

			地球一括計上
課題名	センサーネットワーク化と自動解析化による陸域生態系の炭素循環変動把握の精緻化に関する研究		
担当研究機関	農林水産省林野庁 国立研究開発法人森林総合研究所 農林水産省 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 経済産業省 国立研究開発法人産業技術総合研究所 環境省 国立研究開発法人国立環境研究所		
研究期間	平成24-28年度	合計予算額 (当初予算額 ベース)	112,175千円 (うち28年度 17,167千円)
研究体制	<p>(1) センサーネットワークによる高精度観測システムの構築 (国立研究開発法人森林総合研究所、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立研究開発法人国立環境研究所)</p> <p>(2) 効率的なデータ共有のための自動化技術の開発 (国立研究開発法人森林総合研究所、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立研究開発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、正確な観測データによる的確な影響評価や、緩和・適応策の策定のためにも、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。京都議定書目標達成計画には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、平成15年には全球地球観測システム (GEOSS) の構築のための10ヶ年実施計画が提唱された。このような国際協力計画を受けて我が国では平成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」が答申された。その中で、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の必要性が提言された。今後も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。このような背景のもとで実施されてきたGEOSS 10年実施計画も終了し、国内ではデータ統合・解析システムDIASなどを中心に地球観測データの一元的な集約と統合が進み、その利用のための実用的な運用も実施されつつある。一方で、平成27年にCOP21において採択されたパリ協定や、閣議決定された「気候変動の影響への適応計画」では、気候変動及びその影響の観測・監視、予測その他の調査研究を継続的に行い、さらに科学的知見を集積していく必要が示されている。</p> <p>陸域生態系に関係する分野では、二酸化炭素と生態系の複合的モニタリング、気候予測に対して不確実性の高いプロセスの長期継続的観測の必要性などが示されている。特に、森林や農耕地は炭素の吸収源や貯留源として温室効果ガス削減策の一つとなり、REDD+とも関連して注目されている。このように陸域生態系での地上観測は地球観測の中で重要な位置づけがなされており、フラックス観測もその一つとして体系的な運用が求められる。地上観測拠点での精度の高い観測システムの構築と、観測からデータ流通までを効率良く行うためのシステム開発を推進することは、観測項目の充実、データ品質の確保、観測の継続と一貫性、データ・情報の流通促進といった地球観測の推進戦略の目標と合致する。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>森林、農耕地、草地などの陸域生態系の炭素吸収量を把握することは重要である。陸域生態系の中に炭素循環観測拠点 (炭素移動量観測塔を有する観測地点) を設けることによる炭素収支のモニタリングは、アメリカやヨーロッパ地域を中心に多くの観測サイトで行われている。アジア地域でも様々な陸域生態系の中に観測サイトが作られ炭素収支の観測が行われているが、欧米ほどの観測密度ではない。多様な陸域生態系を有するとともに、人為活動や地形の影響を受けて生態系が断片化しやすいアジア地</p>		

