

地球一括計上

課題名	アジア陸域炭素循環観測のための長期生態系モニタリングとデータのネットワーク化促進に関する研究		
担当研究機関	独立行政法人森林総合研究所 独立行政法人農業環境技術研究所 独立行政法人産業技術総合研究所 独立行政法人国立環境研究所		
研究期間	平成19-23年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	151,696千円 (うち23年度 30,118千円)
研究体制	<p>(1) モニタリングサイトの整備と観測システムの標準化 (独立行政法人森林総合研究所、独立行政法人農業環境技術研究所、独立行政法人産業技術総合研究所、独立行政法人国立環境研究所)</p> <p>(2) 可搬型移動観測システムによるサイト間比較観測 (独立行政法人森林総合研究所、独立行政法人農業環境技術研究所、独立行政法人産業技術総合研究所、独立行政法人国立環境研究所)</p>		
研究概要	<p>1. 序 (研究背景等)</p> <p>地球温暖化問題は21世紀の重大な環境問題となっており、喫緊の対応と早急な対策が求められている。地球環境問題を解決するためには、大気・陸域・海洋などにおける包括的で統合された観測を長期的に推進する事が不可欠である。平成16年12月に総合科学技術会議がとりまとめた「地球観測の推進戦略」でも、我が国においてはアジア・オセアニア域を中心とする炭素循環観測等が必要である、と提言された。国際的には、京都議定書目標達成計画にも気候変動とその影響の総合的な観測体制の強化が盛り込まれるとともに、全球地球観測システム (GEOSS) の構築のための10ヶ年実施計画が採択されている。また、京都議定書第1約束期間が終了する2012年以降を対象とした地球温暖化対策の国際的枠組交渉も行われており、気候変動を抑制するための行動計画策定のためには、さらに多くの科学的知見の蓄積が必要である。平成20年3月には地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書第1号 (環境省・気象庁) が、平成22年3月には同第2号が出され、「データ標準化の促進」、「データ流通の促進」、「観測施設等の相互利用の促進」、「時空間的観測空白の改善および観測項目の充実」などの実現のために、機関間・分野間連携と長期継続観測の視点での取り組みの重要性が指摘されている。</p> <p>現在、陸域生態系機能の解明や衛星による広域推定技術開発などを目的とした観測研究の一環として、タワーフラックス観測による陸域生態系の炭素収支観測が行われている。日本国内ではフラックスの長期モニタリングを森林総合研究所、産業技術総合研究所、農業環境技術研究所、国立環境研究所および大学等が個別の予算や課題設定で観測を行い、既に11~18年分のデータが蓄積されている。アジア地域にも多数の観測サイトがあるが、これらについても観測の背景は国内と変わらない。アジア地域では1999年にタワーフラックス観測を束ねるネットワーク (AsiaFlux) が活動を開始し、観測のサポートやデータ共有化が進められつつある。しかし、観測を広範にサポートする共通の予算的背景を持たないため、観測システムや解析の標準化、相互比較によるデータ信頼性の検証は十分に行われておらず、データ共有も十分とは言えない。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>陸域炭素収支研究の中で、タワーフラックス観測で得られるCO₂収支は生態系スケールの時間~日~季節変動とその変動パターンの年々変化を明らかにすることが可能で、生態系機能モデル、陸域スケールアップモデル、衛星情報モデル等の改良・検証に使用される。本研究では、タワーフラックス観測のネットワーク化を推進する上で不可欠な、データの連続性・信頼性を確保するための仕組みを構築することを目的とする (図1)。これまでに比較的長期にわたる観測の実績のある独立行政法人が運営する国内8ヶ所のタワーフラックスサイト (図2) を、長期生態系モニタリングサイトとして位置付け、国内外からの科学的・社会的要請に対応する。さらに、アジア地域に有る3ヶ所のサイト (図3) で観測を継続する。これらの観測サイト群が持つ、生態系タイプ、気候、地形</p>		

