W. J. Shuttleworth, C. Field, B. Bass, M. A. F. da Silva Dias, R. Avissar, A. Becker, M. Claussen, A. J. Dolman, R. A. Feddes, M. Fosberg, Y. Fukushima, J. H. C. Gash, L. Guenni, H. Hoff, P. G. Jarvis, I. Kayane, A. N. Krenke, C. Liu, M. Meybeck, C. A. Nobre, L. Oyebande, A. Pitman, R. A. Pielke Sr., M. Raupach, B. Saugier, E. D. Schulze, P. J. Sellers, J. D. Tenhunen, R. Valentini, R. L. Victoria and C. J. Vorosmarty (1998) Biospheric aspects of the hydrological cycle. *Journal of Hydrology*, 212-213, 1-21.
- 2) Becker, A. (1995) Foreword. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73, 147-149.
- 3) Kayane, I. (1996) Preface. *Proceedings of IGBP/BAHC-LUCC Joint Inter-Core Projects Symposium on Interactions between the Hydrological Cycle and Land Use/Cover*, November 4-7, 1996, Kyoto, Japan, 239p.

- 4) Sellers, P. J., F. G. Hall, G. Asrar, D. E. Strebel and R. E. Murphy (1992) An overview of the First International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Field Experiment (FIFE). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97, D17, 18,345-18,371.
- 5) Andre, J.-C., J.-P. Goutorbe and A. Perrier (1986) HAPEX-MOBLIHY: A hydrologic atmospheric experiment for the study of water budget and evaporation flux at the climatic scale. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67, 138-144.
- 6) Goutorbe, J.-P., T. Lebel, A. Tinga, P. Bessemoulin, J. Brouwer, A. J. Dolman, E. T. Engman, J. H. C. Gash, M. Hoepffner, P. Kabat, Y. H. Kerr, B. Monteny, S. Prince, F. Said, P. Sellers and J. S. Wallace (1994) HAPEX-Sahel: a large-scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Annales of Geophysicae*, 12, 53-64.
- 7) Prince, S. D., Y. H. Kerr, J.-P. Goutorbe, T. Lebel, A. Tinga, P. Bessemoulin, J. Brouwer, A. J. Dolman, E. T. Engman, J. H. C. Gash, M. Hoepffner, P. Kabat, B. Monteny, F. Said, P. Sellers and J. Wallace (1995) Geographical, biological and remote sensing aspects of the hydrologic atmospheric pilot experiment in the Sahel (HAPEX-Sahel). *Remote Sensing of Environment*, 51, 215-234.
- 8) Sellers, P. J., F. Hall, H. Margolis, B. Kelly, D. Baldocchi, G. den Hartog, J. Cihlar, M. G. Ryan, B. Goodison, P. Crill, K. J. Ranson, D. Lettenmaier and D. E. Wickland (1995) The Boreal ecosystem-atmosphere study (BOREAS): an overview and early results from the 1994 field year. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76, 1549-1577.
- 9) Halldin, S., S.-E. Gryning, L. Gottschalk, A. Jochum, L.-C. Lundin and A. A. Van de Griend (1999) Energy, water and carbon exchange in a boreal forest landscape - NOPEX experiences. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99, 5-29.
- 10) Halldin, S., S.-E. Gryning and C. R. Lloyd (2001) Land-surface/atmosphere exchange in high-latitude landscapes. *Theoretical and Applied Climatology*, 70, 1-3.
- 11) 檜山哲哉 (1996) 講座「蒸発散」IV. 広域蒸発散の推定法(1). ハイドロロジー(日本水文学会誌), 26, 195-207.
- 12) Hiyama, T., M. Sugita and I. Kayane (1995) Variability of surface fluxes within a complex area observed during TABLE 92. *Agricultural and Forest Meteorology*, 73, 189-207.
- 13) Hiyama, T., M. Sugita and K. Kotoda (1996) Regional roughness parameters and momentum fluxes over a complex area. *Journal of Applied Meteorology*, 35,