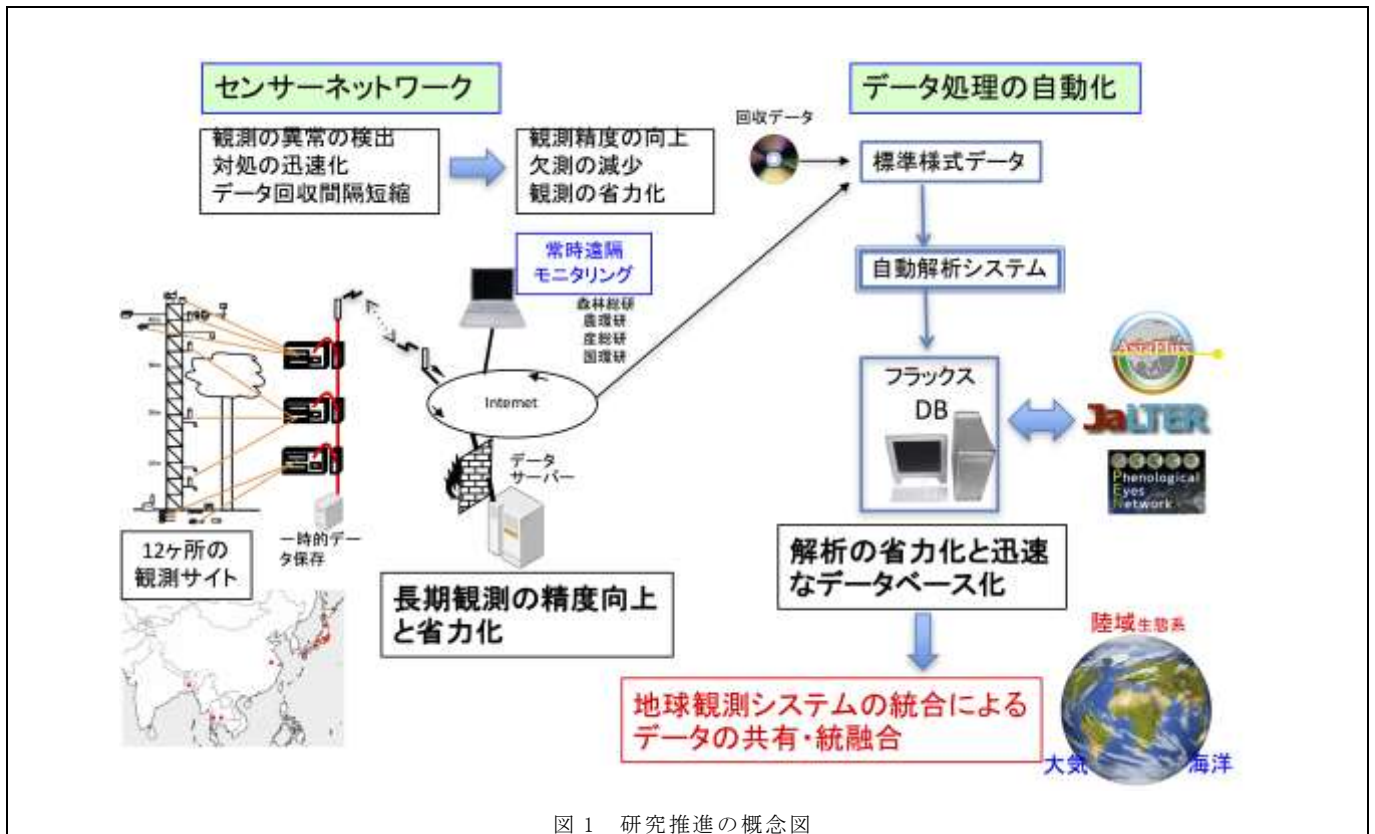


図1 研究推進の概念図

域においては、さらに多くの観測拠点が求められている。気候変動の影響を受けながら変化し続ける生態系の炭素循環は不確実性が大きいいため、様々な変動の影響を明らかにするには長期にわたるモニタリングが重要である。本研究を行う4国立研究開発法人は、森林および農耕地におけるフラックス観測を国内外のサイトで1990年代から実施してきた。観測サイト間の連携を強化しながら長期観測を行う事により、精度の高い観測にもとづいたデータ共有が促進され、データベース構築によるデータ公開・流通も進んだ。一方で、長期観測を精度良く維持するためには観測からデータ公開までの効率的（経費、人的）な運用体制の確立が急務で、観測自体を遠隔モニタリングすることによりシステムの省力化とデータベースによるデータ共有・流通のための解析の自動化が課題となってきた。

本課題では、ICT技術を活用したセンサーネットワークを構築することにより測定と監視を省力化し、観測からデータ共有・流通までを迅速に行う方法を開発する。これにより、長期継続的なタワー観測等による陸域生態系における炭素循環変動の把握を精緻化することを目的とする（図1）。

