

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

(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	
北海道支所寒地環境保全研究グループ	山野井克己・溝口康子
森林防災研究領域気象研究室	深山貴文・高梨聡
森林防災研究領域気象害・防災林研究室	安田幸生
関西支所森林環境研究グループ	小南裕志
九州支所山地防災研究グループ	北村兼三
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構	農業環境変動研究センター
気候変動対応研究領域長	宮田明
気候変動対応研究領域影響予測ユニット	金元植
気候変動対応研究領域作物温暖化応答ユニット	小野圭介
国立研究開発法人産業技術総合研究所	
環境管理研究部門大気環境動態評価研究グループ	村山昌平・前田高尚・石戸谷重之
国立研究開発法人国立環境研究所	
地球環境研究センター陸域モニタリング推進室	三枝信子・高橋善幸

平成24～28年度合計予算額 1 1 2, 1 7 5 千円 (全課題分)  
(うち、平成28年度当初予算額 1 7, 1 6 7 千円 (全課題分))

〔要旨〕 森林総合研究所、農業・食品産業技術総合研究機構、産業技術総合研究所、国立環境研究所の4国立研究開発法人では、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。このような地上観測網を長期間にわたり維持するためには、多くの資金と人的資源の投入が必要となっている。一方で、ICT技術の進歩と観測機器のネットワーク機能への対応が進んでいる。ICT技術の導入によるセンサーネットワーク化を進めれば、常時モニタリングとデータ回収を行うことにより観測を省力化できる。常時モニタリングは観測精度の向上と欠測の減少にもつながる。課題開始時に先行して行われつつあった産総研高山サイトおよび農研機構真瀬サイトのセンサーネットワーク化をプロトタイプとして、インターネット回線を用いて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全サイトで確立した。各サイトは確保できる通信回線に差があるものの、ネットワークを利用した測定機器の保守点検などにより、観測の継続のための労力が軽減された。また、機器トラブルや停電などによる欠測が少なくなり精緻な観測が維持された。

〔キーワード〕 センサーネット、常時モニタリング、ICT、長期観測、省力化、精緻化、炭素循

## 環、陸域生態系

### 1. はじめに

地球温暖化問題への対応として、正確な観測データに基づく影響評価や緩和・適応策の策定が求められる。そのためには、包括的で統合された地球観測を長期的に推進する事が不可欠である。その中で、陸域生態系は気候変動に対して不確実性の高いプロセスであり、長期継続的な観測が必要である。特に、森林や農耕地などは炭素の吸収源や貯留源として注目される。陸域生態系での地上観測は地球観測の中でも重要な位置づけがなされており、フラックス観測（炭素移動量観測塔を用いた炭素循環観測）もその一つとして体系的な推進が求められている。

炭素循環のモニタリングは、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域においては、さらに多くの観測拠点が求められている。変化する生態系において、短期間のモニタリングでは炭素循環の把握に関する不確実性が大きいいため、長期にわたるモニタリングが重要である。本研究を行う森林総合研究所（森林総研）、農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター（農研機構）、産業技術総合研究所（産総研）、国立環境研究所（国環研）の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。

### 2. 研究目的

精緻な地上観測網を維持するためには、多くの資金と人的資源の投入が必要となっている。参画の12ヶ所（国内8ヶ所、海外4ヶ所）の観測サイト（図1）においても、限られた人員の努力により観測を維持している状況に有る。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

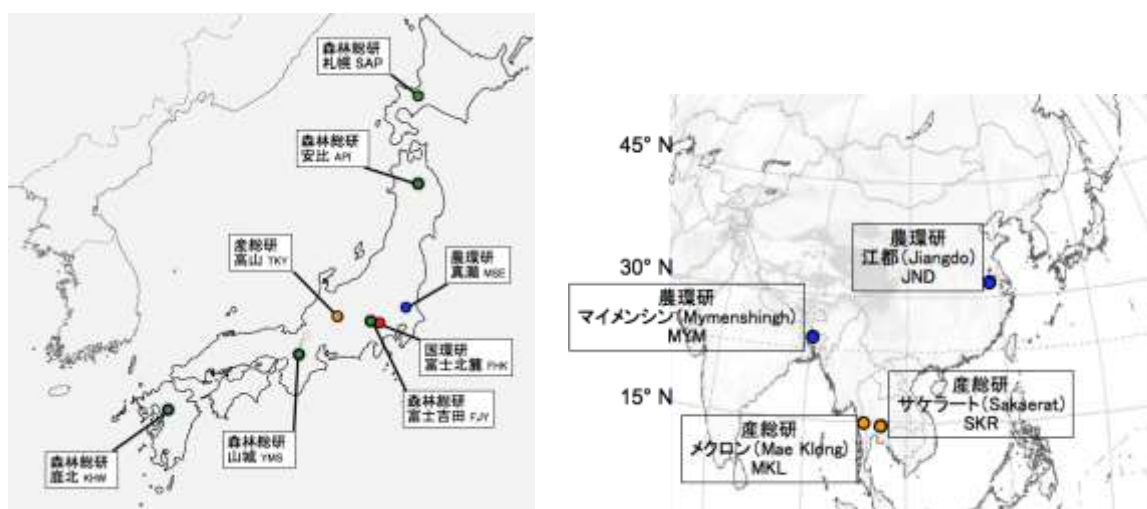


図1 国内8カ所と海外4カ所の観測サイト

難となり、現在は11サイトが継続している。海外サイトはもとより国内の遠隔サイトでも、研究者自らが観測機器の保守を担っている状況で、高精度な観測を継続することが困難になりつつある。一方で、ICT技術の進歩と観測機器のネットワーク機能への対応が進んでいる。ICT技術の導入によるセンサーネットワーク化を進めることにより、常時モニタリングとデータ取得を行うことが可能となり、遠隔地のサイトでは特に有効となる。研究協力者の育成とセンサーネットワーク化を同時に進めれば、観測が省力化でき長期観測が継続可能となる。常時モニタリングは観測精度の向上と欠測の減少にもつながる。センサーネットワークは解析も含めた観測からデータ共有までの自動化の入り口に当たり、サブテーマ（2）と連携する。

### 3. 研究方法

参画する4国立研究開発法人では森林や農耕地などの陸域生態系の中にタワーを中核とする炭素循環観測拠点を立ち上げ運営してきた。1990年代に始まったそれぞれのサイトでの長期観測は、相互に連携を取りながら進められてきているものの、長期化するに従い観測システムは老朽化、陳腐化しつつあった。機器やシステムの更新も少しずつ進めてきているものの、観測の長期継続のためには根本的な更新の時期を迎えていた。更新に合わせてネットワーク化を進めることにより、観測の省力化を目指している。研究機関やサイトごとに更新への対応状況はまちまちであるが、先行して改良されたサイトの情報を共有する事により、逐次各サイトのセンサーネットワーク化を進めた。

産総研高山サイトおよび農環研真瀬サイトでは課題の開始時にはセンサーネットワーク化が先行して実施されつつあった。それらの技術を完成させると共に、システム情報を利用して海外や国内サイトのセンサーネットワーク化を順次進めた。センサーネットワーク化のシステム情報を積極的に公開することで、効率的な観測技術の普及を目指す。

### 4. 結果・考察

#### (1) 産業技術総合研究所のセンサーネットワーク化

##### ① 長期連続観測の現況

産総研は、国内1カ所と海外（タイ）2カ所の合計3カ所の観測地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CO<sub>2</sub>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、林冠フェノロジー等、40以上の観測項目の長期連続観測を実施している。それぞれの現況は以下の通りである。

#### ア. 国内

高山（TKY）：岐阜県高山市、冷温帯落葉広葉樹林サイト

1993年よりアジア地域で最も長期にわたるフラックス観測を継続している。森林は樹高15-20mのミズナラ、シラカンバ等から構成される、50年以上経過した二次林であり、林床部はササが繁茂し、12月～4月には雪に覆われる。林内には高さ約25mのマスト状のタワーと、商用電源が引き込まれた観測小屋が整備され、タワーとその周辺に各種観測センサや分析機器、データ処理・通信装置類を設置し、運用している。

今年度も、各フラックス、気象、CO<sub>2</sub>濃度等の観測を継続して行った。高山サイトでは、2016年9月下旬の台風来襲以降11月中旬まで、CO<sub>2</sub>フラックスの観測に使用しているCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O分析計及び温

湿度計が故障し、正常に測定できない期間を生じ、他の気象データ等を用いて、データの補間を行った。2016年は春季の高温により、展葉時期が早まり光合成活動が早期に活発化し、月平均NEE

(Net Ecosystem Exchange、大気-森林生態系間正味のCO<sub>2</sub>交換量)が負に転じる(正味CO<sub>2</sub>吸収に転じる)時期が早かった。また、秋季の気温が高く、落葉樹の落葉が11月中旬まで遅れたが、天候不順で日射量が少なかったため、秋季は他の年と比べてCO<sub>2</sub>吸収が少なかった。その結果、2016年の年間積算正味CO<sub>2</sub>吸収量は、2012~2014年と比べて小さく、2015年より大きかった(図2)。2011~2015年までの月別の炭素収支(生態系総生産量(GPP)、生態系呼吸量(Re)、生態系純生産量(NEP=-NEE))を図3に示す。

#### イ. 海外

サケラート(SKR):タイ・ナコンラチャシマ県、熱帯季節林(乾燥常緑林)サイト

メクロン(MKL):タイ・カンチャナブリ県、熱帯季節林(混合落葉林)サイト

タイ天然資源環境省国立公園野生動植物保護局およびタイ科学技術研究院など現地機関の協力の下で観測を続けている。両観測サイトとも、季節が5月~10月の雨季と11月~4月の乾季の2つに明瞭に分かれる。年間を通じて降雨量が多い熱帯雨林とは異なり、雨季と乾季の入れ替わりに伴う生物活動の明瞭な季節変化が見られるサバナ気候の熱帯季節林である。SKRサイトは、タイ東部のコラート高原の南端の縁辺部に位置し、乾燥常緑樹林に区分される主に常緑のフタバガキで構成された林冠の高さ約30mの森林である。一方、MKLサイトは、タイ西部を南北に走る山脈内にあり、林冠の高さは約20m、非常に多種の落葉樹で構成される混合落葉林に区分される森林で、林床にタケが繁茂するのが特徴である。いずれもタイを代表するタイプの森林であり、前者と同種の森林はタイ全土の自然林の

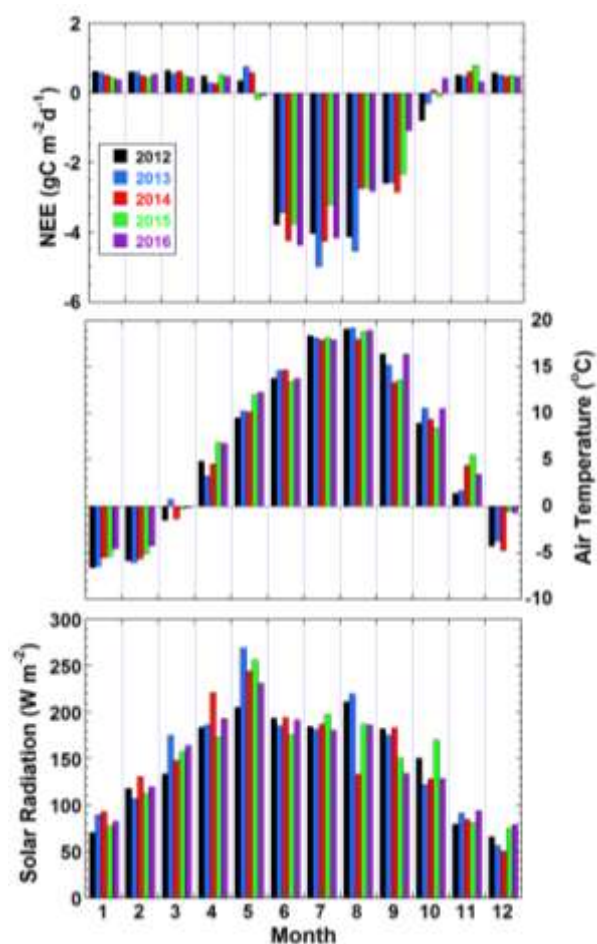


図2. 高山サイトで観測されたCO<sub>2</sub>フラックス(NEE)、気温、日射量の2012-2016年の月平均値の比較

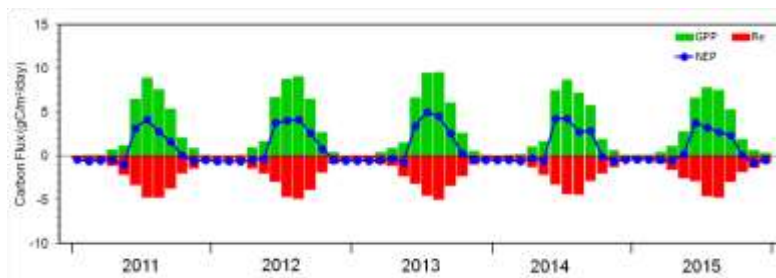


図3. 高山サイトの炭素収支

30%程度、後者の場合は50%程度を占めると言われている。

両観測サイトには、林内に高さ40mの作業足場型のタワーが設置され、TKYサイトと同様に観測センサ類と分析機器、データ処理・通信機器を備えている。なお、電源やデータ通信の事情が観測サイトによって異なり、SKRサイトは森林の奥深くにあるため、太陽光発電により機器の電源を賄っている。一方、MKLサイトには商用電力が引き込まれている。

今年度も両観測サイトにおける連続観測を継続した。現地の各センサ類からの生データは、後述する通信ネットワークを通じ、回線に障害がない限り準実時間でつくばの産総研事業所に送信されている。現地においては、後述するような、観測サイト構内およびつくばへの通信インフラを用いたデータ送受信、データ収録機器および通信機器の自動障害検出・警報機能を改修しつつ、運用を続けた。タイの両観測サイトでは、それぞれでフラックス観測に必要な超音波風速計やガス分析計で老朽化に伴う故障を生じて交換や修理を要した。このため、SKRサイトでは2015年末から2016年初めまで、メクロンではフラックス観測系で2016年を通じて必要なデータが揃わず、やむなく長期間欠測状態になったが、稼働可能な機器の運用は継続した。タイの気候は、2014年後半から2016年前半まで2年間続いたエルニーニョ現象による強い乾燥状態にあつて、雨季前半の降雨と土壌水分量が少なく、また、観測サイト周辺での多数の巨木の枯死や、広域的なタケの開花など、植生の活動に干ばつの影響と思われる異常がみられた。

## ② 本課題により整備運用している現地観測のオンライン化、自動データ送受信および遠隔監視 ア. 通信インフラの構成

産総研が担当する3つの観測サイトでは、タワー内に散在するデータロガー等の観測データ収録機器類を接続する構内ネットワーク（Local Area Network, 以下LAN）を整備し、各観測サイトとつくばにある産総研事業所との間でデータ送受信を行う広域ネットワーク（インターネット等、Wide Area Network, 以下WAN）と接続し、運用を行っている。観測サイトにより異なる立地や電源設備などの条件に合わせ、以下のようにそれぞれ異なる接続方法を採用している。図4に、各観測サイト構内およびつくばの産総研事業所との間の通信経路の概略を示す。

TKYサイトでは、商用電力が利用でき、構内には他機関のグループと共用の有線のLANおよび有線のWAN接続が設置されている。観測データ収録機器類はすべて構内のLANに接続されている。

SKRサイトでは、タワーが森林の奥深くにあるため、塔上に設置した太陽電池と蓄電池からなる自立電源を用いている。本課題において、ほぼ全ての観測データ収録機器類を塔内に敷設したLANに接続した。WANへは、塔上のアンテナと高出力通信機により数km離れた携帯電話基地局に接続して、不安定ながらも常時接続を確保した。

MKLサイトでは、商用電力を使用しているが、携帯および固定電話回線を使用可能な最寄り集落から10km以上離れた場所に観測サイトがあるため、観測サイト内の事務所に静止通信衛星（THAICOM4-iPSTAR）によるWAN接続のためのアンテナを設置し、事務所から約400m離れたタワーとの間に敷設した長距離屋外無線LANを介して、タワーからWANへの常時接続を確保した。

### イ. 観測サイト自動遠隔監視とデータ送受信

産総研が担当する観測サイトはいずれも遠隔地に所在し、産総研の観測担当者が現地を訪問して保守作業を行うことができる頻度は、国内観測サイトでも隔月、タイのサイトにあつては年に2、3回程度である。そのため、連続観測は基本的に無人運転で行っている。さらに、雷や豪雨、

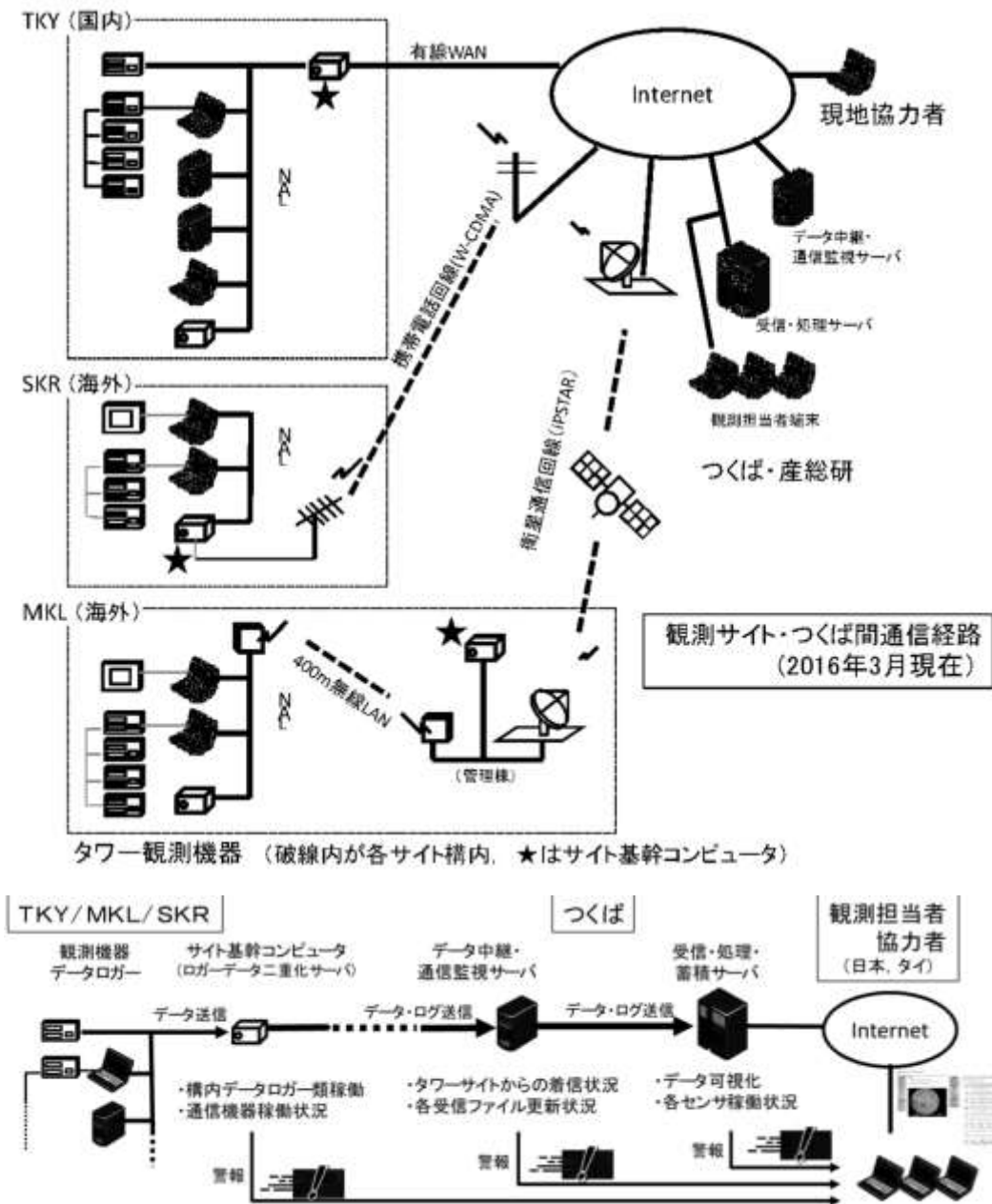


図 4. 国内外 3カ所の観測サイトとつくばの間のデータ通信および遠隔監視・警報のフロー  
太線はイーサネット等のコンピュータ間の通信回線、細線はシリアル通信等のコンピュータと観測用機器の接続回線。