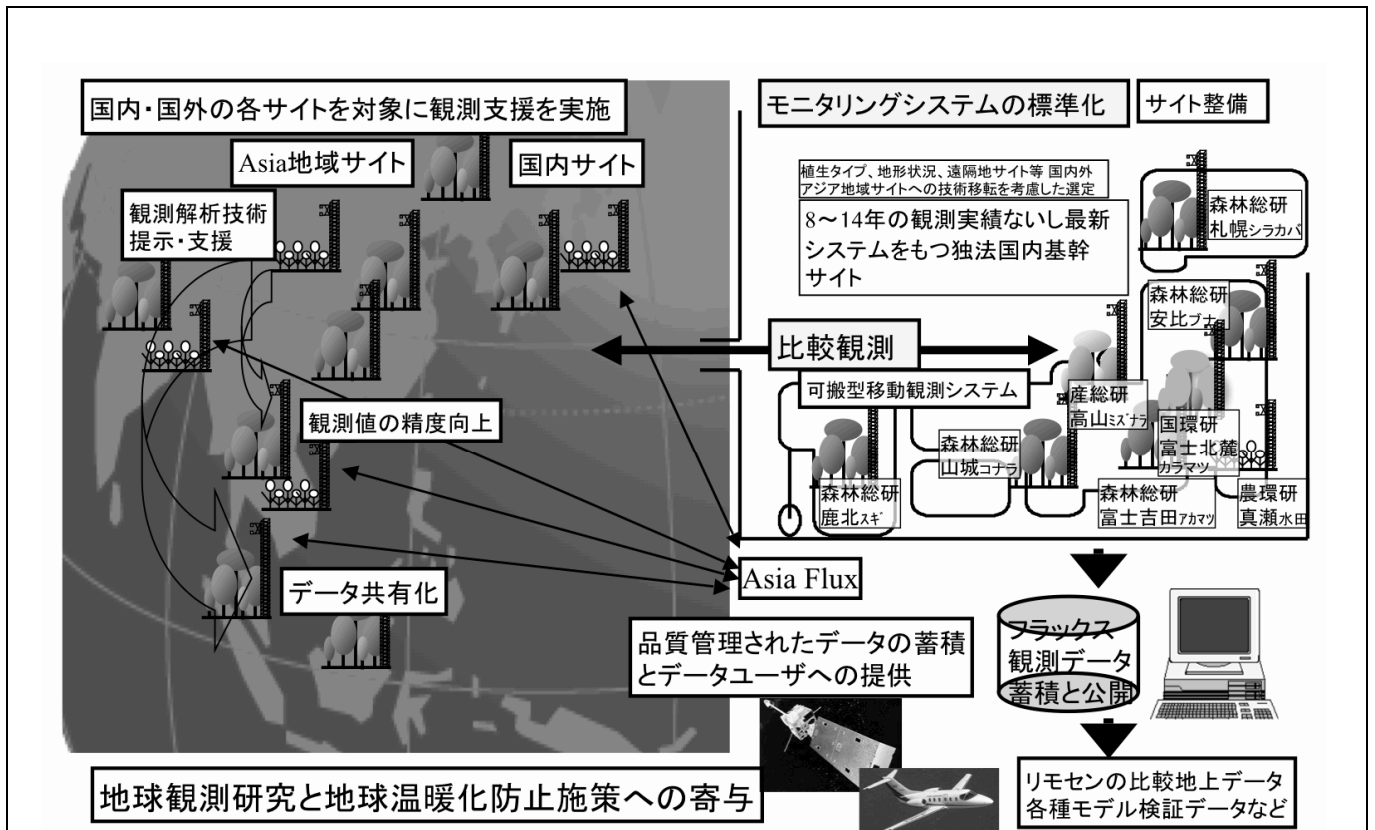


図 1 研究推進の概念図

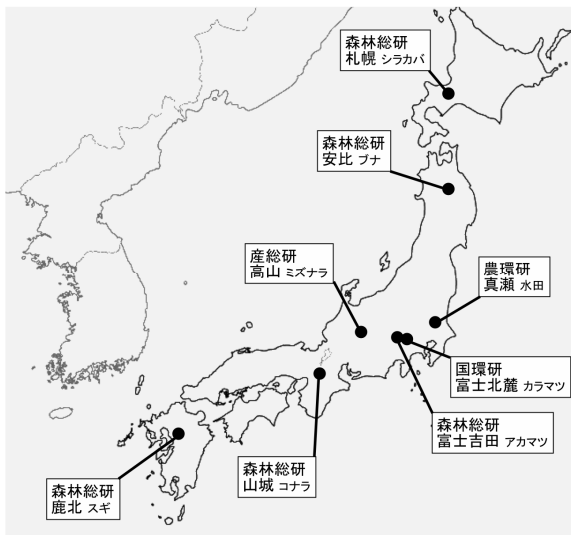


図 2 国内 8ヶ所の長期生態系モニタリングサイト

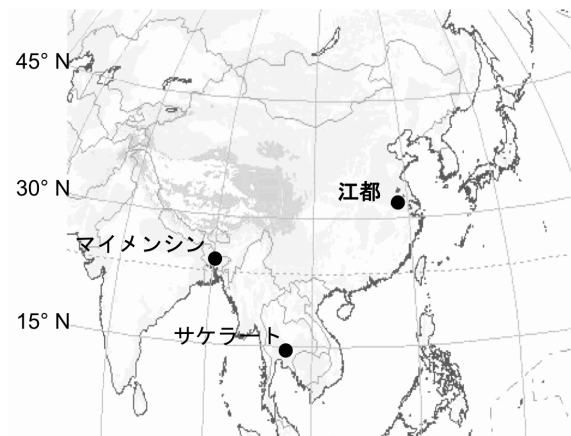


図 3 海外 3ヶ所の長期生態系モニタリングサイト

条件等の多様性に着目し、観測システムや解析方法の標準化などの技術開発とそのマニュアル整備を実施して、広くアジア地域に適用可能な頑健な観測システムを構築する。観測システムの標準化により欠測が少ない連続データを確保するとともに、観測サイト群として効率的で安定した長期モニタリング体制の確立を目指す。また、可搬型移動観測システムを用いた比較観測を国内やアジア域で行い、観測サイト群として一定の精度を確保するとともに、品質管理されたデータの蓄積とアジア地域からのデータ公開を促す。

以上の内容により、地球温暖化の抑制に貢献する施策の背景となる科学的根拠を得ることが可能で、国内外からの科学的、社会的要請に対応するとともに、その結果はアジア地域を中心とした我が国の国際的リーダーシップ確保につながる。

3. 研究の内容・成果

(1) モニタリングサイトの整備と観測システムの標準化

観測システムの標準化にフィードバックするために、国内外の各サイトの現況、観測方法、解析方法を再検討した。国内8ヶ所の長期生態系モニタリングサイトとアジア地域の3ヶ所の海外サイトの整備を進めて長期観測を継続し、データの蓄積とデータ公開を進めた。各サイトの現況をもとに、長期観測に必要な観測システムの検討を行った。また、新規観測サイトの立ち上げや観測体制の維持に寄与するため、観測マニュアルをホームページで公開するとともに、印刷物を配布した。

①：モニタリングサイトの整備

長期モニタリング体制の整備のために、各サイトのサイト情報、観測システムの現況、解析手順を整理した。違いの大きな点は、ガスアナライザの種類(オープンまたはクローズド)とデータロガーの種類に関係していた。研究機関ごとの使用機器の違いにより解析手順に違いは有るが、おおむね類似の解析が行われていた。