3. 研究の内容・成果

(1) センサーネットワークによる高精度観測システムの構築

本課題の開始された平成24年に4研究機関が長期観測中の12サイト（図2）で、インターネット回線（WAN）を用いてセンサーネットワーク化を目指した。この内、江都サイトは相手国側の都合により観測の継続が困難となり、11サイトが観測を継続している。各サイトは確保できる通信回線に差はあるものの、観測サイトとそれぞれの研究拠点が接続されて遠隔モニタリングの体制が確立した。常時モニタリングすることで欠測を減らし観測精度を向上させるとともに、観測の省力化につながった。多くのデータは常時取得可能となり、観測～解析～データ共有までを連携して進めた。センサーネットワークの利点を生かしてさらに効率的な運用を行うためには、研究協力者が必要である。特に海外を中心とした遠隔サイトでは、研究拠点でデータをモニタリングしている研究者と連携して的確な現場作業を担う協力者を育成した。

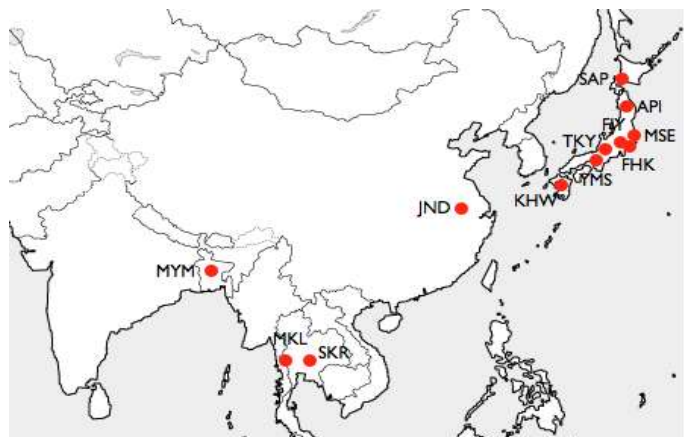


図2 国内8ヶ所と海外4ヶ所の観測サイト

①産業技術総合研究所のセンサーネットワーク化

産総研は、岐阜県高山（TKY）とタイ・サケラート（SKR）、タイ・メクロン（MKL）の、国内外合わせて3か所の観測サイトにそれぞれ設置された高さ25-40mの観測塔において、渦相関法による大気中CO₂のフラックスおよび土壌呼吸量や関連する気象、放射、土壌パラメータ等、40以上の観測項目の無人長期連続観測を継続して実施した。センサーネットワーク化については、それぞれの観測サイト構内、およびつくばの産総研事業所までの通信インフラを整備し、このインフラ上で、データ回収から現地観測機器の遠隔監視と障害検知、一般気象およびフラックス観測データの準実時間処理に至るプロセスを自動で行うシステムを構築した。これを運用したことにより、データ処理の効率化のみならず、特にタイの観測サイトにおいて、現地訪問による定期保守作業を増やすことなく長期欠測を低減し、データ取得率（観測の稼働時間率）を本課題開始以前に比べ大幅に向上させることができた（図3）。