大雪、高温、強風といった荒天や、野生生物の侵入などによる障害がたびたび発生する。従前は定期的な現地訪問作業の際に障害を発見し、その場で応急的復旧を行うか、もしくは資材を用意して再訪問し修繕することにより観測を維持してきたが、この体制では、障害が発生してから、その発見・復旧までに長時間を要し、通年で連続したデータを取得することが難しいという問題を抱えてきた。これを解決するため、本課題では、前述の通信インフラを整備し、自動で観測機器類を常時監視し障害発生時に警報を観測担当者に送る仕組みを構築してきた。また、各観測サイトでは、データロガーなどの複数の観測データ収録機器を使用し、センサの測定値を変換、記

録している。このデータの回収も、従前は現地訪問時に手作業で行ってきた。このため、現地訪問の合間に観測データ収録機器で障害が発生すると、蓄積したデータの損失による長期欠測を生じることがあった。このデータ損失を最小限にするため、本課題では、各観測サイト内に基幹コンピュータを設置し、観測データ収録機器からLANを通じて短い時間間隔でデータを自動回収、保管することにより、観測データを現地で重畳化して保持する仕組みを導入した。基幹コンピュータは、この他、回収したデータのつくばへの送信、構内LAN上にある観測データ収録機器類の稼働状況を自動監視する役割も担っている。各観測サイトの基幹コンピュータに回収したデータは、それぞれの通信経路を通じ、つくばに設置されているデータ中継・通信監視用サーバに自動的に送られ、さらに産総研事業所内に設置したデータサーバに送られる。平成28年度末現在、各観測サイトの基幹コンピュータからデータ中継・通信監視サーバの間では、データ収録装置や通信回線に障害がない限り、約2-3時間ごとに保存データの同期を行っている。産総研事業所内のデータ受信処理蓄積サーバは、データ中継・通信監視サーバから2時間毎に3観測サイト分の未受信データを一括して受信し、処理・蓄積する手順を運用している。

各観測サイトの稼働状況の監視、および障害の自動警報機能は、前出の図4下段に示した通り、データ送受信経路上の各サーバで、以下の項目と内容について実装し、運用を行っている。

○各観測サイト内の基幹コンピュータ

- ・構内LANを構成している通信機器類の稼働状況（接続が確立されているか）
- ・構内LANに接続された観測データ収録機器の稼働状況（データ送受信が可能であるか）

○データ中継・通信監視用サーバ

- ・各観測サイトの基幹コンピュータからの通信確保状況（観測サイトから定時の接続が着信したか）
- ・受信したデータファイルの更新状況（一定時間内に新しいレコードが追加されたか）

○データ受信・処理・蓄積サーバ

- ・センサ個別の稼働状況（受信した最新データに、センサの停止や脱落などの明らかな異常を示す信号がないか）

以上は、1日数回、定期的にチェックを行い、異常を検出した際には即時に電子メール等を通じて産総研の観測担当者と現地の協力者に通知し、対応を促すものである。さらに、データ受信処理蓄積サーバには、自動遠隔監視の状況に加え、受信データを自動的に可視化して表示し、観測担当者と現地の協力者が、WWWを通じて観測サイトの状況を目視し、自動監視機能で検知できない観測値の異常などを遠隔から確認しながら対応を検討できる仕組みも備えている（図5）。

警報を受けてからの対応は、現状では観測サイトに駐在する協力者による人力に頼らざるを得ない。現地の協力者は各観測サイトを管轄する機関の技能職員など、必ずしも観測機器類の取り扱いに精通していないので、依頼できる作業の範囲は限定される。しかし、過去の経験から、発生する障害の多くは、停電などに伴う機器の動作停止や動作異常であるので、その場合は機器類



への電源再投入などは事前に指導しておいた手順で復旧し、また、警報から推定される障害の内容とその対応方法が明らかな場合は指示を送ることで簡易に復旧可能と判断されれば作業を依頼できるような人的体制を、上記の情報通信系と並行して整えた。

ウ. H28年度末までの整備進捗、運用状況とその効果

本課題により構築整備し、連続運用している各観測サイトのオンライン化、自動データ受信および自動遠隔監視の構成は、上記ア. およびイ. に述べた通りである。平成28年度末現在、いずれもおおむね順調に機能している。障害発生時の自動検知および警報機能を導入した効果を、タイの観測サイトについて示す。図6は、タイのSKR、MKL観測サイトにおける2007年から2016年のフラックス観測系（CO<sub>2</sub>濃度計および超音波風速計等、5Hzで測定する観測機器、およびデータ収録装置の系統）のデータ取得率の推移である。ここでいうデータ取得率とは、フラックス観測系機器の観測値をつくばのデータ受信・処理・蓄積サーバに回収できた観測時間の長さ（観測レコードの数）の割合である。一部の項目しか観測できなかった場合でも、すべての観測機器とデータ記録装置が停止しない限りはデータを取得したものとしている。また、複数あるセンサ類個別の動作異常等によるデータの品質低下は考慮せず、観測値が記録されていればデータを取得したものとしている。データ取得率の増減は、年々の気候・気象条件や現地訪問作業の頻度、観測機器や設備の経年劣化や損耗など、様々な要素に依存するので、そのままICT導入の効果のみを示すものではなく、注意が必要である。しかしながら、両観測サイトとも、オンライン化を始めた2011年以降、データ取得率が大幅に向上し、おおむね維持している。本課題期間中に産総研の担当者がタイの各サイトを訪問し

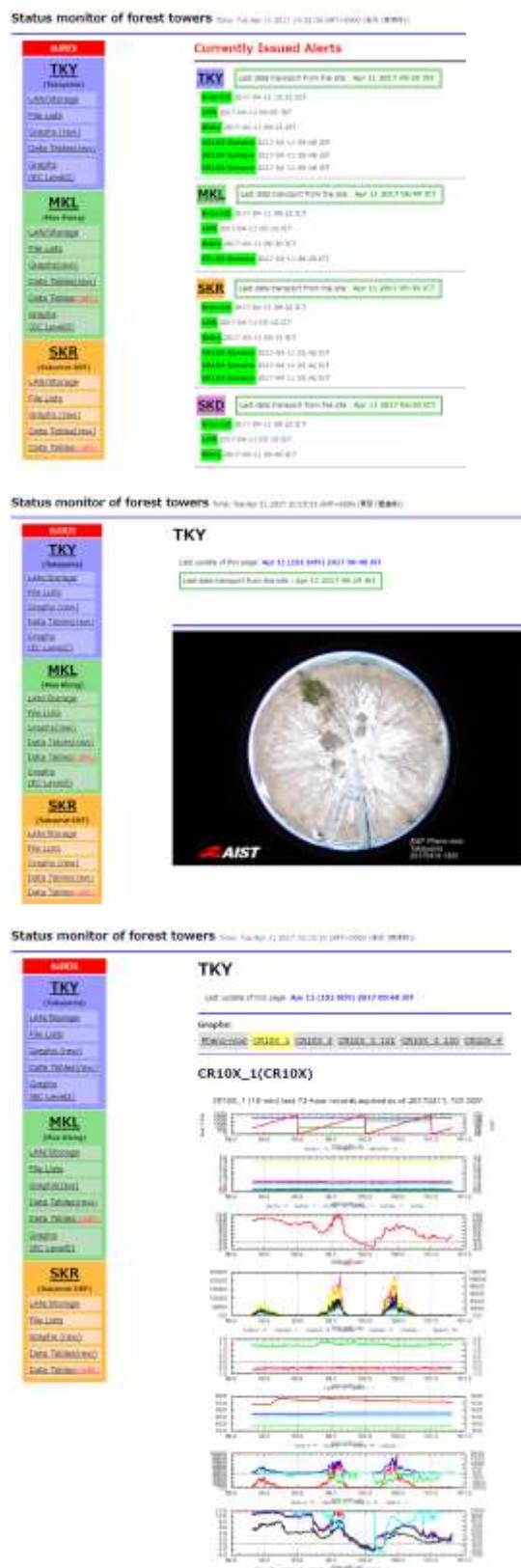


図 5. WWW による全サイトの自動遠隔監視・警報発生状況(上)とサイト別受信データ可視化表示(中、下)



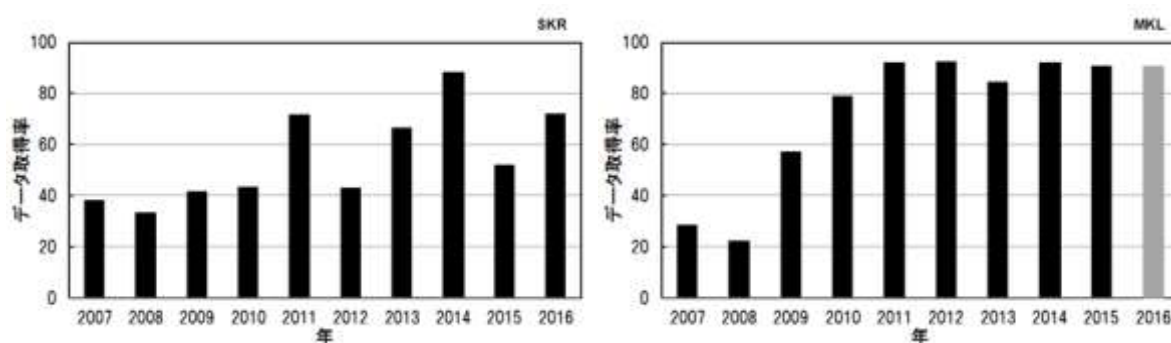


図6. タイの2観測サイトのフラックス観測の年間データ取得率の推移（2007-2016年）

左：SKRサイト、右：MKLサイト、データ取得率は、1年間のうちデータが収録できた時間の割合（100%は5Hzの測定では年間157,680,000回）として表示している。

て保守整備作業を行った頻度は、2010年以前から変わらず、年あたり3回程度、作業日数は1回の訪問につき各サイト3日間程度であった。

なお、SKRサイトで年々の差があるのは、観測機器の交換や修理を要する障害で停止したり、太陽光発電による自立電源が荒天等で停止したなど、短時間での復旧が困難な年があったためである。また、MKLサイトでは、2016年はセンサ・分析計類に装置自体の交換や修理を要する故障が相次いで発生し、長期にわたっていずれかの観測項目データが欠けて実質的には観測休止状態に陥った。しかし、常時いずれかの観測項目のセンサは稼働し、観測データ収録装置は通年で90%以上のデータを記録した。そのため、図6ではグレーで表示している。

### ③ 本課題で整備し、運用を行っている現地観測データの自動処理化

#### ア. 気象観測データの自動処理化

前項で述べた自動データ送受信機能によってつくばの産総研事業所で受信したデータは、後のデータ解析や、他の観測結果との統合、利用、所内外のデータベースに蓄積するために後処理が必要である。従来はこの工程も人手を介して処理を行ってきた。本課題では、受信後のデータ処理工程も自動化することを目標に掲げ、進めてきた。

#### ・気象観測データの自動処理化の運用

本課題では、フラックス観測のデータより先行して、処理が比較的簡易である一般気象等の観測項目について、生データをつくばで受信するサーバにおいて即時に自動処理・可視化するシステムの骨格を構築し、可視化したデータの目視による遠隔監視、センサの故障など明らかな異常値の自動検出・警報の機能の通年運用を継続して行ってきた。さらに、現地に設置したセンサからの生の出力の多くは、電圧やパルス数など、目的の気象要素の物理量とは異なった値であるため、これらを目的の物理量に変換し、30分ごとの平均もしくは積算値として整形したデータファイルを生成し、蓄積する機能も加えて運用を続けている。ただし、現段階では、センサの故障のような明らかな異常ではなく、正常範囲内の値であっても何らかのノイズなどにより誤差が生じているようなデータの検出や修正といった品質管理の自動化は、慎重に行わないと却って別の作為的誤差を生じる恐れもあって困難を伴うため実装はせず、今後の課題として開発を続け、当面は手作業による処理も併用する。手作業を併用するにあたって、観測地から受信後直ちに前述

のような物理量変換や整形、可視化などの自動処理をすることによって、データの品質管理作業が効率的に行えるようになると期待される。

#### イ. フラックス観測データの自動処理化

前述の通り、本課題では、観測サイトへのITC導入として、1)観測サイトからデータ処理を行う研究室までのオンライン化、2)観測サイトの遠隔監視およびデータ収集の自動化、3)一般気象・環境データの自動処理化を進め、運用とその効果の検証を行ってきた。これらの次の段階として、データ処理手順が比較的複雑で処理量も多いフラックス観測データの処理の自動化がある。

フラックス観測では、毎秒5回の高頻度測定を連続して行うため、大量のデータとその処理が発生する。そのため、従前は、観測サイト内にデータを蓄積し、現地訪問作業の都度、データを人手により持ち帰ってバッチ処理的に計算を行ってきた。これを自動化するため、本課題前半において他の通信インフラ等の整備と並行して現地のフラックス観測用データ収録機器を自動逐次処理に対応したものに順次交換し、つくばへ自動送信する体制を整備してきた。続いて本課題後半では、つくばでデータを受信した後のプロセスである、データ処理と可視化の自動化を進めてきた。平成27年度には、国内にあって観測地の運用とデータ受信の状況が安定しているTKYサイトを対象に実装した。平成28年度は、これをタイの観測サイトに可能な限り展開することとし、タイの2か所の観測サイトのうち、商用電力と衛星回線を通じた常時接続によってデータ送受信が比較的安定しているMKLサイトを対象としてデータ処理の自動化を施した。SKRサイトは、太陽光発電と蓄電池による自立電源と携帯電話回線を使っており、大量のデータ送受信が必ずしも安定しないため、今後当該観測サイト全体のインフラの改良を行った後に自動化を導入することとした。

図7は、速報値ではあるが、MKLサイトからの受信データについて準実時間で自動処理し可視化するシステムの出力表示画面の一部である。ここで処理したデータは、気象観測データの場合と同様、品質管理は現状では機械的処理になじまない部分があり、今後の課題として開発を続け、当面は手作業を併用する。産総研事業所内には、自動処理済みデータを手作業に渡し、その後回収して整理蓄積するため、所内にデータサーバを設置している。このサーバとフラックス観測データの自動処理システムとを接続してデータを蓄積し、効率的に手作業による後処理と連携する枠組みとした。以上により、国内外の担当観測サイトから生データを受信し、即時に処理、蓄積するワークフローが出来上がり、運用を始めた。

#### ④ 考察と展望

本課題を通じ、産総研が担当する無人運転の国内外3観測サイトからつくばの産総研事業所を結ぶ通信インフラ整備、現地の観測機器類の遠隔監視と自動障害検知および警報、データ回収および処理の自動化を進めた。現在各機能を通年で継続運用している。観測機器類の自動遠隔監視と警報に加え、これに呼応、対応する現地協力者の体制を整備したことが奏功し、障害の有無にかかわらず定期的に現地を訪問して点検の際に障害を発見し、後日再訪問して復旧する、という旧来行ってきた保守の方法に比べ、現地訪問作業の頻度を変えることなく、障害発生から復旧までの時間を短縮し、長期欠測の発生を低減することできた。各種データの自動処理化も可能な限り行い、一般気象・環境データは全観測サイトについて、フラックス観測の計算処理は、データ通信条件が良好な国内外各1観測サイトについて構築した。これにより、計算処理後に手作業で

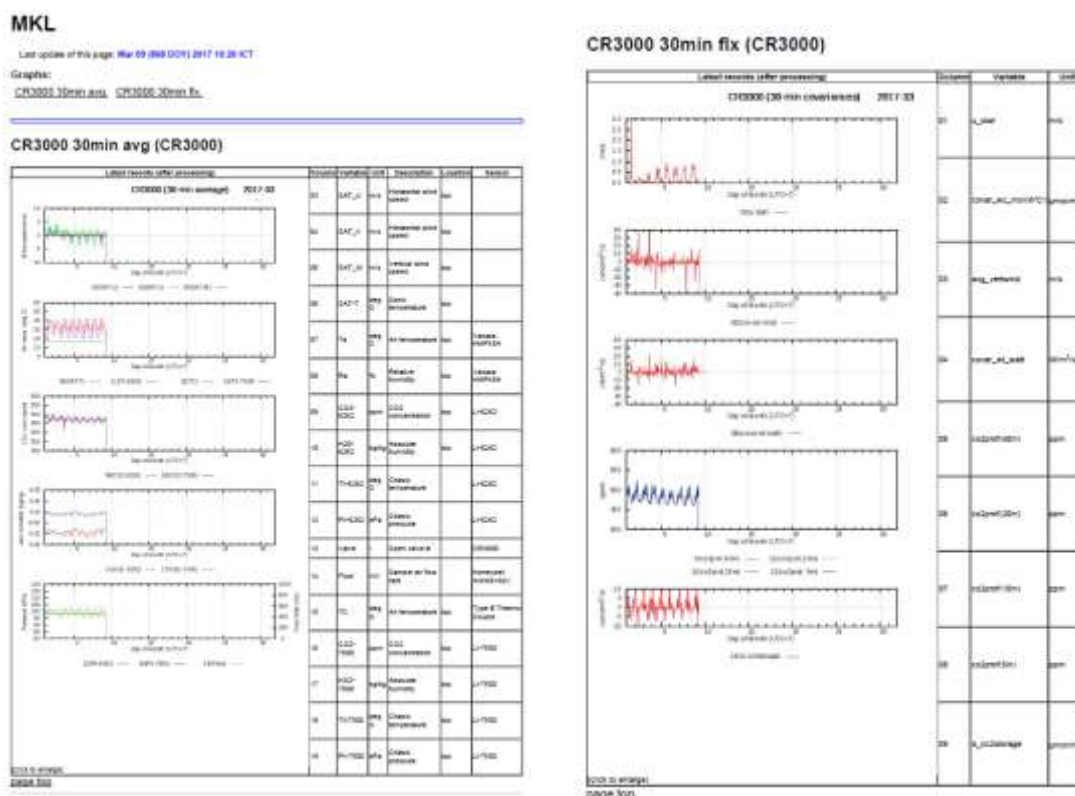


図 7. フラックス観測自動データ処理表示画面の例

タイ・MKL サイトからの受信データの自動処理過程

行う、自動的に検知できないようなセンサ類の動作異常による誤差の検出や補正なども効率化し、データの質的な向上も期待される。今後も改良や機能の追加をしながら長期連続運用を続ける。