②：長期観測の継続

札幌：2007～2011年までの年間生態系純交換量 (NEE) は80～360gCm⁻²y⁻¹であった。2004年の台風による攪乱前後のCO₂吸収、放出量を比較すると、生態系総生産量 (GPP) は約10%減、生態系呼吸量 (RE) は1.5倍であった。結果的に、台風攪乱前の4年間の平均は-443gCm⁻²y⁻¹で札幌のサイトは炭素吸収源となっていたが、倒木など上層の樹木が減少、枯死木が急激に増大したことにより、炭素放出源となった。本研究期間の5年間では、2010年が最も炭素放出量が多かった。2010年は春季の気温が低かったことにより展葉開始時期が遅かったことから6月の吸収量が少なく年間炭素放出量が大きくなった原因の一つと考えられる。台風攪乱後の3年程度は、急激なササのバイオマスの増加が見られたが、下層木の成長が徐々に見られるようになっており、今後、再び炭素吸収源となるまでの期間を要するのか、長期的な観測が必要である。

安比：冷温帯落葉広葉樹林 (80年生ブナ二次林) において、タワー観測に基づいた乱流CO₂フラックスおよび気象要素の連続観測を継続した。2011年の年間NEEは、過去5年間の中で最も大きなCO₂吸収量を示した。各年 (2007～2011年) のNEEは、-88、-280、-212、-380gCm⁻²y⁻¹であった。2007年は虫害の影響で、2010年は夏期の高温の影響でCO₂吸収量が減少した。2011年の成長期の長さは155日で、これは2010年と並んで最も短く、またこの期間の平均気温 (15.9℃) は2010年 (16.9℃) に次いで高かった。過去の観測 (2000～2006年) では、成長期の気温が高くなるとCO₂吸収量が少なくなるような傾向が得られていたが、2011年の結果はそれとは異なる傾向を示していた。

真瀬：水田としてはもっとも長期間にわたって観測が行われている茨城県南西部のイネ単作田で気象とフラックスの観測をさらに5年間継続し、NEEの年々変動を明らかにするとともに、作付期間のCO₂収支の年々変動の要因をほぼ把握した。一方、年間の2/3を占める休耕期間に顕在化するオープンパス型渦相関法固有の問題の解決にも取り組み、クローズドパス型渦相関法との比較や品質管理法の改良を行った。また、水田サイトに共通のデータ処理プログラムを開発し、各サイトのデータ処理に適用した。このプログラムは品質管理に特徴があり、生育期間に降雨頻度が高く、オープンパス型渦相関法を採用する場合が多いモンスーンアジアの農業生態系サイトへの普及が期待される。

富士吉田：冷温帯の常緑アカマツ二次性天然林にある富士吉田森林気象試験地において、2007～2011年にかけてフラックスと微気象観測を継続実施した。各年の正味二酸化炭素吸収量はそれぞれ446、331、436、516、443gCm⁻²y⁻¹であった。いずれの年も1～2月以外の月は二酸化炭素を吸収し、日吸収量の年間最大値は約5gCm⁻²であった。長雨等による吸収量の低下が6～9月に認められた。月積算NEEの年による違いは4月から9月に比較的大きかった。春・夏季・初秋季の気象条件の年々の違いがNEEの年々変動を引き起こす重要な要因であることが示唆される。観測の継続とともに、観測システムの老朽化等に伴う様々な不調に対処してポンプ、チューブ、配管部材やデータロガー、センサーなどを更新し観測体制の整備を継続的に図った。富士吉田サイトは、フラックスと気象条件を安定的に継続観測していることを踏まえたうえで、連携した様々な研究機関による近接リモートセンシングや大気中の二酸化炭素等の安定同位体比等の集中観測が実施され、森林炭素循環研究に関する共同利用プラットフォームとして活用されている。

富士北麓：落葉針葉樹林 (カラマツ林) において、CO₂/H₂Oのフラックス観測を継続実施した。観測されたNEEの基本的な季節変化パターンにはカラマツの生理的季節性の影響が強く反映されている。カラマツ展葉・落葉のタイミングは気温の違いにより大きく影響され、これによって生じる成長期間の変化は生態系のCO₂吸収量の年積算値に影響する。また、成長期のCO₂吸収量は短期的な日射量の変動に応答して変動する。富士北麓サイトでは観測値の一貫性を維持するために、多くの機