- 2179-2190.
- 14) Sugita, M., I. Kayane and T. Hiyama (1993) IGBP/BAHC field experiment to address scale problems in land-surface parameterization. *IAHS Publication*, No.212, 389-396.
 - 15) Sugita, M., T. Hiyama and I. Kayane (1997) How regional are the regional fluxes obtained from lower atmospheric boundary layer data? *Water Resources Research*, 33, 1437-1445.
 - 16) Pitman, A. J. (2003) The evolution of, and revolution in, land surface schemes designed for climate models. *International Journal of Climatology*, 23, 479-510.
 - 17) 伊藤昭彦・市井和仁・田中克典・佐藤 永・江守正多・及川武久(2004)地球システムモデルで用いられる陸域モデル：研究の現状と課題. *天気*, 51, 227-239.
 - 18) 佐藤 永(2008)生物地球化学モデルの現状と未来－静的モデルから動的モデルへの展開. *日本生態学会誌*, 58, 11-21.
 - 19) Baldocchi, D., E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, P. Anthoni, Ch. Bernhofer, K. Davis, R. Evans, J. Fuentes, A. Goldstein, G. Katul, B. Law, X. Lee, Y. Malhi, T. Meyers, W. Munger, W. Oechel, K. T. Paw, K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson and S. Wofsy (2001) FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 2415-2434.
 - 20) Reissell, A. ed. (2006) Boulder, CO, January 2006, 1st iLEAPS science conference, iLEAPS specialist workshop on flux measurements in difficult conditions, *iLEAPS Newsletter*, 2, 36pp.
 - 21) 萬 和明・山崎 大・吉田龍平・新田友子・Yadu Pokhrel・辻本久美子・平林由希子・田中賢治・檜山哲哉(2010) GEWEX/iLEAPS 合同国際会議参加報告. *水文・水資源学会誌*, 23, 83-91.
 - 22) Keller M., M. Bustamante, J. Gash and P. S. Dias eds. (2013) *Amazonia and Global Change, Geophysical Monograph Series*, 565 pp., (Online) ISBN: 9781118670347. doi: 10.1029/GM186
 - 23) 安立美奈子(2011)iLEAPS(統合陸域生態系－大気プロセス研究計画)：第三回会議報告. *地球環境研究センターニュース*, 22, 2-3.
<<http://www.cger.nies.go.jp/cgernews/201112/253001.html>>
 - 24) Jung, M., M. Reichstein, P. Ciais, S. I. Seneviratne, J. Sheffield, M. Goulden, G. Bonan, A. Cescatti, J. Q. Chen, R. de Jeu, A. J. Dolman, W. Eugster, D. Gerten, D. Gianelle, N. Gobron, J. Heinke, J. Kimball, B. E. Law, L. Montagnani, Q. Z. Mu, B. Mueller, K. Oleson, D. Papale, A. D. Richardson, O. Roupsard, S. W. Running, E. Tomelleri, N. Viovy, U. Weber, C. Williams, E. Wood, S. Zaehle and K. Zhang (2010) Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 467, 951-954.
 - 25) Adachi, M., A. Ito, A. Ishida, W. R. Kadir, P. Ladpala and Y. Yamagata (2011) Carbon budget of tropical forests in Southeast Asia and the effects of deforestation: An approach using a process-based model and field measurements. *Biogeosciences*, 8, 2635-2647.
 - 26) Hari, P., M. O. Andreae, P. Kabat and M. Kulmala (2010) A comprehensive network of measuring stations to monitor climate change. *iLEAPS Newsletter*, 10, 26-27.
 - 27) Guenther, A., M. Kulmala, A. Turnipseed, J. Rinne, T. Suni and A. Reissell (2011) Land ecosystem-atmosphere observational networks. *iLEAPS Newsletter*, 11, 6-13.
<<http://www.ileaps.org/sites/ileaps.org/files/newsletters/nl11net.pdf>>
 - 28) Saigusa, N., H. Muraoka and K. N. Nasahara (2012) Cross-disciplinary research collaboration and training during integrated long-term environmental observations. *iLEAPS Newsletter*, 12, 18-20.
<http://www.ileaps.org/sites/ileaps.org/files/newsletters/NL12_5MB.pdf>
 - 29) Hiyama, T., N. Saigusa and K. Yagi (2015) Preface to the special section “Soil and plant aspects in the Integrated Land Ecosystem – Atmosphere Processes Study (iLEAPS).” *Soil Science and Plant Nutrition*, 61, 1.
 - 30) Hayashi, K., T. Tokida, M. Kajiura, Y. Yanai and M. Yano (2015) Cropland soil-plant systems control production and consumption of methane and nitrous oxide and their emissions to the atmosphere. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61, 2-33.
 - 31) Sato, H., A. Ito, A. Ito, T. Ise and E. Kato (2015) Current status and future of land surface models. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61, 34-47.
 - 32) Nakano, T. and M. Shinoda (2015) Modeling gross primary production and ecosystem respiration in a semiarid grassland of Mongolia. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61, 106-115.



檜山 哲哉／Tetsuya HIYAMA

名古屋大学宇宙地球環境研究所・教授。名古屋大学大気水圏科学研究所・助手、同地球水循環研究センター・助教授および准教授、総合地球環境学研究所・准教授、名古屋大学地球水循環研究センター・教授を経て、2015年10月から現職。専門は水文学、気候・気象学、地球環境学。主な著書に『新しい地球学－太陽-地球-生命圏相互作用系の変動学』（共編著、名古屋大学出版会）、『水の環境学－人との関わりから考える』（共編著、名古屋大学出版会）、『環境人間学と地域 シベリア－温暖化する極北の水環境と社会』（共編著、京都大学学術出版会）等がある。



八木 一行／Kazuyuki YAGI

農業環境技術研究所・研究コーディネータ。農業環境技術研究所・主任研究官、国際農林水産業研究センター・主任研究官を経て、2007年4月より農業環境技術研究所・上席研究員。2010年10月から現職。専門は土壌学、生物地球化学。主な著書に『土壌圏と大気圏－土壌生態系のガス代謝と地球環境』（分担執筆、朝倉書店）、『シリーズ21世紀の農学 地球温暖化問題への農学の挑戦』（分担執筆、養賢堂）等がある。



三枝 信子／Nobuko SAIGUSA

国立環境研究所地球環境研究センター・副センター長。筑波大学生物科学系・助手、通商産業省資源環境技術総合研究所・研究員および主任研究員、産業技術総合研究所・主任研究員を経て、2008年4月より国立環境研究所地球環境研究センター・陸域モニタリング推進室長。2013年4月から現職。専門は微気象学、陸域の生態学。主な著書に『陸域生態系の炭素動態－地球環境へのシステムアプローチ』（分担執筆、京都大学学術出版会）、『水環境の気象学－地表面の水収支・熱収支』（分担執筆、朝倉書店）等がある。