それでもなお、本課題が扱うような環境の長期連続モニタリングには、観測に用いる機器や設備自体の堅牢化と保守、障害発生警報の受信後即時の現場復旧、データの科学的解釈などを行う人的体制が不可欠である。本課題において実現した、障害発生から復旧までの時間の短縮によるデータ取得率の向上は、ICTの導入のみならず、現地の人員の協力があってこそ実現できたものでもある。そのための現地協力機関との連携・信頼関係、観測技術と研究のノウハウを有する人材の育成は重要であり、引き続き密な交流を通じその維持発展に努める。

## (2) 農業・食品産業技術総合研究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（農業環境技術研究所が2016年4月に改組、以下では農業環境変動研究センター）では、水田生態系の炭素・水動態の定量化と支配プロセスの解明を目的として、国内および海外の水田でフラックスのモニタリングを行ってきたが、モニタリングに関わる一連の作業の自動化と省力化を目指して、2009年からセンサーネットワーク化に基づく遠隔モニタリング体制の構築に着手した。農業環境変動研究センターのセンサーネットワークは、①フラックス監視・予測システム (FluxPro)、②観測サイト用ポータルサイト (真瀬サイトの場合は、Mase Portal)、③衛星・地上連携生態系動態監視ネットワークシステム (SGEMS) の3つのシステムで構成されている (図8)。機能に若干の重複はあるが、観測サイトからのデータや情報の収集、処理、加工、予測をこの3つのシステムが分担して行い、収集されたデータはシステム間で共有す

る。2013年度までに基本システム群がほぼ完成し、茨城県つくば市の真瀬サイトとバングラデシュのマイメンシン（Mymensingh）サイトでは、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。これらのシステムのハード・ソフト構成は次の通りである。各観測サイトでは複数のデータロガー、制御PC、ウェブカメラをネットワーク化してLANを構築し、インターネットへはルーターを介して接続する。真瀬サイトでは2009年から3G回線により、マイメンシンサイトでは2013年からバングラデシュ農業大学構内の有線LANを利用してインターネットへの常時接続を行っており、いずれの回線も乱流計測生データの転送には十分な帯域が確保されている。インターネット側から農業環境変動研究センターのファイアウォール内部の端末へアクセスすることは容易ではないため、所内に設置したPCからデータロガー専用ソフトウェア（LoggerNet）と独自のプログラムを用いてサイトのルーターに接続する形をとった。3G回線では固定IPアドレスを取得できないため、ダイナミックDNSサービスを利用している。

2014年度以降は、上記の①～③の3つの基本システムを運用しつつ、トラブル防止策や利便性向上のための改良を加えながら、取得データの処理や分析を進めた。3つの基本システムのうち、①フラックス監視・予測システム（FluxPro）は、所属機関のインターネットセキュリティ対策の強化に対処するため、データ公開サイトを機関公式公開サーバへ移設するなどのセキュリティ対策を行った（本システムの詳細は、「（2）効率的なデータ共有のための自動化技術の開発」を参照）。②観測サイト用のポータルサイトは、フラックス・気象データに加えて、各観測サイトの情報や、ネットワークカメラによる画像データ、観測サイトでの作業記録（観測機材の保守、

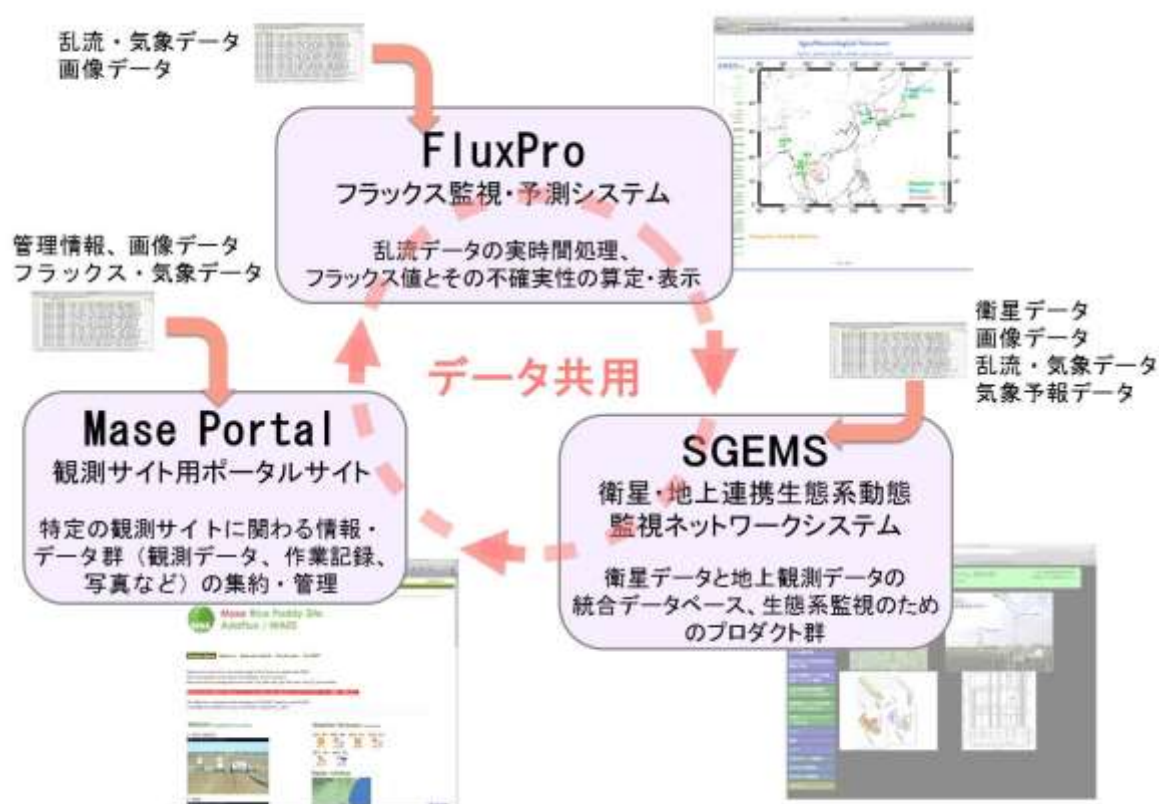


図8 農業環境変動研究センターのセンサーネットワーク



圃場管理)、スナップ写真などを集約し、情報の図化・表示や異常値判定・警告の発出を一元的に行う管理システムであり、トラブルの早期発見や研究グループ内での作業情報の共有に活用した。③SGEMSは、農業環境変動研究センターのリモートセンシング研究グループとの所内連携により構築した、衛星データと地上観測データを統合的に管理するデータベースと、それらに基づいて作成された生態系監視のためのプロダクト群の総称である。衛星データやそれに基づくプロダクトの地上検証をリアルタイムに行うため、各観測サイトに設置したネットワークカメラと分光放射計のデータをサイト周辺のMODIS画像と併せてデータベース化し、共同研究者等へのデータ配信に活用した。2016年度にはSGEMSのデータ処理用のHDDが破損するトラブルが生じたが、サブシステムへの切り替えによってデータの欠損は生じなかった。設計当初からメインとサブの2つのPCで冗長的な運用を行ってきたことが功を奏したが、高次のRAIDを導入していなかったため、メインシステムの復旧に時間を要した。この障害を機にRAID5を導入した。また、マイメンシンサイトでは現地のルーターの設定が何らかの原因でリセットされてしまったため、長期にわたり外部からサイトのネットワークに接続できない状況が継続したが、現地協力者が並行して手動でのデータ回収を実施していたため、ネットワークカメラの画像データを除いて、データの欠損はほとんど生じなかった。設定がリセットされた原因は解析中である。

真瀬 (MSE) サイトで取得した2011～2015年の日射量、気温、CO<sub>2</sub>フラックス (NEP)、NEPを経験モデルで分離した総一次生産量 (GPP) と生態系呼吸量 (RE) を図9に示す。真瀬サイトでは、2012年以降は本課題で構築した上記システム群により取得・処理を行った。イネ単作田のため、年1回のCO<sub>2</sub>吸収のピークがあり、その強度には若干の年々変動が見られた。2012年は多照高温にもかかわらず、施肥量を例年より抑制したためGPPとNEPは低水準となった。しかし、この5年間は気象条件が比較的安定してお

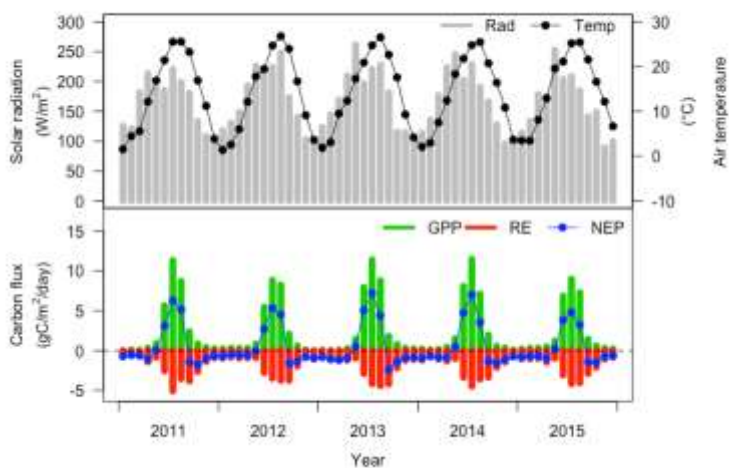


図9 真瀬サイトにおける日射量、気温、NEP、GPP、REの長期変化

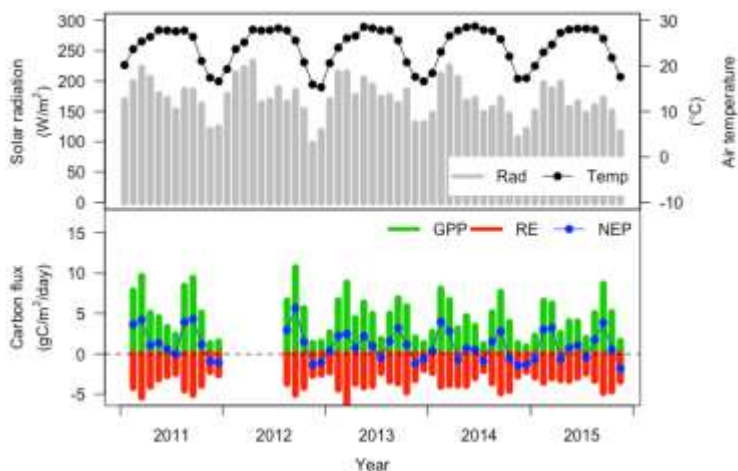


図10 マイメンシンサイトにおける日射量、気温、NEP、GPP、REの長期変化

り、各フラックスの年次変動は過去と比較して小さかった。同様に、マイメンシン (MYM) サイトの2011～2015年の日射量、気温、NEP、GPP、REの変化を図10に示す。マイメンシンサイトでは、2011年1～2月にオープンパス型ガス分析計の出力飽和により、また2012年2～10月には電源系統の老朽化によるトラブルの頻発により、それぞれ1ヶ月当たり10日を越える乱流計測生データの欠損が生じた。この期間については、他の期間と同じ品質のフラックス値を得ることができなかつたため、図10にはデータを表示していない。これらの期間を除き、マイメンシンサイトのGPP、NEPにはイネ二期作に対応した年2回（3～4月および10月）のCO<sub>2</sub>吸収のピークがみられ、二つのピークの間には雨季に繁茂する雑草や再生イネによる小さな吸収のピークがみられた。マイメンシンサイトは真瀬サイトに比べて高温で気温の年較差が小さいため、REの季節変化は小さかった。

農業環境変動研究センターでは、フラックスモニタリングに充当できるエフォートが減少しつつある中、測定やサイト管理の省力化が大きな課題となっていたが、本課題を核に整備した3つのシステムを運用することによってサイトのメンテナンス性が大きく向上した。真瀬サイトでは、センサーネットワーク導入以前は隔週でサイトに赴き、手動でデータ回収を行っていた。そのためセンサーの異常に気づくのが遅れ、数日に及ぶ欠測も生じていた。しかし、システム導入後は、異常の検知をリアルタイムに行うことが可能となったため、3日以上欠測は2014年2月の大雪によるデータロガーの故障によって生じたもののみである。また、データ回収目的のサイト訪問が原則不要となったことで、図11に示すように、サイト訪問を年間延べ40回以下まで減らすことができた。ただし、同期間に観測項目の見直し等を行ったため、訪問回数の低下がすべてセンサーネットワーク化によるものではない。センサーネットワーク化による欠測期間の削減と測器異常の早期検知は、観測データの品質向上にもつながった。図12に示すように、マイメンシンサイトでは、センサーネットワークの運用を開始した2013年以降の3年間の平均で、顕熱フラックスでは81%、CO<sub>2</sub>フラックスでも61%という高い割合で有効なデータを取得できた。なお、顕熱フラックスに比べて、CO<sub>2</sub>フラックスで有効データの取得率が低いのは、降雨や濃霧などの影響を受けやすいオープンパス型ガス分析計を使用しているためである。一般に、海外の遠隔地にある観測サイトの場合は、センサーネットワーク化により測器の異常を早期に検知できても、国内の研究者が直ちに現地に赴いて問題を解決することは難しい。マイメンシンサイトでは、測器の異常への対処を現地協力者に依頼することができたが、このような協力者が得られない場合には、センサーネットワーク化による観測データの品

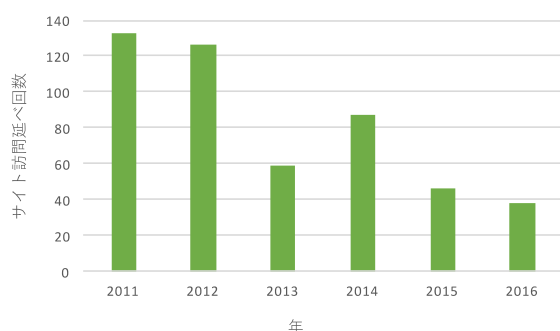


図11 真瀬サイトへの訪問延べ回数の推移



図12 品質管理後の有効なフラックスデータ（30分値）の割合（マイメンシン）。顕熱フラックス (H) およびCO<sub>2</sub>フラックス (NEP) について、年間の総データ数（平常の場合は48×365=17,520）に対する有効なデータ数の割合を示す。



質向上の効果は限定的とならざるを得ないことは注意すべきである。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。一方で、ネットワーク機器や3つのシステムに用いている端末類は、すでに設計寿命を迎えつつある。センサーと同様に、これらの機器も故障に至る前に定期的な交換が望まれる。また、前述の想定外の事態に備え、データロガーやルーターのような基幹となる機器は代替機を保有しておくことも重要である。

### (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り、センサーネットワークに基づく運用に移行した（図13）。

#### ①札幌(SAP)のセンサーネットワーク

観測施設は構内に設置されていることから、研究棟のLANシステムに接続し、ネットワーク化を行った。研究棟から観測タワーまで約1.2kmの距離があるため、2km以上の距離間通信が可能な無線アンテナを、研究棟屋上およびタワーに設置した。この間の通信は外部からのアクセスができないよう設定し、セキュリティの高い暗号化方式を導入するなど、セキュリティにも配慮した。タワー上に設置したアンテナで受信した信号は、その後LANケーブルで小屋内のルータまで到達する。データロガーおよびパソコンはルータに接続され、インターネット経由で森林総研内のネ

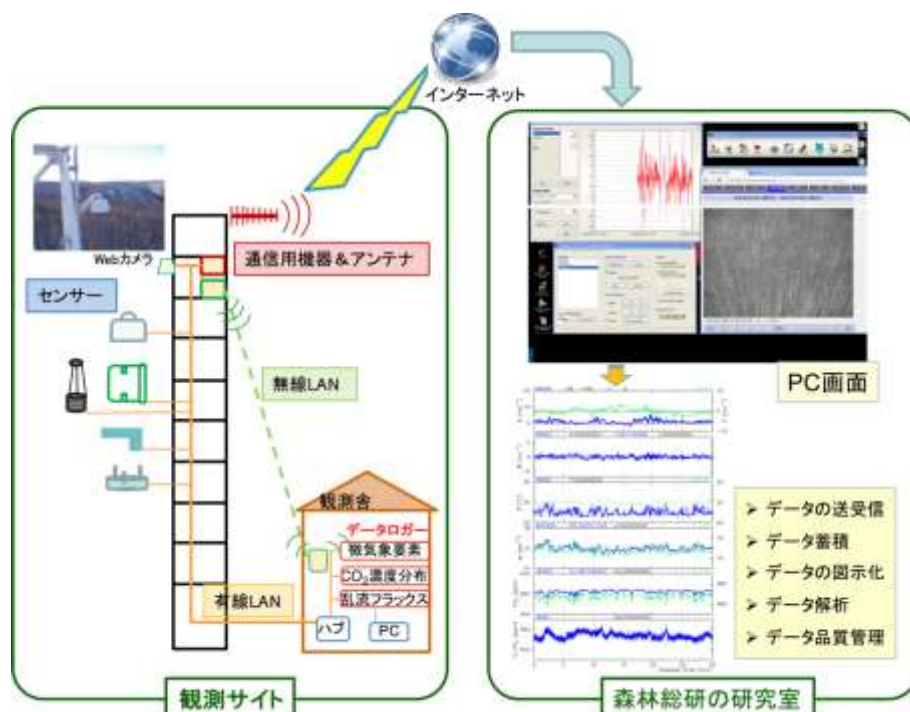


図13 森林総研フラックスネットワークのセンサーネットワーク化による常時モニタリング

ットワークからデータ通信が可能となった。観測システムは1台のデータロガーでコントロールすることは難しいため、乱流フラックス系、微気象電圧系、微気象デジタル系、CO<sub>2</sub>濃度プロファイル系の4つに分けてシステムを再構築した。それぞれの系のロガーの状態、データ回収等は従来のRS232を使った通信で行えるほか、ネットワーク経由でも可能となった。ネットワーク化により、常時研究室等から観測データのチェックが可能となったため、機器等のトラブルに速やかに対応できる体制が整えられた。さらに、積雪・消雪や、樹木の展葉・紅葉・落葉は、森林の炭素収支に大きな影響を与えるため、ネットワークカメラを設置し、定期的に画像データを取得するほか、適宜観測サイトの状況把握を行うことが可能となった。