材についてセンサー交換による定期較正を行っている。また植物季節の観察のため、タワーにフェノロジー観察用カメラを設置し、カラマツの展葉・落葉に加え葉の色の変化を定量的に評価することを試みている。

高山：冷温帯落葉広葉樹林サイトにおいて、フラックス、気象、CO₂濃度鉛直分布、土壤環境、土壤呼吸、安定同位体、生物季節の観測を継続して行った。2011年は冬～春の気温が低く、梅雨入り、梅雨明けが早かったが、8月は天候不順で日射量が少なかった。春季の低温に伴う展葉の遅れにより、CO₂の正味の吸収が始まる時期が遅かった。また、8月の日射量が少なかったため、2007～2011年の他の年と比較して、2011年の8月の生態系純生産量（NEP）は最も小さかった。これらの影響のため、2011年の年積算NEPは、2007～2011年の間で2007年に次いで2番目に小さかった。以上の結果より、春季～夏季の気象条件の年々の違いが、高山サイトにおける年積算NEPの年々変動に対して、複雑に影響を及ぼしていることが分かった。フラックス観測機器に一部不具合があり、その影響を補正してフラックス値の計算を行ったが、長期に渡って良質のデータを得るには、情報通信技術を用いた観測システムのさらなる改良が必要である。

山城：暖温帯落葉広葉樹二次林においてCO₂フラックス、環境要素、林分動態の連続観測を行った。試験地のNEPは優占種である落葉広葉樹（コナラ）の特徴を大きく反映しており、NEPの増加は5月上旬の展葉期に急速に上昇し、気温ピークよりも早い7月上旬に吸収量のピークを迎えた。1994年からのバイオマス観測から、本試験地の森林は1980年代初頭のマツ枯れからの回復期にあることが明らかとなっており2000年からのフラックス観測でも光合成量ピーク値は徐々に大きくなり、NEPも120 gCm⁻²y⁻¹から170gCm⁻²y⁻¹に漸増していることが明らかとなった。季節変動では本試験地では夏季の高温と乾燥による光合成量の低下がNEPに大きな影響を与えており2010年夏は試験地付近が国内でも最も高い気温が観測されたために、2008-2009と比較すると20%程度低いNEPが測定された。

鹿北：九州北部のスギ・ヒノキ人工林でタワーフラックスおよび微気象観測を行いNEEのデータを取得した。2011年のNEEの季節変化は2007～2010年とほぼ同じ季節変化を示した。3月から4月にかけて森林へのCO₂吸収量が増加し、5月と梅雨期に吸収の減少が見られたが、季節を通しておおむねCO₂吸収側で推移した。降水による日射の減少や生態系呼吸量に影響する気温がNEEの季節変化の要因であると推察された。

江都(Jiangdu)：中国を代表するイネ・コムギ二毛作地帯である中国揚子江流域の水田で、気象とフラックスの観測を5年間継続し、NEEの日変化、季節変化、年々変動や、作期間のCO₂収支の差異を明らかにした。ほぼ1年間を通して作付される江都サイトの年積算NEE（CO₂吸収）は、5年間平均では単作田である真瀬サイトの3.4倍であり、その年々変動はきわめて小さいことが明らかになった。一方で、作物残渣の燃焼にともなう炭素流出の定量化や、残渣処理の違いがCO₂収支に及ぼす影響の解明、生態学的調査項目に関わるデータの収集は、今後の課題として残された。