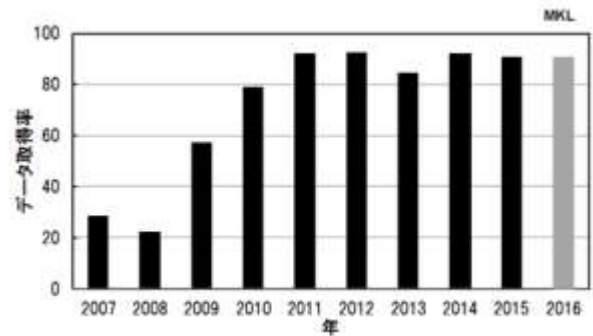


図3 フラックス観測の年間データ取得率の推移

②農業・食品産業技術総合研究機構（農研機構）農業環境変動研究センターのセンサーネットワーク化

農研機構農業環境変動研究センターでは、2009年以降、茨城県つくば市真瀬（MSE）とバングラデシュのマイメンシン（MYM）の水田フラックスモニタリングサイトのセンサーネットワーク化を進め、2013年度までに、センサーネットワークを構成するフラックス監視・予測システム、観測サイト用ポータルサイト、衛星-地上観測データ管理システム（SGEMS）の3つの基本システム群が完成し、両観測サイトのほぼすべての測定データをリアルタイムに収集できるようになった。2014年度以降は、3つのシステムの運用を継続しつつ、取得データの処理や分析を進めた。真瀬、マイメンシンの両サイトのCO₂フラックスの時系列データは、それぞれイネ単作、二期作に対応するCO₂吸収のピークやその年々変動が観測された。センサーネットワーク化により、両サイトのメンテナンス性は大きく向上した。真瀬では3日以上欠測は1回のみとなり、観測項目の見直しも含めて、サイトへの訪問回数を大幅に削減できた。センサーネットワーク化は観測データの品質向上にもつながり、マイメンシンではセンサーネットワーク運用開始以降の3年間の平均で、顕熱フラックスで81%、悪天候の影響を受けやすいオープンパス型システムによるCO₂フラックスでも61%という高い割合で有効データを取得できた。これは、センサーネットワークで検知した測器異常への迅速な対処を現地協力者に依頼できたためであり、海外の遠隔地サイトのセンサーネットワーク化ではこのような体制整備も併せて進める必要がある。この点も含めて、農業環境変動研究センターのセンサーネットワークは有効に運用されたと評価できる。

③森林総合研究所のセンサーネットワーク化

森林総研フラックスネットの全ての観測サイト（札幌、安比、富士吉田、山城、鹿北）をインターネットに接続した。札幌と富士吉田は無線LANを用いて、安比、山城及び鹿北は携帯電話のネットワーク回線（NTTドコモ3G/4G）を用いて担当の観測拠点と接続されている。ほとんどのサイトで常時接続が可能であったが、鹿北では通信速度が確保できなかったため2時間毎にクラウドサーバーとデータを同期させることとなった。大半の観測機器は通信機能を持った装置に更新された。新観測システムでは、インターネット経由で観測システムの状態が常時モニタリング可能となった（図4）。札幌、安比、富士吉田ではネットワークカメラが設置され、フェノロジーのモニタリングも追加された。さらに、富士吉田では5台のネットワークカメラを接続し、フェノロジーだけで

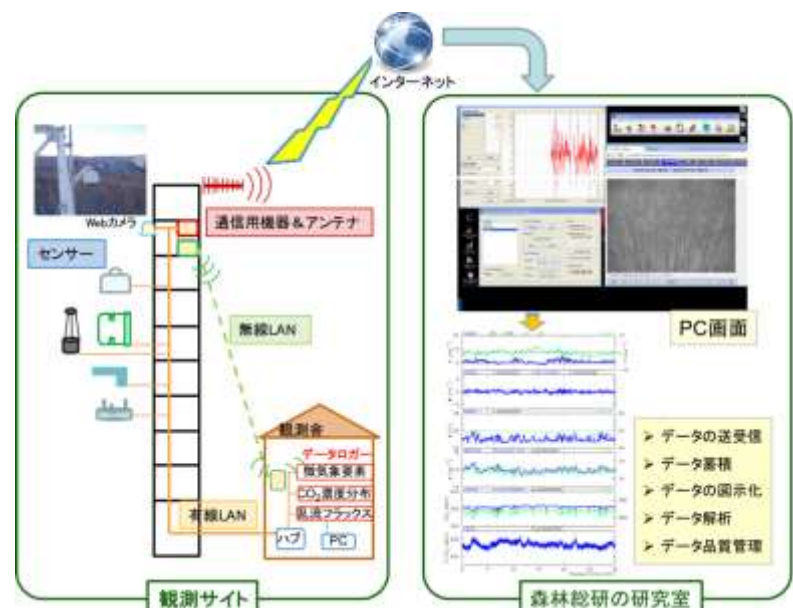


図4 森林総研フラックスネットワークのセンサーネットワーク化による常時モニタリング

なく、雪などの障害による観測機器の状態が研究拠点から確認できるようになった。安比では全ての観測項目をオンライン化すると共に、複数の観測拠点（東北支所（盛岡）と森林総研（つくば））とのネットワーク接続することでデータ処理・計算の効率化をはかった。このようにセンサーネットワーク化によって研究拠点で観測機器のトラブルや停電などを早期に発見できるようになり、欠測期間の短縮やメンテナンス作業が効率的に行われるようになった。データチェックと回収を研究拠点で随時行うことにより、機器のメンテナンス等の現場作業も半分ほどに軽減され、労力と経費の両面で省力化となった。保守点検が省力化されるとともに、欠測等の少ない精緻な観測につながった。