ネットワーク化に伴い導入したロガーは、デジタル機器接続も容易なため、老朽化しているプロファイル測定用の風速計を、デジタル信号出力の機器に変更した。可動部がないために経年劣化が小さく、1年に1回行っていた交換作業及び校正が不要となった。

ネットワーク化により、現地でのデータ出力の点検や回収作業が省力化されたこと、定期的な機器交換が不要のセンサが導入できたことにより、現地での労力の軽減につながり、作業時間は平均10分短縮された。また、観測システムの動作確認が常時可能となり、停電等によるトラブルに即時対応できるようになったため、システムのネットワーク化を行った2013年以降、落雷による停電等が原因の欠測は大幅に減少した(図14)。ただし、温度計を印可電圧が必要なタイプに変更したことから、センサ本体やロガートラブルが無い場合にも停電時の欠測が解消されなかったが、サイトを代表する高度の気温に対して、別途バッテリー経由で印可電圧を与えることにより、ロガー稼働中は測定できるシステムに変更した。このシステム変更により、2016年はデータの欠測数が一桁となった。安定したモニタリングのため、欠測値補間に必要な日射と気温のみ測定するバックアップシステムも導入したが、一部これらもオンラインしたことから、さらなる労力の軽減がはかられた。

図15は、札幌サイトで取得した2011～2015年の炭素収支である。2004年の台風攪乱以前は、札幌の落葉広葉樹林はカーボンシンクで、少なくとも6月から9月までの4ヶ月間の月平均生態系純

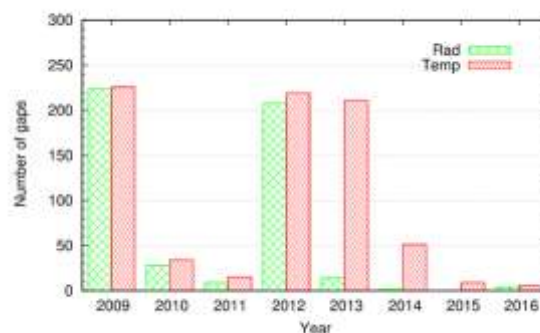


図14 全天日射量(Rad)および気温(Temp)の1年間の欠測データ数(システム変更に伴う欠測データ数は除く)

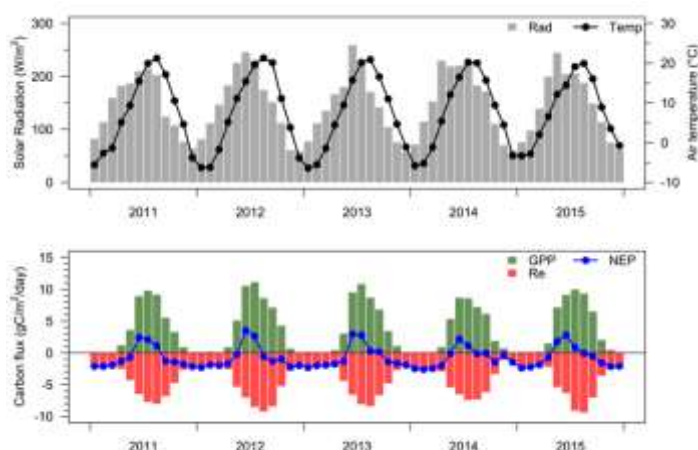


図15 札幌サイトの2011年から2015年までの月平均日射量(Rad)、気温(Temp)、GPP、NEPおよびReの変化

生産量 (NEP) は正であったが、攪乱から10年近く経過した現在も、カーボンソースのまま、月平均NEPが正となるのは6,7月を中心に2-3ヶ月間である。その主な原因は、生態系呼吸量 (Re) が、攪乱以降高く維持されていることが原因である。一方、年間の生態系総生産量 (GPP) は、攪乱以降もわずかな減少で、10年経過した前後には、ほぼ攪乱以前のレベルに回復している。但し、夏季のピークの値は攪乱以前より小さく、その一方、春の樹木の展葉期前後の値が大きくなっている。これは、下層植生の光合成に対する寄与の増大と考えられた。2014年は、夏季の日射量が多かったが、カシワマイマイによる虫害によって、上層木の葉が大幅に減少したことによって、GPPは大幅に減少した。

札幌サイトでは、長期安定的な観測システムの構築により、世界的にも観測例がほとんどない台風攪乱後の回復過程を観測できているほか、自然環境でしばしば起こる虫害などの被害による炭素収支への影響をとらえることができた。

## ②安比 (API) のセンサーネットワーク

安比サイトでは、2012年よりセンサーネットワーク化のための観測システムの更新を開始した。2013年にはフラックス観測システムを、その後に関連する他の観測要素をネットワーク化し、2015年には全観測要素 (85要素) のオンラインモニタリングおよびデータ取得を可能とした。安比におけるセンサーネットワークは、NTTドコモの携帯電話回線を用いている。インターネットを介して、サイトのデータロガー群 (CR3000、CR1000、キャンベル) と直接接続することにより、データの受信を行っている。またWebカメラ (BB-HCM581、パナソニック) の設置により、遠隔地からの現場状況の把握と、開葉・落葉時期などの生態系情報の取得ができています。

これら一連の整備によって、観測の精度を維持しつつ、メンテナンスの大幅な省力化を実現した。その一例として、フラックス観測の欠測時間と観測システムのメンテナンス時間の推移を図16に示した。観測システムの更新とセンサーネットワーク化による常時モニタリングにより、データの欠測時間が大幅に減少したことが分かる。また、サイトでのメンテナンス時間の減少に関しては、サイト内で整備した無線LANによる作業性の向上も大きく寄与している。センサーネットワーク化の利点の一つとして、停電や故障観測機器類を早期発見し、その状況を事前に把握できることが挙げられる。これは欠測時間を短縮し、メンテナンスの時間的労力を大幅に軽減する。図16に示した欠測および作業時間の短縮はこの効果が現れたものといえる。ネットワーク化以降、現在まで3回、機器不調をオンラインにて発見している。このとき、代替機器や修理対策を事前に準備した後に現地作業が行えたため、欠測期間や時間的労力を最小限に抑えることができた。ただ、データ通信端末が一度故障し、約2週間、すべての通信が止まったことがあった。データはバックアップのシステムに記録されていたが、この間、観測の監視は途絶えてしまった。このようなリスクを回避するため、本年度は通信機器のバックアップ体制を整えた。安比サイトは標高が高く、冬期には積雪深が2mを超える多雪山地帯にあるため、センサーネットワークの安定的な運用は、厳しい環境下における観測の精度維持と作業の安全確保にとってきわめて重要なものとなっている。

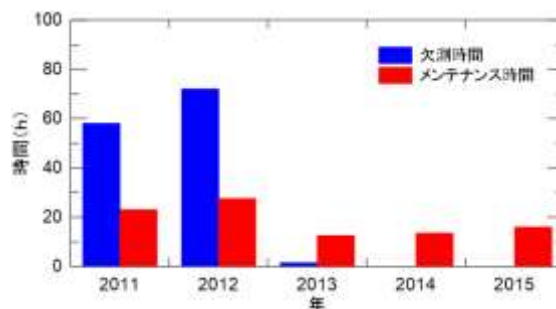


図 16 安比サイトにおける観測の欠測時間とメンテナンス作業時間の推移

現在、安比サイトと森林総合研究所東北支所（岩手県盛岡市）および森林総合研究所本所（茨城県つくば市）間のセンサーネットワークが構築されており、二か所において同様のデータ送受信と監視が行えるようにしてある。通常の日射量受信は、フラックス計測に関するデータは1時間毎、その他の気象データは1日毎とし、これらは東北支所に設置のハードディスクに蓄積される。またこのデータは本所へ転送され、データ時系列の図化やデータ品質の管理が行われている。このようにして得られた観測結果を次に示す。

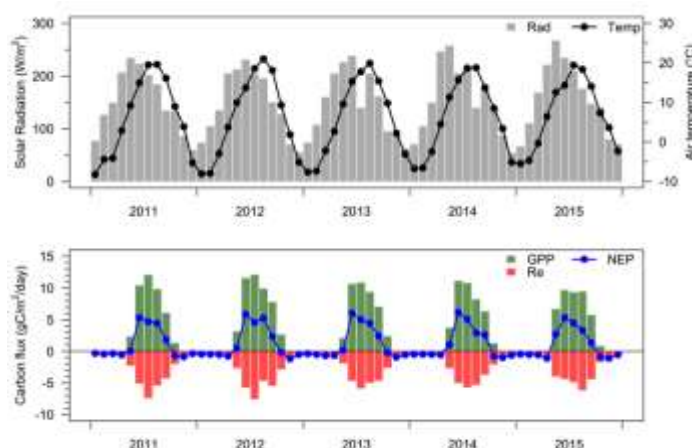


図 17 安比サイトの 2011 年から 2015 年までの月平均日射量(Rad)、気温(Temp)、GPP、NEP および Re の変化

図17は、安比サイトにおけるCO<sub>2</sub>フラックス観測から得られたブナ林の生態系純生産量 (NEP)、生態系総生産量 (GPP)、生態系呼吸量 (Re) の季節変化と、そのときの日射量および気温の様子を示したものである。長期間の安定した連続観測により、この森林生態系の炭素収支の変動を明確に捉えることができている。ブナ林は落葉広葉樹林であるため、5月の開葉とともにGPPが増加し、夏以降減少する。またReは気温や樹木の活動に伴い放出量が増加し、冬期においてもわずかな放出が継続する。NEPはどの年においても6月が最大となり、以降、秋の落葉に向かって減少していく傾向が得られた。また、2011～2015年における年間の正味炭素吸収量は平均で約4tCha<sup>-1</sup>year<sup>-1</sup>であり、このブナ林がCO<sub>2</sub>の吸収源となっていることが分かった。

本研究により、安定した長期観測システムを構築することができた。センサーネットワーク化によって、遠隔地における観測現場の監視とデータ収集が可能となり、観測の精度向上と省力化の両立を実現した。ここで整備されたシステムは、今後の同様の観測における標準システムになると考える。

### ③富士吉田 (FJY) のセンサーネットワーク

富士吉田サイトは山梨県富士吉田市にある山梨県富士山研究所内に設置され、1999年よりエネルギー及びCO<sub>2</sub>のフラックス観測および微気象観測を継続している。サイトは富士山北側の溶岩流上に成立した天然生のアカマツ二次林に位置する。森林樹冠は最上層にアカマツ（地上18-22 m）、中層にコナラ、下層にソヨゴを主たる構成樹種とする複層構造を有する。寒候期12月から4月には積雪が見られる。

本課題開始以前は、研究者が定期的にサイトを訪れ、計測機器の動作状況のチェック、校正、部品交換、予備機との交換などの作業と共に、データの回収を行う体制であった。しかし、現場でデータを回収して初めて分かる不具合も多く、その対応が次の出張に持ち越されることで出張回数が増加し、長期観測を続ける上で大きな負担となっていた。また、山梨県富士山科学研究所（以下、MFRIと略称する）スタッフに毎週、観測小屋内の計測器稼働状況等の簡単なチェックや作



業を依頼していたものの、観測データに基づいて適切な判断ができなかったため、具体的な作業内容を指示できない状況にあった。本プロジェクトではこのような状況を改善するため、センサーネットワーク化によりサイト内LANを構築し、MFRIのLANとサイト内LANを無線LANによって接続することで、森林総合研究所から常時、データを監視できるようにすることを目指し、これを実現した。

無線LAN接続のために、サイトLAN側では観測タワートップ

に、MFRI-LAN側では研究棟室内窓際に、それぞれ屋外用の送受信アンテナ及びアクセスポイントを設置し、安定した接続状況が確保した。また露場にも無線通信機能を備えたデータロガーを設置し、雨量計、積雪深計のデータを無線LANによって回収するシステムを構築した。タワーと観測小屋内外に多数存在するセンサ・データロガーおよびコンピュータ機器類を有線および無線で相互に接続し、本研究プロジェクト期間中に目標としていたサイトLAN化が実現した。現在のサイトLAN状況を模式的に図18に示す。

富士吉田サイトでは大容量通信が可能なMFRIのLANを利用しつつ、データを圧縮して転送することで、乱流データ、5台のネットワーク化されたフェノロジーカメラの画像情報等、遠隔地からの比較的大きなデータ回収を実現している点が特徴的である。その他、タワー頂部に光学式雨量センサーを設置し雨量測定の高精度化を行うとともに、林床にはヒーター付き光合成有効放射量センサーを設置するなどし、モニタリング体制の堅牢化をはかっている。ストレージサービスを利用してロガーに蓄積されたデータは、定期的に研究所内端末へ転送する体制を構築した。サイト訪問時にはバックアップとして、従来と同様に手動操作によるデータ回収も平行して行っていることでデータの収録体制が二重になり、堅牢化した。同時に、消費電力の小さい多くのセンサーやデータロガー、自動復帰の不可能な計測器を、バッテリー電源を介して駆動させ、商用電源が短時間停電した場合にも、途切れることなく観測を続けることができる観測体制を構築した。

実際に、MFRIでは毎年1回、約3時間に渡って停電が発生する電気設備の定期点検があるが、この停電期間中も各種気象要素のデータが連続して取得できるようになった。またオンライン化による最大の恩恵として、前もって不調箇所を特定し、修理用の部品を手配することができるようになり、出張回数を半減させることができたことが挙げられる(図19)。

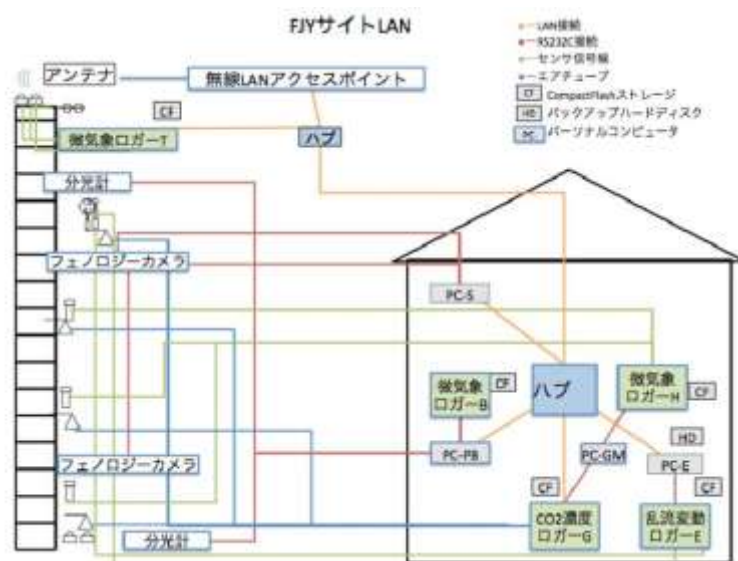


図18 富士吉田サイトのLAN及び観測システム

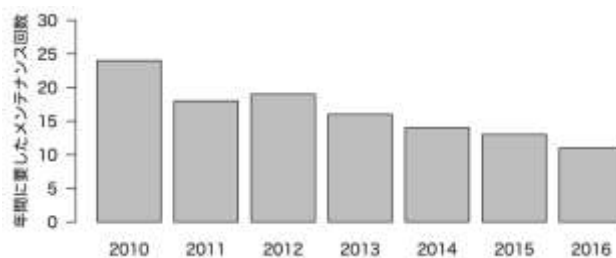


図19 富士吉田サイトのメンテナンスに要した出張回数

また、ネットワークカメラで積雪状況や風倒木による被害状況を正確に把握することが可能になり、安全装備を整えられるようになった。その他の具体的な事例として、二酸化炭素濃度計の電源が急に供給されなくなったことを森林総合研究所からの監視で発見でき、速やかに現地で復旧できた事例があった。この際は、すぐにMFRIの共同研究者に電話で連絡をとり、電源機器の切り替え作業を指示して計測を速やかに復旧させて欠測期間を最短にすることに成功した。

図20に2011～2015年までの月別の気象要素と炭素収支を示す。

#### ④山城(YMS)のセンサーネットワーク

山城サイトは京都府南部の木津川市にあるコナラを優占樹種とする落葉広葉樹林で標高は約220mの複雑地形サイトである。母岩は風化花崗岩で明治期にははげ山であり、その後アカマツによる植生回復が行われたという歴史をもつ。1970年代後半に大規模なマツ枯れによってほとんどのアカマツが枯死し、現在はコナラ（落葉広葉樹）にソヨゴ（常緑広葉樹）がやや混交する森林群落となっている。2017年現在での林齢は約70年である。

山城サイトは電波状態が比較的微弱なためNTT DOCOMOの3G回線(Xi)を利用してWLANによってネットワーク接続構築を行った。外部からの接続に関してはUSB型データ通信端末対応高速モバイルVPNルータ(サン電子Rooster LS)を用い、ダイナミックDNS機能を利用することによりサイト内の個々のデータロガーに独自ドメイン(yamashiro.suncomm.net)を与え、外部から複数の機材にアクセス可能とした。しかし、VPNルータが内部機器にローカルアドレスを与えた状態でWLANの接続状態が悪くなると接続復帰時にルータへの接続は可能であるものの、内部接続された測定機器へのアクセスができなくなり接続が安定しない。そのため本サイトでは、①USB接続されているWLANアダプタを延長してタワー中間部でWLANの電波状態を安定させる、②VPNルータを12時間に一度定期的にリセットをかけて内部接続機器のローカルアドレスを再取得させる、という方策により接続の安定化をはかった。これらの手法は今後、山間部の電波状態の悪い測定サイトでのネットワーク構築において有効であると考えられる。

山城サイトにおいては週に一度の定期点検を行っているためネットワークでのデータモニタによって収録されるデータのクォリティーが大きく変わることはなかった。しかしこの地域は夏期の落雷が多く、データ欠測の多くが落雷による主電源ブレーカーの切断によるものであるため、外部接続による停電の検出には有効である。ネットワーク化によるデータ欠測の増減に関しては、データ欠測の多くが落雷時の誘導雷被害によるメモリー障害であるため停電からの復帰は速やかになったものの欠測データの減少にネットワーク化は大きくは関与しなかった。そのため落雷時のメモリー障害軽減を念頭に一般気象において重要となる日射、温度、湿度、風速に関してデータ収録の二重化を行い基礎気象データについて基本的には無欠測でデータベース化可能な対策を