マイメンシン(Mymensingh)：バングラデシュ北部のイネ二期作田で、気象とフラックスの観測を5年間継続し、休耕期間を含むNEEの日変化、季節変化および年々変動を明らかにした。南アジアの稲作地帯におけるフラックスの長期連続測定は本研究が世界で初めての試みであり、作物学的見地からも貴重なデータが得られた。ただし、2009、2010年は作付期間中に測器のトラブルによる長期間の欠測が生じ、海外サイトにおける測器のバックアップシステムの重要性が浮き彫りとなった。

サケラート(Sakaerat)：サケラート観測サイトでは、2012年3月現在、2012年3月までのデータが現地から回収されている。2011年は、過年度から行ってきた現地観測システムの改修が奏功し、今まで長期欠測を生じやすかった雨季に概ね連続したデータの取得をすることができ、生物活動が活発でかつ気候変動に伴う影響を受けやすいと思われるインドシナの雨季の炭素収支について議論する基礎になりうるデータ取得が可能になった。今後、大気捕集システムを含めた観測システム全体の連続遠隔監視や、異常を検出し警報を送信する仕組みなどの技術開発、現地機関と協力の強化に基づく次世代人材育成などを通じ、さらなる通年でのデータ取得率の向上と長期継続を図る。

③：観測システムの標準化

CO₂フラックスモニタリングサイト間でフラックスデータの相互比較を行うためには、測定方法や解析方法をできるだけ揃えることが望ましい。しかし実際には、サイト毎に測定対象や地形が異なるため、観測・解析システムに違いが生じている。観測システムの標準化を図るため、収録データの統一的な解析を可能にする共通データフォーマットを提案し、データ処理プログラムを整備した。

④：フラックス観測サイトで用いられる放射計の比較観測実験～世界基準に基づく統一的な較正体制を確立するための試み～

フラックス観測サイトで用いられる各種放射計の較正体制を整備することを目的として、国立環境研究所の屋上に各種放射計の相互比較観測を実施するためのシステムを整備した。全天日射計と

赤外放射計の基準器を信頼性の高いものに更新した。全天日射計については世界基準を保有するWMO世界放射センター(WRC)の下位データセンターである気象庁の測定基準と比較する体制とし、比較校正の方法はWMOの定める手順に準じるものとした。赤外放射計についてはWRCの世界基準器群と約半年間比較校正した機体を導入した。同時に、国立環境研究所から820mの距離にある気象庁・高層気象台から提供される短波及び長波放射の観測値もリファレンス値として随時比較することが可能となった。この校正システムを利用して平成22年9月に赤外放射計を中心とした比較観測実験を行った。比較校正体制を構築することで、フラックス観測コミュニティで集積される放射関連データに関して世界基準に対するトレーサビリティを確保するとともに、気象庁・高層気象台から提供される観測値をリファレンスとして利用することで長期的な精度管理を効率的に行う基盤が整備された。

⑤：観測マニュアル整備

H20年度に日本語版、H21年度に英語版マニュアルをホームページ上で公開し、その後も内容の充実を図り、H23年度に英語版を出版し、希望者及び関連機関に配布した。ホームページ上にcgiを組み込むことによって、アンケートを実施した。アンケート結果からフラックス観測に直接的に関わる気象学や水文学以外に、生態学、森林科学、地球化学、環境工学など幅広い研究分野の利用者がいることがわかった。また、アクセスログの解析から、アジア以外にもヨーロッパ、北中米などの地域からのアクセスがあり、想定以上に広範囲の国から関心が寄せられていることがわかった。

⑥：観測データの共有

GEOSSの10年実施計画が採択され、その中でデータ共有の促進についての主要原則が定められている。各独法機関においてもこのようなポリシーに基づきデータ公開を進めている。しかしながら、機関や観測サイトごとにデータ公開の状況は様々である。公開の基準はデータ保有機関が個別に決定する事項であるが、公開可能なデータから早期の公開めざし、プロジェクト内サイトも次第に公開が進んでいる。また、プロジェクト内の多くのサイトはAsiaFluxおよびJaLTER登録され、分野間連携もなされている。