④ 国立環境研究所のセンサーネットワーク化

落葉針葉樹（カラマツ）の人工林の中に位置する富士北麓サイトにおいて、陸域生態系の観測の省力化とネットワーク化をすすめた。遠隔地で集積される観測データはインターネットを通じて迅速に回収するとともに、各種観測システムを遠隔で監視・制御できる体制を整備した。データ収録体制の堅牢化のため、データロガーの二重化やネットワークサーバーを利用した収録システムの冗長化をすすめた。このサイトでは観測期間中に30%の間伐を実施し、この施業の前後で炭素収支が変化する様子が確認された。これは人為攪乱が森林の炭素収支に与える影響を評価するための重要なデータとなる。また、通常的气象・微気象要素などに加えて、植物の季節性などの生態系情報を客観的な数値情報として利用するために画像や分光放射情報の自動取得体制を整備した。生態系情報の数値化とこれらを含むセンサーネットワークを整備することは、生態系のストレスや劣化、季節性の変化などを迅速に把握することに繋がり、気候変動の生態系影響評価を行う上で有効であると考えられる。

⑤ 炭素収支のサイト間比較

観測サイトは冷温帯から熱帯までを含むアジア地域に広く分布し、森林と水田を含む生態系を対象とした。様式2（詳細）の中で2011～2015年までの各サイトの観測データを示した。各サイトの年集計値を比較すると、日射量と生態系総生産量および気温と生態系呼吸量は共にかなり複雑な関係を示した。しかし、生態系総生産量の増加と共に生態系呼吸量も増加する傾向が認められた。

（2）効率的なデータ共有のための自動化技術の開発

① FluxProによる運用 -農研機構農業環境変動研究センターの事例-

遠隔地フラックスサイトのモニタリングの自動化用に独自に開発したソフトウェアFluxProを利用して、アジアの農地フラックス観測サイトをネットワーク化し、フラックスサイトの監視とデータ共有を推進した。FluxProは遠隔地サイトからインターネット経由で1時間毎に送付される観測データを自動的に処理し、フラックスや関連する気象要素の日変化、スペクトル・コスペクトル、蒸発散量や二酸化炭素フラックスの月別平均値や年間積算値などを図化してウェブサイト上で公開する。フラックスサイトの監視場面での利用を重視し、フラックス演算などの自動処理はできるだけ簡便な方法で行っている。2017年3月末現在、国内と海外の計18の観測サイトがFluxProを利用しており、このうちの10サイトではオンラインで運用している。観測サイトの関係者は、ほぼリアルタイムでウェブサイト上に提供されるFluxProの出力を、観測サイトの状況の監視や測器の異常の早期検知に活用している。また、アジアの複数地点のフラックスの実況値を、リアルタイムで比較することも可能となった。FluxProのこのような利用を通じて、アジアの農地フラックスサイトのデータ統合の促進と、モニタリングネットワークを活用した新たな研究の展開が期待される。なお、ネットワークセキュリティ対策の一環として、2016年度にはFluxProのデータ公開サイトを独自サーバから所属機関の公式公開サーバに移設した。今後、国内の研究機関ではネットワークセキュリティ対策がさらに強化されることが予想され、それに対処しつつFluxProの運営を継続するためには運営担当研究者の負担軽減が重要な課題となる。

② 渦相関法をデータロガー上で適用するプログラムの開発 -農研機構農業環境変動研究センターの事例-

①ではインターネット経由での観測データの回収から渦相関法による演算とその結果の公開までを自動化するシステムを構築したが、オンラインでの乱流計測生データの回収が困難な観測サイトや、回線を経由せず現地で精度の高いフラックスの算出を行うシステムに対するニーズもある。そこで、オープンパス型システムを対象に、渦相関法によるフラックスの計算と、測器から発出される診断値を活用した品質管理をデータロガー上で適用するためのプログラムを開発した。農研機構九州沖縄農業研究センター（熊本県合志市）のトウモロコシ圃場の観測サイトで開発したプログラムの性能を試験した結果、世界的に普及しているPC上で動作するプログラムと比較して十分な精度でフラックスを算出でき、新たに開発したアルゴリズムによって雨天時のエラー値も適切に除去できることがわかった。本プログラムは、要望に応じて外部に提供することとした。