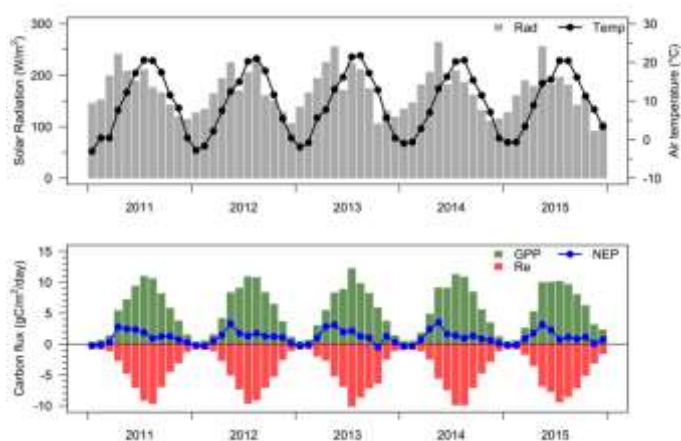


図 20 富士吉田サイトの 2011 年から 2015 年までの月平均日射量(Rad)、気温(Temp)、GPP、NEP および Re の変化



行った。乱流変動法によるCO<sub>2</sub>フラックスモニタリングにおいて本サイトでの問題は春～秋にかけての吸引フィルターへの花粉侵入や吸引口からの雨の混入などの物理的な汚染によるCO<sub>2</sub>濃度のドリフトであった。ネットワーク化に伴い高頻度でCO<sub>2</sub>濃度の確認が可能になったため、2016年より日に1度の赤外線濃度計の自動キャリブレーションを、週に一度のマニュアルキャリブレーションに変更した。週に1度のキャリブレーションへの移行に伴い標準ガスの消費がこれまで約2か月に1本程度であったが約1/3程度への圧縮が可能となった（図21）。

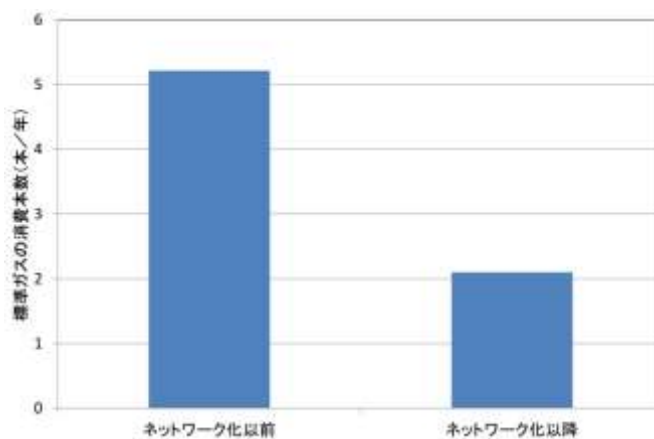


図21 ボンベの交換頻度の変化

得られた2011年から2015年までのCO<sub>2</sub>フラックスおよび気象要素データを図22に示す。優占樹種のコナラの葉展開が5月初旬であるため、各年とも5月からの急速なNEPの上昇が見られるパターンを示す。NEPのピークは展葉直後の6月前半に見られることが、多く気温のピークが見られる8月では呼吸量の上昇によりNEPはむしろ低下する傾向がある。2015年から、現在拡大中のカシナガキイムシによるコナラ枯死被害が発生し、全バイオマスの約10%が2015年から2016年にかけて枯死した。そのため夏期のNEPが2015年にはマイナスに転じている。この傾向は今後拡大し、YassoModelによると2018年から2019年にNEPが最低値を示し、枯死木の発生影響はその後約20年程度継続すると推定される。これに呼応して潜在極相樹種であるアラカシへの樹種転換が加速することが予想されるため、温暖化影響も含め、落葉広葉樹から常緑広葉樹への移行にともなう炭素収支の長期変動モニタリングが重要であると考えられる。

安定継続したデータの収録および、低予算での観測運用のために山城サイトではデータロガーの二重化と放射、風速、温湿度センサーの大幅な見直しを行った。前述の落雷にともなうデータ欠測軽減のために主データロガー

(Campbell社製：CR-1000)に加え副データロガー（Graphtech社製：GL220）を用いた二重化システムを構築した（図23）。主データロガーの欠測時の副データロガーによるデータ補完、相互キャリブレーションに関してはIgor言語（Wavemertics社製）による半自動データベースコードによりデータ整備可能とした。

センサー群の効率化に関しては、本課題期間においては4成分放射

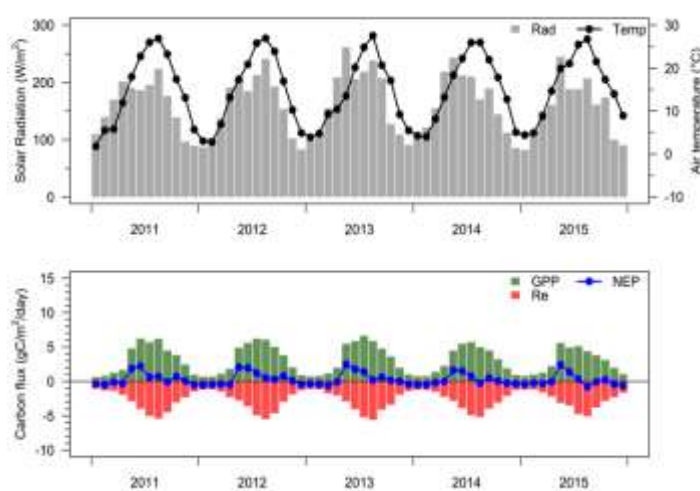


図22 山城サイトの2011年から2015年までの月平均日射量(Rad)、気温(Temp)、GPP、NEPおよびReの変化

計、風速計、温湿度センサーについての見直しを行った。短波放射計 (MR-10: EKO精機) の保守期間終了に伴い2013年に、その後の長期観測時の予算圧縮を念頭においてセカンドグレードの4成分放射計であるNR01(ハクセフラックス社製)を導入しMR-10との並行観測および検定を行った。本センサーは長波放射計のドーム温度測定が省略されて、機器温度を測定する温度センサーが測器全体の1センサーに

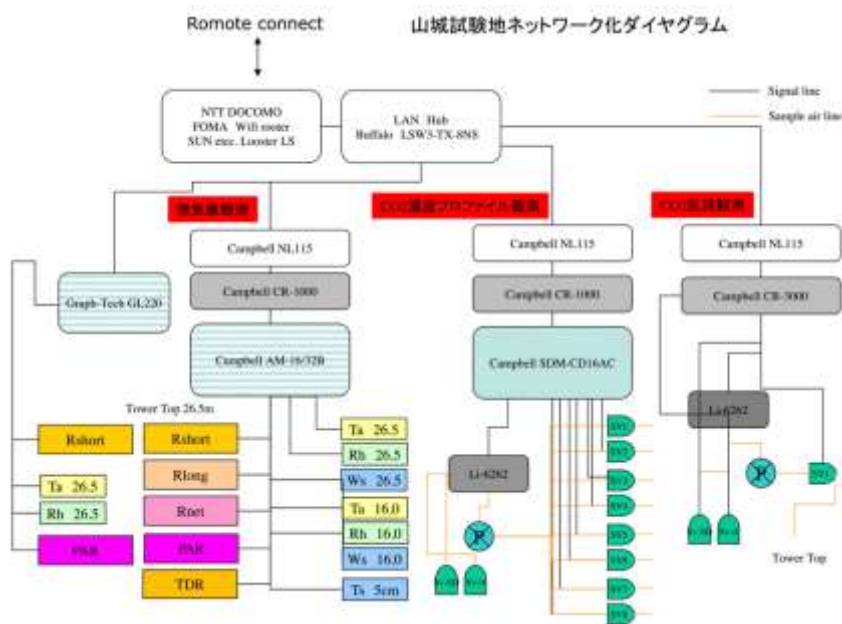


図 23 山城サイトのセンサーネットワーク化大グラム

集中しているなどの簡略化が行われている。そのため、上下センサー温度が極端に異なる場合に精度が落ちる、低太陽高度時の表面センサーの反射影響がやや認められる、夜間の無日射時にも  $1\text{Wm}^{-2}$  程度のわずかなドリフトデータが発生するなど若干のデメリットはある。しかし70万円程度の価格で4成分の放射モニタリングが可能であり、また通常使用における精度の低下が見られなかったため、長期観測経年劣化による機器の取り替えの必要などを考慮に入れると有効な測器であると考えられる。一般気象風速測定に、3杯式風速計 (AG-750、牧野測器) に加えて長期安定測定が可能な超音波式2成分風速計 (MODEL-85000、Young社) の2高度測定を2015年に導入した。本センサーは2成分 (90° 角) の水平風速を超音波で測定することにより平均風速および風向を測定する機器であり、可動部が存在しないため故障が少なく長期安定データ取得に適していた。また低風速時 ( $0.1\text{ms}^{-1}$ ) においても良好な風速測定が可能であること、3杯式風速計と比較しても価格的に大きく変わらないなど長期安定観測において高いメリットがあることがわかった。温湿度センサーに関しては既存のセンサー (Visala社製: HMP-45A) の販売が終了したため新機種 (Visala社製: HMP-155) へ2014年に移行した。本製品はこれまでの温湿度プローブと比較して長期安定と耐候性を謳った実質的には唯一の製品であるため他の選択肢はないが、可能運用期間や精度を今後数年間は確認を行っていく必要がある。

⑤鹿北 (KHW) のセンサーネットワーク

鹿北サイトは中山間地域に位置するため、キャリアーのなかで最も通信エリアが広いNTTドコモの通信網を利用しているMVNOを介してインターネットに接続している。鹿北サイトで利用可能な通信は3G回線でLTEのエリアには入っていないことから通信速度は速いとはいえない。観測地のLANは3G通信モジュールが付加したルータの配下に構築され、LANにネットワーク対応のデータロガーおよびパソコンを接続している。データロガーのデータをパソコンに自動保存し、保存したデータをインターネット上のストレージに一定間隔で同期している。そのクラウドストレージにアクセスすることで観測データの遠隔モニタリングを行っている。また、通信速度の制約から

データ量がそれほど大きくない気象値系およびCO<sub>2</sub>濃度プロファイル系のデータをモニタリングしており、乱流系のデータのモニタリングは行っていない。ネットワーク化によって測定器機のトラブルの発見やその対応に要する時間はネットワーク環境がない時に比べ短縮され、それに伴い欠測期間の縮減にもつながっている。鹿北では平成27年8月25日に九州を通過した台風15号によって林道に敷設された電線が倒木による被害をうけ長期にわたり電源供給が途絶えた。これにより2015年は8月下旬から12月下旬にかけて観測が中断した。

図24は、鹿北サイト(スギ・ヒノキ人工林)で取得した2011～2015年の気温、日射および炭素収支である。鹿北における年平均気温および年平均日射量の5年間の平均はそれぞれ14.6℃および157.1W m<sup>-2</sup>であった。また、年間のNEP、GPPおよびReはそれぞれおおよそ620、1780および1160 gC m<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>程度の量であった。炭素収支の年変動は、GPPおよびReは夏季に大きく冬季に小さい値となったが、その収支であるNEPは4-5月に大きい値をとる傾向が見られた。またNEPは年を通して吸収側で推移した。

#### (4) 国立環境研究所のセンサーネットワーク化

森林における群落スケールでのCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O/熱フラックス観測の長期モニタリングを実施している山梨県富士吉田市の国立環境研究所富士北麓フラックス観測サイトにおいて、約55年の樹齢を持つカラマツの人工林の中にある35mのアルミ製微気象観測タワーの頂部に設置した三次元超音波風速計・赤外吸収型CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O分析計を使用して、微気象学的手法によるCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>Oフラックスの連続観測を継続した。本課題開始に先行して実施された「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」において検証し標準化されたプロトコルに従うとともに、放射関連測器については、この先行課題から整備している国立環境研屋上の較正設備を利用して、引き続き国際的基準に対してトレーサビリティを確保する比較較正体制に基づいて管理を行った。これらの取り組みによりデータの流通性と一貫性の高い観測データを集積した。流通性の高さは、絶対値の整合性の向上に寄与し、多くのサイトを統合した解析の信頼性の向上に寄与する。また、データの一貫性は、気候変動の進行に対する、生態系の応答のトレンドを正確に抽出するために重要である。観測サイトのメンテナンスについては現地の電気技術者による週一回の定期点検に加え、サイトを利用する研究者が月2回程度現地入りし、機器の動作状況の確認や機器の交換や更新、収録体制の整備を行った。

この観測サイトにおいて各種センサーや観測システムから取得される情報を、観測サイト内に構築したデータ収録装置の通信網を整備し統合的なデータセットとして管理し、遠隔地からの監視・制御と迅速なデータ共有を実現ためのネットワークの整備を継続した。時間解像度の高い分光型分析計で観測されるCO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oの変動、三次元超音波風速計により観測される大気の微細な乱流、群落内での植物の活性に影響を与える温湿度や光環境の立体構造に関する温度・湿度・放射

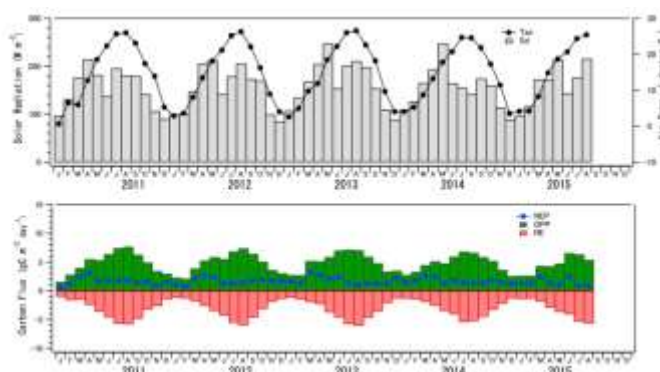


図24 鹿北サイトの2011年から2015年までの月平均日射量(Rad)、気温(Temp)、GPP、NEPおよびReの変化

量の高度分布および群落内での空間分布、土壌内部の温度構造や水分量などの測定について、観測システムの省力化をすすめ、データ収録システムを体系化・ネットワーク化することで、無人で取得された観測データを自動的に遠隔地から回収し、これを解析にするための通信環境の整備を継続した。こうしたネットワーク化により、各センサーの稼働状況の効率的な監視と迅速な異常検出・対応が可能となり、高品質なデータの安定的な取得に貢献した。図25に年毎のネットワークによる異常検出への緊急対応の回数をまとめた。平均して1年間に17回の緊急対応を行っており、いずれも担当研究者からの指示による現地管理人の対応、あるいは担当研究者の現地対応に迅速な対応を行って

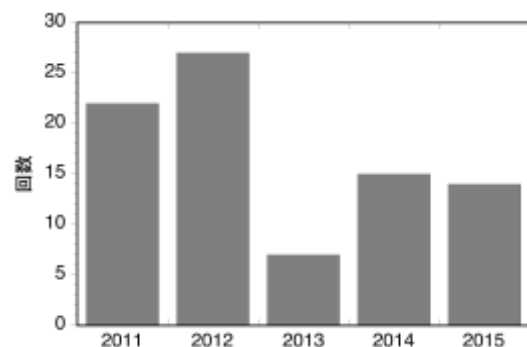


図25 富士北麓サイトでのネットワーク監視による異常検出による緊急対応件数。巡回監視に比べて、詳細で迅速な対応が可能となっており、担当者の判断材料が多いため、的確で効率的な欠測低減効果がある。

おり、定期巡回による監視に比べて、欠測率の低減に繋がっている。検出された主な異常として、落雷によるセンサーの異常、瞬間停電によるPCの異常終了、リター集積による雨量計の動作不良、強風による風速計のアラインメント異常などがあつた。

観測サイトのセンサ群は、(1)乱流計測によるフラックス解析に用いる高時間分解能の観測項目(2)温湿度や放射などの林内鉛直分布の解析に関する観測項目(3)土壌水分・温度や林床での各種放射などの空間分布に関する観測項目の3系統にグループ分けし、(1)については10Hzで30分単位のデータファイルとし、(2)(3)については5分平均値として3つの異なるデータロガーに観測データを集積した。データ収録体制の堅牢化のために、データロガーの並列二重化やPCを介さない直接のネットワーク接続を進めた。各センサ類からデータロガーなどへ収録された観測データはサイト内のPCへの自動データ転送を行い、これを定時にサイト内のネットワーク接続型ファイルサーバーに自動的に転送するなど、データ収録の多重化・堅牢化を行った。このネットワーク接続型ファイルサーバーに集積されたデータはFTP(ファイル転送プロトコル)により、接続先のIPアドレスを利用したフィルタリングを介して研究所などの外部のシステムへの転送を行っており、外部研究機関の観測担当者においてもデータ回収や監視を行っている。

富士北麓観測サイトは落葉樹であるカラマツの人工林であり、森林施業の一貫として定期的な間伐が実施されてきている。2014年の春と2015年の春期にかけて全体で約30%の強度の間伐を実施し、個体密度が大きく減少し、炭素収支にも影響が認められた(図26)。2014年の間伐では、調査区全体のうちタワーなど観測施設周辺を除いたエリアの間伐作業を行い、2015年は観測施設周辺の伐採を行った。フラックス観測データを見ると2014年は間伐前に比べ、GPP, REともに大きく低下しており、GPPは上層植生の葉量の低下の影響が大きく、植物呼吸量の減少がREの減少に繋がったと思われる。2015年の観測データはGPP, REともに間伐直後の2014年に比較して大きく回復している様子が見える。林内の光環境の変化に伴い、間伐後は下層植生の寄与が上昇し、一方で土壌温度の上昇による土壌有機物の分解の促進も影響している可能性がある。今後、林分構造の推移に伴う炭素収支の変動を長期モニタリングにより把握していく予定である。



また、富士北麓サイトにおいては、分光放射計やフェノロジーカメラを利用した生態系の活性の情報の取得を行っている。これらの画像や分光放射データから得られる生態系情報は、人工衛星を使った広域観測のリファレンスデータとして重要であるだけでなく、植物の状態を迅速に数値指標化し、統一的な視点で客観評価に繋がれるという点で利用価値が高い。また、この情報は、今回の研究課題を通して構築してきたセンサーネットワークのインフラのメリットを最大限