(2) 可搬型移動観測システムによるサイト間比較観測

フラックス観測のネットワークを生かした研究の可能性を最大限に活用するためには、サイト間の観測データの互換性を確保していく必要がある。一方で、あらゆる観測サイトに最適な一つの観測方法やシステムは存在し得えず、サイト毎に最適化された様々な観測手法が実際には用いられている。

このようなタワーフラックス観測フラックスデータの精度向上とアジア地域でのデータ流通の促進と共有を図るため、可搬型の渦相関法CO₂フラックス観測システム（ポータブルフラックスシステム）を様々な森林4カ所及び水田1ヶ所の観測サイト計5カ所に持ち込んで延べ6回のフラックス観測を行い、各サイトの経常観測によるCO₂フラックス速報値と比較した。このポータブルフラックスシステムはクロズドパス式の赤外線ガス分析計、超音波風速計、データロガーなどの機器から構成されるものである。

比較観測の結果から、4サイトの経常観測システムで測定されたCO₂フラックスを妥当と判断した。それらは、ポータブルフラックスシステムの30分平均フラックス観測値に対して、誤差の二乗平均平方根が $2.6\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以下、相対誤差が23.4%以下であった。この誤差範囲は、既往のフラックス観測精度評価として報告されているランダム誤差の範囲に含まれるものであった。また、比較観測データの比較解析によって、経常観測における問題点を指摘するとともにその改善策を提起した。

さらに、はじめてフラックス観測に携わる学生、研究者、技術者でも取り扱いができるように工夫したポータブルフラックス観測システム使用マニュアルを作成し、印刷物と共にホームページ上でも公開した。

4. 考察

観測の中核となる国内8サイトおよびアジア地域の3サイトの長期生態系モニタリングサイトで、長期観測のためのシステム整備を進めた。国内サイトについては長期観測の実績とシステム整備の結果により品質管理された連続データの蓄積が進んでおり、観測サイト群としてより効率的な運営を目指している。各サイトの観測システムには違いがあるが、サイトごとの違いを吸収して観測システムの標準化を目指すことは、サイト群として効率的で安定した観測体制につながる。アジア地域のサイトについては研究協力先との連携や機器の維持管理などが十分ではなく、データの精度や連続性に改善すべき点がある。国内の観測で蓄積したノウハウとICT技術の活用などによりシステムの改善が成されつつ有るが、精度の高い長期モニタリングを継続するためにはカウンターパート

の育成などの課題を克服する必要がある。

国内だけでなく、アジア地域でも長期モニタリングサイトの運営を行うことは、アジアにおける観測空白域での観測の動機付けにも繋がる。観測サイトの立ち上げに必要な様々なノウハウは観測マニュアルやシステムの標準化（機器構成や解析プログラム）の取り組みなどを通して蓄積が進んでおり、技術的な支援体制は可能となっている。ポータブルシステムの運用とシステムマニュアルの整備が進んだ事により、今後より多くのサイトで比較観測を行って観測精度の検証と観測技術の移転が可能となった。この点についてはアジア地域全体としてのネットワーク強化に資するため、AsiaFlux との連携を強化して対応する必要がある。

一方で、蓄積されているデータの公開は進みつつ有り、本研究に参画サイトのデータは様々なデータベースにおいて公開されてきた。各サイトとも計画的な早期公開を目指して作業を進めている。

本研究の目的である微気象学的手法によるアジア陸域の炭素収支観測における「標準化」、「比較観測」、「データ共有」、「観測空白の改善」、「観測項目の充実」などは、地球温暖化観測推進ワーキンググループの報告（平成20年，22年）とも目的が共通する。プロジェクト参画サイトの多くがAsiaFluxやJaLTERの登録サイトとなっており、生態学・リモートセンシング分野を中心として長期継続観測の視点に立って、機関間・分野間の連携を強化しつつ有る。アジア地域全体で他分野とデータ共有が進めば、地球温暖化観測研究の推進につながる。