③ 観測データ保全とデータ共有のためのネットワークの活用 -森林総合研究所の事例-

一般的な保存機器のトラブルの他、災害等によるデータ消失を防ぐため、サイト管理者以外の拠点

(つくば及び札幌)を設け、サイト管理者を含めた3カ所における多重データ保管システムの運用を行った。さらに、統一フォーマットで成形された観測データの保管を行い、研究コミュニティ内のデータ利用促進および、公開データベースへの移行のための作業の効率化がはかられた。

④データの共有・統合のためのメタデータ管理とデータ公開

観測データは各研究所やアジアフラックスのデータベースを用いて逐次公開してきた。本課題の終了に合わせて、データ公開も拡大させつつある。センサーネットワークを活用して迅速なデータ共有・流通のために自動化を進めたが、一方でデータのメタ情報を適切に管理する事も重要である。現在、地球観測の推進戦略の具体化としてデータ統合・解析システム DIAS の運用が実施されており、連携して各サイトの情報提供を行った。各サイトでは、様式2の中で2011-2015までの炭素収支を示した。それ以前の各種観測データはHPで公開のデータベースにアーカイブされており、アクセス可能である。

4. 考察

4 研究機関の運営する国内8サイトと海外3サイト(江都は相手国側の都合により観測の継続が困難となった。)で、炭素循環変動観測の長期にわたる精緻な観測を進めた。安定した長期観測を維持するためには、ICTを活用できる観測システムに更新を進める必要がある。ICTとセンサを結びつけてセンサーネットワークを確立する事により、観測データの常時モニタリングを行う事が可能となり、欠測等が少なく精度の高い観測を行うことができる。このような観測体制の構築は観測自体の省力化にもつながり長期観測のためには欠かせない。本課題の開始時には、産総研や農研機構ではセンサーネットワーク化が一部のサイトで先行して開始され、これらの研究所では遠隔地にある海外サイトも含めてセンサーネットワークを拡充させた。実際に遠隔サイトの運用にセンサーネットワークを活用する事により、効率的な観測を行えるようになってきた。しかし、観測サイトの維持のためには現地の協力体制の充実も不可欠である事も再確認された。産総研や農研機構のセンサーネットワークのシステム情報を参画機関で共有することにより、短期間ですべてのサイトのセンサーネットワーク化が達成された。観測機器の更新を含めてセンサーネットワーク化されたことで、常時モニタリングやデータ回収などが行われている。

このネットワーク化の利点を最大限に活用して、観測、常時モニタリング、データ回収、データ処理、データ公開の一連の流れをスムーズに行うシステム整備が必要である。農研機構により試みられているFluxProや記録装置でのデータ解析などは、このような流れを進める試みである。既にいくつかのサイトで試行されており、研究拠点で多数の観測サイトのモニタリングとデータ処理が行えるようになりつつある。システムを充実させて汎用性を高めれば、他のサイトでの観測への活用も可能となる。一方で、データベースで公開されているフラックスのデータ処理には自動化しづらい手続きも含まれることから、自動化は一般気象データなど取り扱い易い観測要素を重点的に進めると効率的である。

ネットワーク化の活用として、長期観測で蓄積される大量の観測データの保全も可能となる。得られる観測データは電子ファイルとして蓄積されるので、ICTを活用すればバックアップサーバを複数用いてデータの多重化が容易になる。データ保全と共有の観点から、常時複数の場所のサーバに分散して観測データや解析データをバックアップし続けることは重要である。

5. 波及効果

データ統合・解析システム DIAS に本課題の国内サイトのメタ情報が登録された。また、AsiaFlux データベースや FLUXNET データベースなどにデータが登録されている。研究所独自にデータベースを運用してデータ公開を行っているサイトもある。データ公開の方法はサイトごとに違いは有るが、観測サイトのメタ情報はデータベース相互にリンクされている。観測結果は逐次追加更新されるとともに、複数の研究プロジェクト等に活用されている。また、国内及び海外からデータへのアクセスや提供依頼がある。