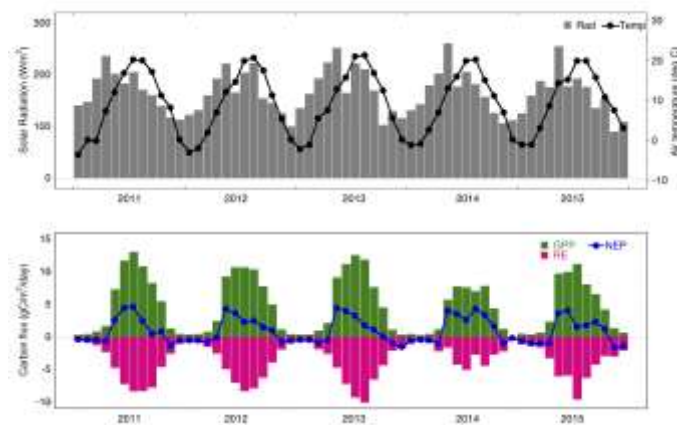


図 26 富士北麓サイトで観測された (上) 気温・全天日射量、(下)NEP, GPP, RE

に活用できる観測要素でもある。富士北麓サイトのタワーに設置された2台の分光放射計（入射光と群落の反射光を観測）を用いて得られた分光反射率から計算された富士北麓サイトのカラマツ林群落のNDVI（正規化差植生指数）の季節変化を図27に示す。NDVIは分光反射の可視光の赤の成分と近赤外成分から計算される数値指標で植生の分布状況や活性に強く関係する。富士北麓サイトはカラマツ林群落であり、展葉・落葉による植生の成長期間が制約されているが、NDVIのモニタリングにより、成長期間の開始や終了を客観的かつ迅速に数値化することが可能である。NDVIは季節性が顕著であり、展葉期の立ち上がりと落葉期の急激な減衰が顕著に見て取れる。また、展葉期と落葉期のタイミングはそれぞれの年に観測された温度と高い関連性があることが分かっており、気候変動の進行によりカラマツの成長期間は大きく影響を受け、炭素収支にも影響を及ぼすことが想定される。

こうした、分光情報により植物の季節性（フェノロジー）を数値評価することで、温度など環境因子などに対する応答特性を統一的視点から関数表現することに繋がり、将来的な気候変動の生態系影響予測に貢献することが可能である。また、こうした画像デバイスや各種センサー類を用いた生態系情報の数値化技術を進めることにより、高温・乾燥・病虫害・日照不足などにより発現する

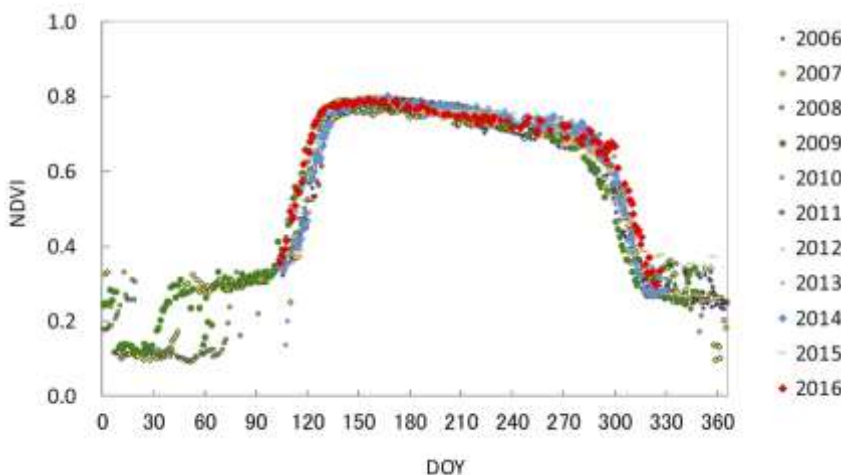


図 27 富士北麓サイトで観測された分光放射のデータから計算された NDVI（正規化差植生指標）。主に葉量などの影響を強く受けており、落葉針葉樹林であるカラマツ林においては、展葉・落葉のタイミングの検出に有効である。年による展葉・落葉の時期の差が顕著に現れており、これは年による温度の違いに強く関係していることが明らかになっている。

植生のストレスや劣化を早期発見することが期待できる。センサーネットを構築したサイト群においては、こうした生態系の異常や劣化の早期発見だけでなく、同時に取得される多様なデータを用いた状況把握と要因解析に繋げることができるため、より迅速で適切な対応に繋げることが可能である。したがって、本課題でセンサーネットを構築し高機能化したサイト群は今後の気候変動の生態系影響評価においても高い利用価値を有し、またその活動を通して集積された技術的知見は、生態系のモニタリング分野において広く貢献することが可能である。

#### (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。各サイトの報告の中で、2011～2015年までの気象要素と炭素収支の季節変化を示した。これら各サイトのデータを集計し、年平均値と図中のバーでデータの最小値から最大値の範囲を示した。日射量と生態系総生産量（図28）、気温と生態系呼吸量（図29）は共にかなり複雑な関係を示した。気象条件とともに、サイトの植生の状況によりGPPやReが強く影響を受けるためと思われる。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（図30）。富士北麓（FHK）は期間内に間伐が行われたため、データの範囲が大きくなった。札幌（SAP）

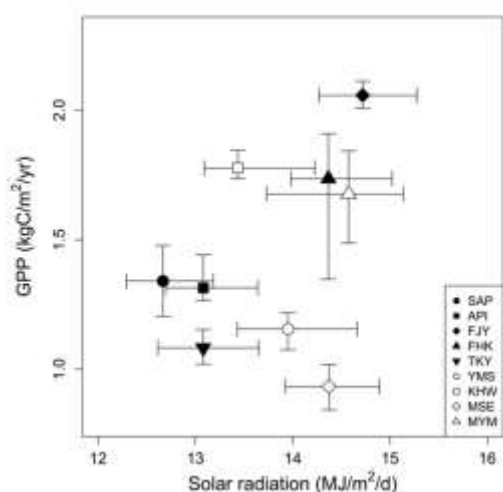


図 28 気温と生態系総生産量の関係

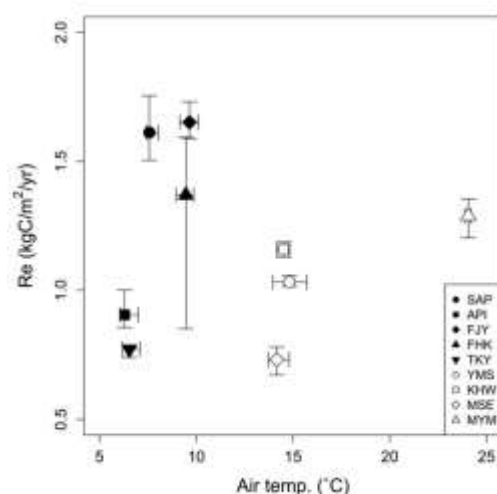


図 29 気温と生態系呼吸量の関係

は森林攪乱から7-11年しか経過しておらず、呼吸量が多い傾向が見られ、全サイトの中で唯一、炭素の放出源（1:1ラインより左上）となっていた。

#### (6) サイト間でのネットワークの連携

センサーネットワーク化が先行して実施された高山や真瀬サイトのシステム情報を利用してその他のサイトのネットワーク化を進める事により、本課題開始から短期間で全サイトのネットワーク化を完成させることができた。課題開始当初は研究機関を横断的に連携できるようなネットワーク化を想定していたが、各機関におけるネットワークのセキュリティ管理が厳しくなりつつあるため難しい状況であ

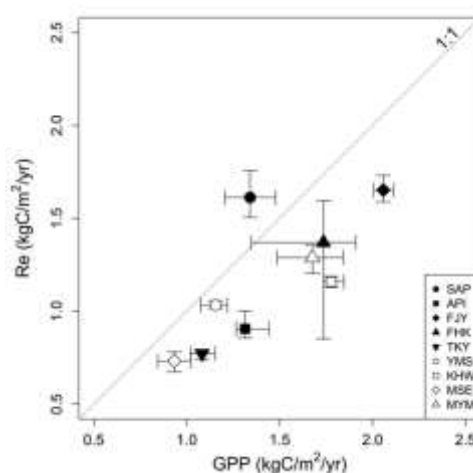


図 30 気温と生態系呼吸量の関係



る。各研究機関内では複数サイトのネットワーク連携も可能な状況にあり、ネットワークを活用した効率的な運用体制は研究機関ごとに確立するのが現実的である。サブテーマ(1)では、ネットワーク化による精緻なデータ取得と省力化された運用の検証を中心に行った。各研究機関内のサイトの連携は、「センサーネットワークを活用した効率的なデータ共有(サブテーマ(2))」の成果であるが、データ取得以後の処理を各機関においては統一的に行うことにより、迅速なデータ公開につながった。

## 5. 本研究により得られた成果

ICTを活用したセンサーネットワーク化を導入した運用結果は、観測の省力化を示唆した。研究拠点からの観測サイトの常時モニタリングは、データの信頼性や欠測の早期発見などに有効で、観測全体の精度の維持に寄与している。産総研高山サイトや農環研真瀬サイトで先駆的に試行されたセンサーネットワーク化の試みは、本課題の3年目で全サイトに拡大された(ただし当初予定していた中国・江都サイトは相手国側の状況により達成不能になった。一方、タイ・メクロンサイトが追加された。)。現在、複数のサイトを運用する産総研、農環研、森林総研ではネットワークにより各機関内でのサイト連携も進んできている。遠隔な山岳地の観測サイトが多い中で、ネットワーク回線さえ確保されれば常時モニタリング可能であり、このようなネットワーク化が観測の省力化と欠測の低減につながる事が明らかになった。一方で、センサーネットワーク化だけでは精緻な観測体制は維持できない事も指摘された。観測には最低限のメンテナンス作業が必要であり、遠隔サイトでは研究協力者の育成が特に重要である。

ネットワーク化されれば、常時モニタリングによるデータの監視やデータの回収が迅速に行われ、省力化とデータの精度向上などが進む。すべてのデータ処理を自動化することは難しいが、観測要素を特定して自動処理が進みつつあり、サブテーマ2とも関連してデータ共有の促進に寄与した。

### [研究成果の発表状況]

#### (1) 誌上発表(学術誌)

- ① 小野圭介:生物と気象, 12, 21-35(2012)  
「地表面フラックス推定のための密度変動補正」
- ② T. Sasai, S. Nakai, Y. Setoyama, K. Ono, S. Kato, M. Mano, K. Murakami, A. Miyata, N. Saigusa, R. Nemani, and K.N. Nasahara: Ecological Modelling, 247, 175-189 (2012)  
“Analysis of the spatial variation in the net ecosystem production of rice paddy fields using the diagnostic biosphere model, BEAMS”
- ③ M. Ueyama, R. Hirata, M. Mano, K. Hamotani, Y. Harazono, T. Hirano, A. Miyata, K. Takagi, and Y. Takahashi: Tellus B, 64, 19048 (2012)  
“Influences of various calculation options on heat, water and carbon fluxes determined by open- and closed-path eddy covariance methods”
- ④ Y. Ryu, D. D. Baldocchi, T. A. Black, M. Detto, B. E. Law, R. Leuning, A. Miyata, M. Reichstein, R. Vargas, C. Ammann, J. Beringer, L. B. Flanagan, L. Gu, L. Hutley, J. Kim, H. McCaughey, E. Moors, S. Rambal, A. D. Richardson, T. Vesala: Agricultural and Forest

- Meteorology, 152, 212–222 (2012)  
 “On the temporal upscaling of evapotranspiration from instantaneous remote sensing measurements to 8-day mean daily-sums”
- ⑤ M. Adachi, T. Maeda, et al.: DIWPA News Letter, 27, 6–7 (2012)  
 “AsiaFlux network: “Bridging ecosystem science to services and stewardship””
- ⑥ J. Thanyapraneedkul, T. Maeda, et al.: Remote Sensing, 4, 3689–3720 (2012)  
 “A Vegetation Index to Estimate Terrestrial Gross Primary Production Capacity for the Global Change Observation Mission–Climate (GCOM–C)/Second–Generation Global Imager (SGLI) Satellite Sensor”
- ⑦ S. Ballav, P. K. Patra, S. Maksyutov, S. Murayama et al.: Journal of the Meteorological Society of Japan, 90, 959–976 (2013)  
 “Simulation of CO<sub>2</sub> concentration over East Asia using regional transport model WRF–CO<sub>2</sub>”
- ⑧ N. Saigusa, T. Maeda, S. Murayama et al.: Journal of Forest Research, 18, 41–48 (2013)  
 “Dataset of CarboEastAsia and uncertainties in the CO<sub>2</sub> budget evaluation caused by different data processing”
- ⑨ K. Ichii, T. Maeda, S. Murayama et al.: Journal of Forest Research, 18, 13–20 (2013)  
 “Site–level model–data synthesis of terrestrial carbon fluxes in the CarboEastAsia eddy–covariance observation network: Toward future modeling efforts”
- ⑩ M. He, S. Murayama et al.: Journal of Forest Research, 18, 31–40 (2013)  
 “Evaluation and improvement of MODIS gross primary productivity in typical forest ecosystems of East Asia based on eddy covariance measurements”
- ⑪ S. Yonemura, S. Murayama, et al.: Journal of Forest Research, 18, 49–59 (2013)  
 “Vertical soil–air CO<sub>2</sub> dynamics at the Takayama deciduous broadleaved forest AsiaFlux site”
- ⑫ 山本晋、村山昌平、近藤裕昭、三枝信子: 天気、60, 5, 359–370 (2013)  
 「森林生態系炭素循環の解明を目指して–20年間の高山(TAKAYAMA)観測とAsiaFluxへの展開–」
- ⑬ S. Ishidoya, S. Murayama, C. Takamura, H. Kondo, N. Saigusa, D. Goto, S. Morimoto, N. Aoki, S. Aoki, and T. Nakazawa: Tellus B, 65, 21120 (2013)  
 “O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> exchange ratios observed in a cool temperate deciduous forest ecosystem of central Japan”
- ⑭ M. Kondo, K. Ichii, M. Ueyama, Y. Mizoguchi, R. Hirata, and N. Saigusa: Ecological Research, 28(5), 893–905 (2013)  
 “The role of carbon flux and biometric observations in constraining a terrestrial ecosystem model: a case study in disturbed forests in East Asia”
- ⑮ K. Ono, M. Mano, G.H. Han, H. Nagai, T. Yamada, Y. Kobayashi, A. Miyata, Y. Inoue, and R. Lal: Land Degradation & Development, DOI: 10.1002/ldr.2211 (2013)  
 “Environmental controls on fallow carbon dioxide flux in a single–crop rice paddy, Japan”
- ⑯ H. Iwata, Y. Kosugi, K. Ono, M. Mano, A. Sakabe, A. Miyata, and K. Takahashi: Boundary–Layer Meteorol., 151, 95–118 (2014)

- “Cross-validation of open-path and closed-path eddy covariance techniques for observing methane fluxes”
- ⑰ Y. Mizoguchi, Y. Yukio, Y. Ohtani, T. Watanabe, Y. Kominami, and K. Yamanoi: *Theoretical and Applied Climatology*, 115, 583–589 (2014)  
 “A practical model to estimate photosynthetically active radiation using general meteorological elements in a temperate humid area, and comparison among models”
- ⑱ 溝口康子、山野井克己、宇都木玄、飛田博順: *北方森林研究*, 62, 89–90 (2014)  
 「札幌森林気象試験地における台風攪乱後の林床光環境の変化」
- ⑲ F. Kondo, K. Ono, M. Mano, A. Miyata, and O. Tsukamoto: *Tellus B*, 66, 23803 (2014)  
 “Experimental evaluation of water vapour cross-sensitivity for accurate eddy covariance measurement of CO<sub>2</sub> flux using open-path CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O gas analysers”
- ⑳ H.M. Noda, H. Murayama, K.N. Nasahara, N. Saigusa, S. Murayama, and H. Koizumi: *Ecological Research*, DOI: 10.1007/s11284-014-1222-6(2014)  
 “Phenology of leaf morphological, photosynthetic, and nitrogen use characteristics of canopy trees in a cool-temperate deciduous broadleaf forest at Takayama, central Japan”
- ㉑ S. Ishidoya, S. Murayama, H. Kondo, N. Saigusa, A.W. Kishimoto-Mo, and S. Yamamoto: *Ecological Research*, DOI: 10.1007/s11284-014-1241-3 (2015)  
 “Observation of O<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> exchange ratio for net turbulent fluxes and its application to forest carbon cycle”
- ㉒ A.W. Kishimoto-Mo, S. Yonemura, M. Uchida, M. Kondo, S. Murayama, and H. Koizumi: *Ecological Research*, DOI: 10.1007/s11284-015-1254-6 (2015)  
 “Contribution of soil moisture to seasonal and annual variations of soil CO<sub>2</sub> efflux in a humid cool-temperate oak-birch forest in central Japan”
- ㉓ G. Sakurai, S. Yonemura, A.W. Kishimoto-Mo, S. Murayama, T. Ohtsuka, and M. Yokozawa: *PLOS ONE*, DOI: 10.1371/journal.pone.0119001(2015)  
 “Inversely Estimating the Vertical Profile of the Soil CO<sub>2</sub> Production Rate in a Deciduous Broadleaf Forest Using a Particle Filtering Method”
- ㉔ 溝口康子、山野井克己: *北方森林研究*, 63, 57–58 (2015)  
 「長期気象観測データからみる札幌の都市化」
- ㉕ Y. Takahashi, N. Saigusa, R. Hirata, R. Ide, Y. Fujinuma T. Okano, and T. Arase: *Journal of Agricultural Meteorology*, 71, 302–317 (2015)  
 “Characteristics of temporal variations in ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in a temperate deciduous needle-leaf forest in foothill of high mountain”
- ㉖ K. Ono and A. Maruyama: *Journal of Agricultural Meteorology*, 71, 318–329 (2015)  
 “Development of an onsite computation scheme of eddy-covariance fluxes”
- ㉗ M. Ishihara, Y. Inoue, K. Ono, M. Shimizu, and S. Matsuura: *Remote Sensing*, 7, 14079–14098 (2015)  
 “The Impact of Sunlight Conditions on the Consistency of Vegetation Indices in Croplands—Effective Usage of Vegetation Indices from Continuous Ground-Based Spectral Measurements”

- ⑳ K. Yamanoi, Y. Mizoguchi, and H. Utsugi: *Biogeosciences*, 12(23), 6837–6851 (2015)  
“Effects of a windthrow disturbance on the carbon balance of a broadleaf deciduous forest in Hokkaido, Japan”
- ㉑ 溝口康子、山野井克己: 森林総合研究所研究報告、14(3): 145–146 (2015)  
「羊ヶ丘実験林における降水量の測定誤差 – 測器の違いによる影響 –」
- ㉒ 譚正洪、于贵瑞、周国逸、韩士杰、夏禹九、前田高尚、小杉緑子、山野井克己、李胜功、太田岳史、平田竜一、安田幸生、中野隆志、小南裕志、北村兼三、溝口康子、廖志勇、赵俊福、杨廉雁: *植物生态学报*(Chinese Journal of Plant Ecology)、39(6), 541–553 (2015)  
「亚洲东部森林的小气候特征: 1. 辐射和能量的平衡 (Microclimate of forests across East Asia biomes: 1. Radiation and energy balance)」
- ㉓ M. Komatsu, K. Yoshimura, S. Fujii, K. Yazaki, H. Tobita, Y. Mizoguchi, T. Miyama, Y. Kominami, Y. Yasuda, K. Yamanoi, and M. Kitao: *Journal of Agricultural Meteorology*, 71, 202–210 (2015)  
“Estimation of ozone concentrations above forests using atmospheric observations at urban air pollution monitoring stations”
- ㉔ T. Mochizuki, Y. Miyazaki, K. Ono, R. Wada, Y. Takahashi, N. Saigusa, K. Kawamura, and A. Tani: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 1–13 (2015)  
“Emissions of biogenic volatile organic compounds and subsequent formation of secondary organic aerosols in a *Larix* campfire forest”
- ㉕ M. Ueyama, R. Takeuchi, Y. Takahashi, R. Ide, M. Ataka, Y. Kosugi, K. Takahashi, N. Saigusa: *Agricultural and Forest Meteorology*, 213, 1–9 (2015)  
“Methane uptake in a temperate forest soil using continuous closed-chamber measurements”
- ㉖ R. Khatun, M. A. Baten, M. S. Hossen, M. B. Khan, A. Miyata: *Research Journal of Recent Sciences*, 5(3), 28–33 (2016)  
“Estimation of Aman rice evapotranspiration using Bowen ratio energy balance method and its comparison with some other methods under Bangladesh condition”
- ㉗ R. Ide, Y. Hirose, Oguma, H., and N. Saigusa: *Agricultural and Forest Meteorology*, 223, 141–150 (2016)  
“Development of a masking device to exclude contaminated reflection during tower-based measurements of spectral reflectance from a vegetation canopy”
- ㉘ 北村兼三、萩野裕章、黒川潮、壁谷直記: 九州森林研究、69: 175–176 (2016)  
「日射量欠測値の補間方法の検討」
- ㉙ Y. Masutomi, K. Ono, M. Mano, A. Maruyama, and A. Miyata: *Geoscientific Model Development*, 9, 4133–4154 (2016)  
“A land surface model combined with a crop growth model for paddy rice (MATCRO-Rice v. 1) - Part 1: Model description”
- ㉚ Y. Masutomi, K. Ono, T. Takimoto, M. Mano, A. Maruyama, and A. Miyata: *Geoscientific Model Development*, 9, 4155–4167 (2016)  
“A land surface model combined with a crop growth model for paddy rice (MATCRO-Rice v. 1) -



Part 2: Model validation”

- ③⑨ Y. Kang, M. Özdoğan, S. C. Zipper, M O. Román, J. Walker, S. Y. Hong, M. Marshall, V. Magliulo, J. Moreno, L. Alonso, A. Miyata, B. Kimball, and S. P. Loheide II: *Remote Sensing*, 8(7), 597, doi:10.3390/rs8070597 (2016)  
 “How universal is the relationship between remotely sensed vegetation indices and crop leaf area index? A global assessment”
- ④⑩ F. Xin, X. Xiao, B. Zhao, A. Miyata, D. Baldocchi, S. Knox, M. Kang, K.-M. Shim, B. Chen, X. Li, J. Wang, J. Dong, and C. Biradar: *Remote Sensing of Environment*, 190, 42–55 (2017)  
 “Modeling gross primary production of paddy rice cropland through analyses of data from CO<sub>2</sub> eddy flux tower sites and MODIS images”
- ④⑪ B. Lee, B., H. Kwon, A. Miyata, S. Lindner, and J. Tenhunen: *Remote Sensing*, 9(1), 20, doi:10.3390/rs9010020 (2017)  
 “Evaluation of a phenology-dependent response method for estimating leaf area index of rice across climate gradients”
- ④⑫ 深山貴文、森下智陽、奥村智憲、宮下俊一郎ほか: *日本森林学会誌*、98(2): 59–64 (2016)  
 「アカマツ林床における $\alpha$ -ピネン放出量の空間分布特性」
- ④⑬ 和田龍一、神林学、高梨 聡、深山貴文ほか: *富士山研究*、10: 1–7 (2016)  
 「山岳道路車両規制が与える大気汚染物質濃度への影響と近隣森林内大気への影響の解明」
- ④⑭ R. Wada, Y. Matsumi, S. Takahashi, Y. Nakai ほか: *Isotopes in Environmental & Health Studies*, 52(6): 603–618 (2016)  
 “In situ measurement of CO<sub>2</sub> and water vapor isotopic compositions at a forest site using mid-infrared laser absorption spectroscopy”
- ④⑮ S. Yonemura, K. Ono, H. Ikawa, W. Kim M. Mano, and A. Miyata: *Journal of Agricultural Meteorology*, 73, (2017)  
 “Comparison of fallow season CO<sub>2</sub> efflux from paddy soil estimated using laboratory incubation with eddy covariance-based flux” (in press)
- (2) 口頭発表 (口頭発表は2016年度分のみ記載)
- ① 石戸谷重之、村山昌平, Prabir K. Patra, 田口彰一, 青木周司, 中澤高清, 森本真司, 後藤大輔, 近藤裕昭: 第17回高山セミナー (2016)  
 「高山サイトにおける大気中酸素濃度の長期観測結果に基づく過去10年間の全球CO<sub>2</sub>収支の推定」
- ② 石戸谷重之、村山昌平, P. K. Patra, 田口彰一, 青木周司, 中澤高清, 森本真司, 後藤大輔, 近藤裕昭, 日本気象学会2016年度春季大会 (2016)  
 「飛騨高山森林サイトにおける大気中酸素濃度観測に基づく2005–2015年の全球炭素収支」(発表予定、予稿受理)
- ③ Y. Mizoguchi and K. Yamanoi: IUFRO Reginal Congress for Asia and Oceania 2016, Beijing China, 2016  
 “Influence of disturbances on GPP in a deciduous broadleaf forest: Extrapolating

- photosynthetic parameters from long-term CO<sub>2</sub> flux monitoring data”
- ④ K. Yamanoi and Y. Mizoguchi: IUFRO Reginal Congress for Asia and Oceania 2016, Beijing China, 2016  
“Geographical variation of forest carbon budget under the changing climate in Japan”
- ⑤ Y. Kominami, T. Miyama, M. Ataka, K. Yoshimura, M. Dannoura, and M. Jomura: IUFRO Reginal Congress for Asia and Oceania 2016, Beijing China, 2016  
“Longterm estimation of carbon balance for warm temperate mixed forest in Japan”
- ⑥ 深山貴文、山野井克己、溝口康子、安田幸生、野口宏典、小南裕志、北村兼三、森下智陽、安宅未央子、吉村謙一、松本一穂、高梨聡、和田龍一、吉藤奈津子、岡野通明:第57回大気環境学会年会 (2016)  
「多様な森林に立地するフラックスタワー群を用いたBVOC観測ネットワークの概要」
- ⑦ 和田龍一、松見豊、高梨聡、深山貴文、中野隆志、望月智貴、谷晃、米村正一郎、植山雅仁、宮崎雄三:第22回大気化学討論会 (2016)  
「富士山麓森林におけるオゾンと窒素酸化物フラックス計測の検討」
- ⑧ 熊谷凌太、和田龍一、高梨聡、深山貴文、中野隆志、谷晃、米村正一郎:日本地球惑星科学連合2016年大会 (2016)  
「富士山麓アカマツ林におけるオゾンフラックス」
- ⑨ 山田遼太、岩田拓記、高梨聡、深山貴文:農業気象関東支部例会 (2016)  
「アカマツ林生態系における樹冠と林床からの水蒸気・CO<sub>2</sub>フラックスへの寄与」
- ⑩ Y. Kominami, K. Yamanoi, K. Kitamura, T. Miyama, Y. Mizoguchi, S. Takanashi, Y. Yasuda, N. Saigusa, U. Takahashi, W. Kim, A. Miyata, K. Ono, S. Ishidoya, H. Kondo, T. Maeda, S. Murayama, S. Panuthai, and T. Archawakom: 日本地球惑星科学連合2016年大会 (2016)  
“Network connection of tower flux measurement data: Toward long term stable flux measurement”
- ⑪ R. Ide, H. Oguma, Y. Hirose, Y. Takahashi, and N. Saigusa: 日本地球惑星科学連合2016年大会 (2016)  
“Phenological changes for 10 years and the influence on ecosystem productivity in a larch forest at the foot of Mt. Fuji”
- ⑫ M. Teramoto, N. Liang, J. Zeng, R. Ide, and N. Saigusa: 日本地球惑星科学連合2016年大会 (2016)  
“Estimation of understory carbon budget and environmental factors influencing on the processes in a larch forest on the northern foot of Mount Fuji”
- ⑬ 高橋善幸、三枝信子、平田竜一、梁乃申、井手玲子、高木健太郎、平野高司:日本地球惑星科学連合2016年大会 (2016)  
“カラマツ林でのCO<sub>2</sub>フラックス長期観測から見る攪乱影響”
- ⑭ 北村兼三:第72回九州森林学会大会 (2016)  
「日射量欠測値の補完方法の検討II 地域的な差異の検討」
- ⑮ 加藤知道、辻本克斗、奈佐原顕郎、秋津朋子、浅沼順、小野圭介、宮田明、間野正美、永井信、村岡裕由、斎藤琢、三枝信子、村山昌平:日本リモートセンシング学会第61回学術講演会

- (2016)  
「SIFの地上観測 - 農地・森林での例」
- ⑩井手玲子、小熊宏之、廣瀬保雄、高橋善幸、三枝信子：日本農業気象学会2016年全国大会 (2016)  
「富士北麓カラマツ林における最近10年間のフェノロジー」
- ⑪ M. Teramoto, N. Liang, J. Zeng, R. Ide, and N. Saigusa: 13th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (2016)  
“Long term monitoring of understory carbon budget and the influence of tree thinning in a larch forest in central Japan”
- ⑫ 寺本宗正、梁乃申、曾継業、井手玲子、三枝信子：日本農業気象学会2016年全国大会 (2016)  
「富士北麓カラマツ林における林床部炭素収支の長期モニタリング」
- ⑬ T. Kato, K. Tsujimoto, K. Nasahara, T. Akitsu, S. Nagai, K. Ono, T. M. Saitoh, H. Muraoka, H. Noda, N. Saigusa, R. Ide, and Y. Takahashi: The 12th International Workshop on Greenhouse Gas Measurements from Space (IWGGMS-12) (2016)  
“Ground-based Network of Long-term Measurement of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence”
- ⑭ 植山雅仁、義川滉太、二口雄介、高橋善幸、高木健太郎、小南裕志、平野高司、矢崎友嗣、岩田拓記、原藺芳信：2016年度日本地球化学会年会 (2016)  
“レーザー分光計を用いた陸域生態系におけるメタンフラックスの連続測定”
- ⑮ 北村兼三：第128回日本森林学会大会 (2017)  
「森林樹冠における水輸送の観測」
- ⑯ H. Ikawa, C.P. Chen, M. Sikma, M. Yoshimoto, H. Sakai, Keisuke Ono, A. Maruyama, T. Hasegawa, H. Nakamura, and T. Watanabe: 日本農業気象学会2017年全国大会 (2017)  
“Trade-offs between production and water use in a high-yielding rice variety under elevated CO<sub>2</sub>”
- ⑰ 岩田拓記、高橋壮太、小野圭介、小杉緑子：日本農業気象学会2017年全国大会 (2017)  
「群落コンダクタンスの計算を基にした地表面熱収支インバランスの考察」
- ⑱ 小野圭介、長谷川利拓、林健太郎、宮田明：日本農業気象学会2017年全国大会 (2017)  
「真瀬サイトにおける夏期気温の特徴と群落光合成の高温応答について」
- ⑲ 間野正美、犬伏和之、須藤重人、アウンゾー・ウー、小野圭介、山本昭範、林田佐智子、V. Ravi: 日本農業気象学会2017年全国大会 (2017)  
「真瀬水田フラックスサイトにおける蒸発散の長期データ解析」
- ⑳ 深山貴文、高梨聡、岡野道明、吉藤奈津子、森下智陽、宮下俊一郎：日本農業気象学会2017年全国大会 (2017)  
「富士北麓の冷温帯アカマツ林における揮発性有機化合物濃度の日変動特性」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

日本農業気象学会賞（普及賞）：宮田 明、大谷 義一、三枝 信子「AsiaFlux の運営を通

じた陸域生態系の炭素動態研究への貢献」2014年3月19日

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

- ①各種フラックスネット (Asia Flux、Japan Flux) の活動を通じて、ネットワーク技術を活用した観測体制の普及に貢献する。
- ②日中韓3カ国環境研究機関代表者会合における観測サイトの視察対応と観測ネットワークの趣旨説明 (2014)
- ③広報誌・書籍による成果の普及
- 小南裕志：森林総合研究所研究情報、110、1 (2013) 「森林の攪乱とCO<sub>2</sub>吸収」
- 中井裕一郎：山林 (2013年7月号、No. 1550、p 60-68、大日本山林会発行) 「森林のフラックス観測」 (林業動静年報-森林保全・環境編)
- 溝口康子：北の森だより、13、4 (2014) 「台風攪乱-CO<sub>2</sub>収支からみた攪乱の影響と回復過程」
- 小南裕志、檀浦正子、吉村謙一、上村真由子、安宅未央子、佐々木隆史、和田佳子、「都市・森・人をつなぐ、炭素をめぐる人と森の関係」第4章、炭素をめぐる人と森の関係、京大出版会ISBN978-4-87698-288-2、229-318 (2014)
- 山野井克己：季刊森林総研、26、8-9 (2015) 「森林と大気の間で吸収・放出されるCO<sub>2</sub>を直接測る」
- 小南裕志、吉村謙一、安宅未央子：砂防学会誌、60(4)、52-55 (2015) 「森林総合研究所関西支所山城試験地における水収支および炭素循環測定」
- 小南裕志：森林総合研究所関西支所研究情報、118、2-3 (2015) 「葉の一生を測るー森林の炭素循環に果たす葉の役割ー」
- 北村兼三、萩野裕章、山野井克己、黒川潮、壁谷直記：森林総合研究所九州支所年報、27、11 (2015) 「鹿北フラックス観測サイトにおける観測システムのネットワーク化」
- 山野井克己、溝口康子、宇都木玄：北方林業、67(2)、70-73 (2016) 「攪乱を受けた森林の炭素収支の長期変動について」
- 溝口康子、山野井克己、安田幸生、大谷義一、渡辺力、小南裕志：森林総合研究所平成28年度版 研究成果選集、36-37 (2016) 「植物が光合成に利用可能な光の量の新たな推定法」
- 高梨聡：砂防学会誌、69(1)、48-51 (2016) 「長期タワーフラックスの現場」
- ④講演会による成果の普及
- 溝口康子：森林総合研究所公開講演会北海道地域成果発表会 (2014年10月17日 男女共同参画センター) 「台風攪乱-CO<sub>2</sub>収支からみた攪乱の影響と回復過程」
- 溝口康子、山野井克己：北の国・森林づくり技術交流発表会特別講演 (2016年2月 北海道大学) 「攪乱が森林のCO<sub>2</sub>収支に与える影響」

## 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

### (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	
北海道支所寒地環境保全研究グループ	山野井克己・溝口康子
森林防災研究領域気象研究室	深山貴文・高梨聡
森林防災研究領域気象害・防災林研究室	安田幸生
関西支所森林環境研究グループ	小南裕志
九州支所山地防災研究グループ	北村兼三
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構	農業環境変動研究センター
気候変動対応研究領域長	宮田明
気候変動対応研究領域影響予測ユニット	金元植
気候変動対応研究領域作物温暖化応答ユニット	小野圭介
国立研究開発法人産業技術総合研究所	
環境管理研究部門大気環境動態評価研究グループ	村山昌平・前田高尚・石戸谷重之
国立研究開発法人国立環境研究所	
地球環境研究センター陸域モニタリング推進室	三枝信子・高橋善幸

平成24～28年度合計予算額 1 1 2, 1 7 5 千円 (全課題分)  
 (うち、平成28年度当初予算額 1 7, 1 6 7 千円 (全課題分))

[要旨] 各サイトでの解析には、各サイト個別の解析プログラムが使用されている。個別の研究で利用するためには十分であるが、データ共有や公開のための手続は試行錯誤で行われている現状にあり、迅速なデータ共有・流通のための障害となっている。データ共有・流通を指向する場合、統合的な処理体系とそれらの自動化を行うことで効率化が図られる。そこで、サブテーマ(1)とも連携して観測、解析からデータ共有までを一貫して行える自動化されたシステム開発を行う。特に一般気象データの処理は自動化に適しており、手続が簡素化されることによりデータ公開が迅速化する。センサーネットワークが先駆的に試行された農研機構では、乱流データのモニタリングおよび解析のためのシステム開発を進めている。一方で、観測データをトラブル等による消失から守るためにネットワークの活用することも進められ、研究機関ごとにインターネット経由で複数のサーバにデータをバックアップするシステムを構築した。保全や共有するデータを共通フォーマットで一元管理することで、担当者に依存しないデータ管理を可能とし、効率良くデータを利用することが可能となった。

各研究所やフラックスネットのデータベースを通じてデータ共有を進めるとともに、広範な地球観測分野でのデータ共有を目指したデータ統合・解析システムDIASに本課題の国内サイトのメタ情報を提供した。

[キーワード] FluxPro、ICT、センサーネット、多重化、バックアップ、共通フォーマット、メ



## タデータ、データ共有

### 1. はじめに

サブテーマ（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」の研究が進捗すれば、遠隔地サイトのデータを、インターネットを通じて自動的に回収することが可能になる。本サブテーマでは、自動回収されたデータを処理し、データベース化するためのシステムを開発する。これにより、観測からデータベースまでの自動化を図り、観測の省力化と迅速なデータ共有・流通が達成される。

また、各観測サイトでは次第に長期データの蓄積が進みつつ有る。サイトの多くでは10年から15年以上にわたりフラックス、気象要素、土壌環境、生態系情報などの観測を実施し、要素数・量ともに膨大な蓄積データがある。原則としてサイトごとに担当者がデータ管理を行っている。しかし、観測システムや担当者の変更にもなると、サイトごとの継続的なデータの管理が難しくなりつつある。また、データを1カ所で保管することは、災害等のトラブル時にデータがすべて消失する危険性がある。このような背景から、担当者に依存しないデータの管理と、データの多重化による安全性の確保を図る必要がある。

### 2. 研究目的

(1) オンラインデータ処理システムFluxProの運用によるフラックスサイトの監視とデータの公開

遠隔地にある観測サイト（海外を含む）からインターネットを経由して回収した観測データの処理を自動化することにより、1)観測サイトの状況の的確な把握、2)観測システムの異常の早期検知による観測データの品質向上と長期データ欠損の防止、3)モニタリングの省力化、を実現する。特に、乱流計測データは一般気象データに比べてデータ量が多く、その処理も煩雑なため、回収したデータを一見しただけではデータの品質を判断できない場合が多い。フラックス値の算出に至る一連のデータ処理を自動化するとともに、さまざまな乱流統計量を図示・視覚化してデータの品質管理を容易にできれば、データ管理の効率は著しく向上する。このために必要なソフトウェアを開発する。

(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

渦相関法は、生態系スケールの平均的なフラックスの連続推定に適した手法であるが、データ処理手順が複雑なため、精度の高い計算を行うためにはサイトから持ち帰った乱流計測生データをPC上で処理する必要がある。 (1) ではインターネットを用いてデータ回収からフラックスの算出までを自動化することを試みるが、回線状況によってはオンラインでの乱流データ回収が困難なサイトもある。また、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えるシステムに対するニーズもある。一方、タワーフラックス観測で利用されるデータロガーは、性能の向上と内蔵プログラミング言語の高度化によって、近年はPCと同様に負荷の大きい計算処理を行うことが可能となりつつある。そこで、複雑な渦相関法の計算と、エラー値の判定・除去をデータロガー上で適用するためのプログラムを開発する。

(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

各サイトで回収した生データは、従来、各サイトの担当者が、物理量変換・フラックス計算・

クオリティチェック等から保存、管理までを行い、必要に応じてデータ提供を行っていた。各担当者個人のみの管理では、長期間安定的にデータの運用が行えない。また、各サイト一箇所に保管することで、データ消失の危険性も高い。これらのリスク軽減およびデータ利用の利便性向上のため、インターネットを利用したデータ保全・管理システムを導入するとともに、システムを活用して各担当者の作業量軽減と研究コミュニティ内外のデータ利用促進をはかる。

#### (4) データ共有・統合に向けてのメタデータ整理とデータ公開

「地球観測の推進戦略」を受けて、フラックス観測のみならず地球観測全体でデータの共有・統合のプロジェクトが進みつつある。各観測サイトではAsiaFlux、FLUXNET及び各研究所のデータベースなどにおいてデータの公開を進めているが、さらに広範な分野間のデータ共有を進める必要がある。

### 3. 研究方法

#### (1) オンラインデータ処理システムFluxProの運用によるフラックスサイトの監視とデータの公開（農研機構農業環境変動研究センターの事例）

インターネット経由で観測サイトから回収したデータの演算処理とその結果を表示するソフトウェア、FluxProを開発した。FluxProは①データ処理部、②演算部、③表示部で構成され、それぞれの機能は以下のとおり。①データ処理部では、研究室内のFluxProサーバに回収された新規データを定期的に取り込み、1日毎の原データ（primary data）ファイルおよび1時間毎の生データ（raw data）ファイルを作成し、データベース化する。この二つのデータセットは、観測サイトの管理者が管理しているサーバにもミラーリングし、データ管理上の安全性を高める。②演算部では、スパイク除去、風速場の座標変換、観測誤差の評価、フラックス値の算出、水蒸気・二酸化炭素フラックスに関わる密度変動補正の順で、生データからフラックス値を求めるまでの一連の処理を行う。③表示部では、乱流計測生データの時系列や乱流統計量、スペクトル・コスペクトル、潜熱、顕熱、二酸化炭素の各フラックスの1時間値の日変化などを図示する。また、得られたフラックス値の信頼性を評価するために、独自に開発した相対観測誤差も表示する。これら一連のデータ処理・解析結果を自宅や観測サイトから確認できるように、すべての結果はインターネット経由で閲覧できる形で提供する。開発したFluxProを運用して、アジアの農地のフラックス観測サイト（一部、森林サイトを含む）のデータの回収・処理の自動化を進め、ネットワーク化を推進する。

#### (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）

データロガー上で適用するプログラムの開発にあたり、まず目的とする精度とそれを達成するための測器とデータ処理法を明らかにする必要がある。本研究では、乱流計測に用いる測器は広範に利用されているオープンパス型システム（超音波風速温度計はCampbell社のCSAT-3、赤外線ガス分析計はLI-COR社のLI-7500シリーズ）を、データロガーには高度なプログラミングが可能なCampbell社のCR1000/3000を選定した。データ処理方法は、原著論文等で求められる精度でフラックスを算出できるものとする。その上で、測器からのデータ回収を停止させることなく、30分ごとフラックスを算出するためのアルゴリズムを開発する。さらに、診断値と呼ばれる測器から発出される測定値の信頼性に関する情報を最大限活用したフラックス品質管理手法を検討する。

また、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を利用して、開発したプログラムの性能を試験する。その際、世界的に普及している2つの異なるプログラムでも同じデータを処理し、各フラックスの出力を比較する。

(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（森林総合研究所フラックスネットの事例）

各サイトからデータを回収後、従来通り各サイト担当者が物理量変換、フラックス計算、クオリティチェック等を行うと同時に、回収した生データのバックアップを複数箇所で行う。各サイト担当者が物理量変換、フラックス計算、クオリティチェック等を行ったデータは、データセンターに集約する。集約データを一要素1ファイルのバイナリデータ（ヘッダに基本情報が含まれる）に変換し、農林水産情報総合センター(AFFPRIT)のネットワークサービスで提供されているサーバの共有フォルダを利用する。

(4) データ共有・統合に向けてのメタデータ整理とデータ公開

各研究所やAsiaFluxなどで運用しているデータベースに新規データを追加して、データ共有を進める。サブテーマ(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」の中に各サイトの近年の観測値を示とともに、過去の観測データのアーカイブをデータベース上で整備する。一方、広範な地球観測分野でのデータ共有に寄与するため、データ統合・解析システムDIASにサイトのメタ情報を登録する。

#### 4. 結果・考察

(1) オンラインデータ処理システムFluxProの運用によるフラックスサイトの監視とデータの公開（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自動モニタリング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サイト（一部、森林サイトを含む）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進めた。本システムでは、フラックスサイトから国内のサーバ(FluxProサーバ)に1時間ごとに転送されるデータを、①原データファイル、②分割データファイル、③計算データファイルに分けて管理している。①は回収する生データを日別に格納するファイルであり、各観測サイトの管理者が指定するサーバと1時間毎のミラーリングが可能である。②はフラックス演算処理の入力データとなる風速3成分、音仮温度、水蒸気濃度、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)濃度、大気圧の1時間分の生データを格納するファイルであり、①と同様にサイト管理者が指定するサーバとのミラーリングが可能である。③は演算処理の結果（出力）を年別に格納するファイルであり、1時間毎に新規データが追加されるので、観測サイト管理者はいつでも最新の結果を参照できる。なお、観測サイト管理者の許可が得られた場合には、計算データファイルの数値データをウェブサイト上で一般にも公開している。

FluxProは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を採用した。すなわち、乱流計測で得られた1時間の時系列データのスパイク除去と座標軸の回転(Double rotation)を行い、鉛直風速との共分散を計算して、密度変動補正を施すという手順である。データの品質管理では、フラックスの相対不確実性(Fractional uncertainty)<sup>1,2)</sup>を指標として採用した。また、フラックスの年間値の算定で必要となる欠損データの補間にはMean diurnal variation法<sup>3)</sup>を適用し、その平均操作では相対不確実性を用いた

加重平均を行っている。現在、FluxProが標準的に提供している出力は、①当該日の1時間毎の乱流計測生データ（風速3成分、音仮温度、水蒸気濃度、CO<sub>2</sub>濃度）の時系列とそれらのスペクトル・コスペクトル、②顕熱、潜熱、CO<sub>2</sub>の各フラックスとその不確実性、風向、摩擦速度、大気安定度の1時間値の時系列（過去1週間）、③日射量や気温、相対湿度などの主要な気象要素の1時間値の時系列

表1 ウェブサイトで公開している FluxPro の出力

図の名称	図の内容	表示 区間
Series	風速3成分、音仮温度、水蒸気・CO <sub>2</sub> 密度の時系列、自己・相互相関係数	1時間
Spectrum	乱流センサで計測した各変数のスペクトルおよびコスペクトル	1時間
Week	顕熱、潜熱、CO <sub>2</sub> の各フラックス、風向、大気安定度、摩擦速度の時系列	1週間
Epsilon	フラックス1時間値とその相対誤差との散布図、相対誤差の頻度分布	1週間
Sigma	フラックスの1時間値とその不確実性の散布図	1週間
Variability	積分乱流特性および相関係数と大気安定度との散布図	1週間
Variation	フラックスの1時間値の平均日変化、および時刻毎のデータ取得率	1週間
Radiation	短波・長放射量(入射、反射)、正味放射量、光合成有効放射量の1時間値	1週間
Meteorology	気象センサで計測した気温、群落表面温度、相対湿度、風向・風速、水蒸気圧、降水量の1時間値の時系列	1週間
EC	乱流センサで計測した風速、音仮温度、水蒸気・CO <sub>2</sub> 密度の1時間値の時系列	1週間
Windrose	風配図	1週間
Trend	顕熱フラックス、潜熱フラックス(蒸発散量)、CO <sub>2</sub> フラックスの月積算値の時系列、顕熱、潜熱、CO <sub>2</sub> の各フラックスの1時間値の時系列とデータ取得率	1年間
Contour	顕熱および潜熱フラックスの1時間値の分布図(時・通日の2次元配図)	1年間

（過去1週間）、④顕熱、潜熱、CO<sub>2</sub>の各フラックスについて、過去1週間の1時間値から計算した平均日変化、⑤当該年の顕熱、潜熱、CO<sub>2</sub>の各フラックスの月別積算値と、各フラックスの1時間値の年間分布である（表1）。これらの結果はすべて図示して、ウェブサイト上で一般に公開している（<http://www.naro.affrc.go.jp/org/niaes/amen/fluxpro/>）。たとえば、Spectrumでは時系列データのスペクトル解析の結果が図示され（図1）、観測されたスペクトルやコスペクトルの慣性小領域（Inertial subrange）内での傾きやコヒーレンスの値を確認できる。また、Trendでは過去1年間のフラックス値を誤差情報とともに示すことにより（図2）、観測値を過去のデータと容易に比較でき、利用者の利便性を高めている。FluxProによるフラックス演算処理と公開データの詳細については引用文献<sup>4)</sup>を参照していただきたい。

FluxProを利用してデータ処理を行っている観測サイトは、2017年3月末現在で、日本国内7地点（真瀬サイトを含む）、韓国3地点、タイ7地点、バングラデシュ1地点（マイメンシンサイト）の計18地点であり、このうちの10地点ではFluxProをオンラインで運用している（図3）。発展途上国にある遠隔地サイトであっても、通信サービスの利用環境が整えば、FluxProを利用することによ

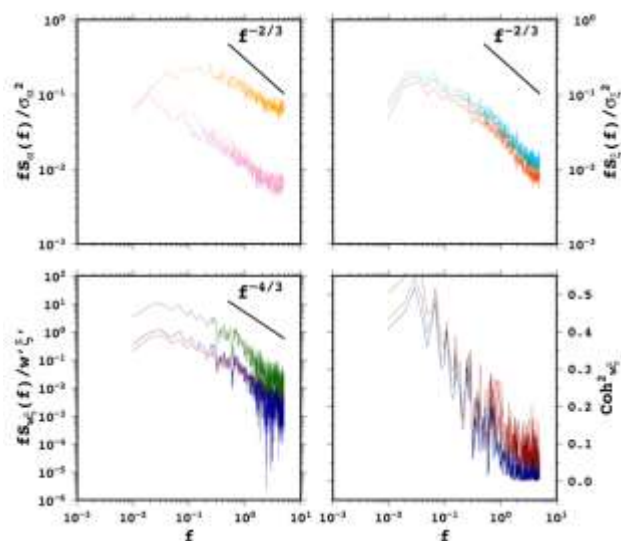


図1 スペクトル解析の結果（Spectrum）の表示例（バングラデシュ・マイメンシンサイト）。風速の東西、南北、鉛直各成分のパワースペクトル（左上）、スカラー量（温度、水蒸気濃度、CO<sub>2</sub>濃度）のパワースペクトル（右上）、風速の鉛直成分と各スカラー量とのコスペクトル（左下）、風速の鉛直成分と各スカラー量との振幅2乗コヒーレンス（右下）。

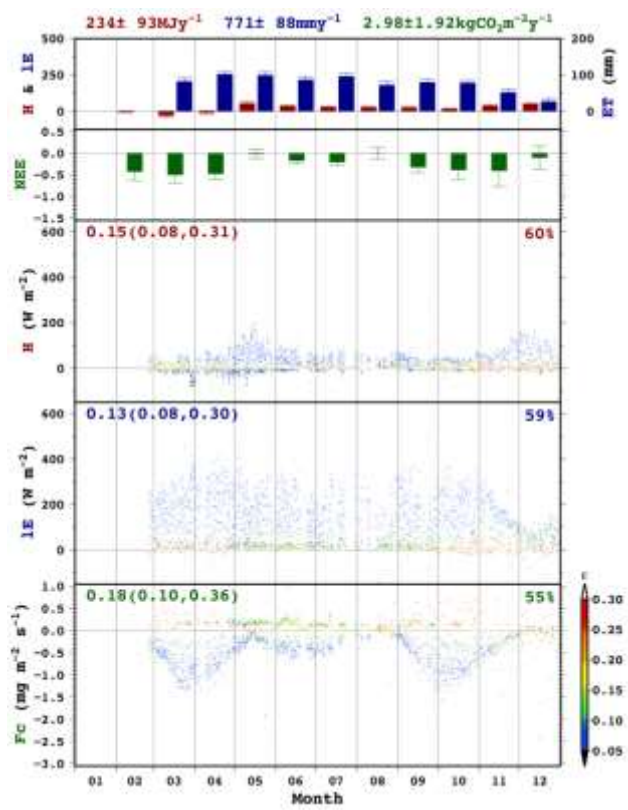


図2 フラックス値の時系列 (Trend) の表示例 (バングラデシュ・マイメンシンサイト)。上段から順に、顕熱フラックス (H) および潜熱フラックス (IE) の月平均値 (右軸は月蒸発散量 (ET) への換算値)、純生態系 CO<sub>2</sub> 交換量 (NEE) の月平均値、H、IE、および CO<sub>2</sub> フラックスの 1 時間値。フラックスの 1 時間値は相対誤差 (ε) で色分けして表示し、各図の左上部の数値は年間における ε の中央値および第 1、第 3 四分位数、右上部の数値は有効データの取得率。図の枠外上部の数値は、左から順に、H、ET および NEE の年間積算値とその誤差。いずれも、過去 1 年間のデータを示す。

り、観測データの回収・処理とその結果の提供までの一連の作業を自動化することが可能となった。中間サーバを経由せずに、観測サイトのデータロガーからFluxProサーバにデータを直接回収する観測サイトでは、データ回収時刻から5分後 (有線モデムの場合) ないし17分後 (無線モデムの場合) に、自動処理の結果をウェブサイトで閲覧することができる (時間はネットワークの混雑度によって多少変動する)。それぞれの観測サイトの責任者や関係者は、ウェブサイトで最新の観測結果をほぼリアルタイムで閲覧することができ、観測サイトの状況の監視や測器の異常の早

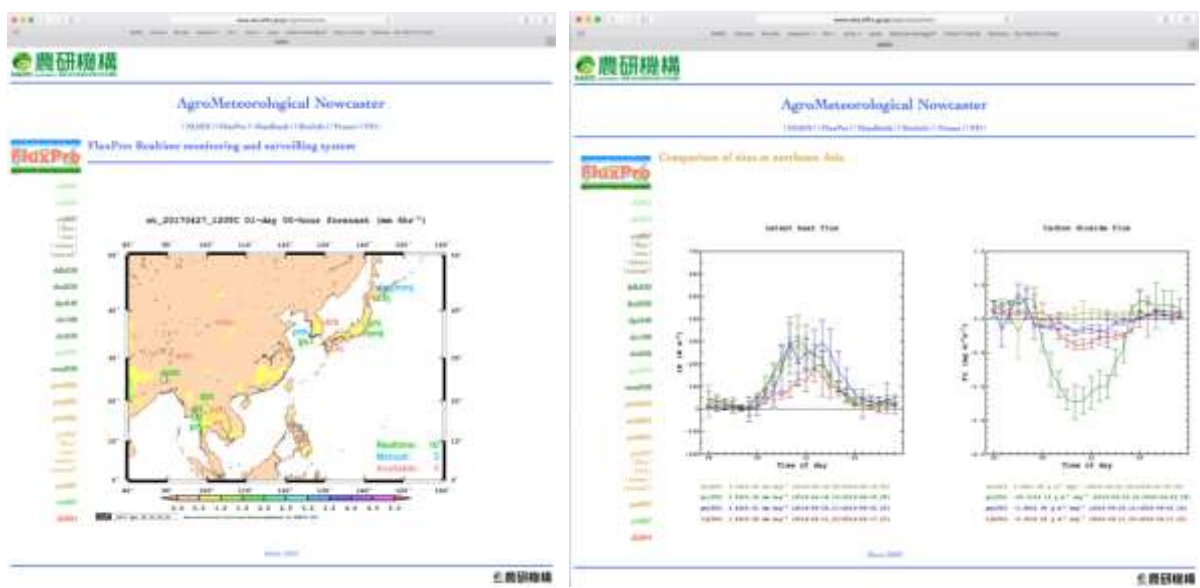


図3 オンラインデータ処理システムFluxProの運用ウェブサイト



期検知に活用している。また、複数の観測サイトから回収したデータを同一のプログラムで処理することにより、アジアの異なる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(図3)。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、FluxProのオンライン運用がなされていない8地点のうちの3地点は、現在はオフラインで運用しており、商業用通信サービスの利用環境が整い次第、オンライン運用に移行する予定である。また、すでに観測を終了した5地点については、既存の観測データをオフラインで処理し、その結果をウェブサイトで公開する計画である。

以上のように、本研究ではインターネットを利用したデータ回収から公開までを自動化するシステムを構築し、その運用を行ってきたが、最後に近年、強化が求められているネットワークセキュリティ対策について報告する。国内の研究機関や大学の公開サーバにおけるセキュリティ対策はますます強化され、通信や演算のパフォーマンスよりもセキュリティを優先したネットワークサーバの構築が求められる。そこで、インターネットを通じてデータの回収や公開を行なっている FluxProにおいても、2016年度に次のようなセキュリティ対策を実施した。

①外部サーバからのデータ回収における Secure Shell (SSH) 使用制限への対処。FluxProのアプリケーションサーバが外部サーバにある観測データを回収する際には、セキュリティープロトコルの一つであるSSHを利用する。しかし、ほとんどの研究機関ではセキュリティ確保のため、SSH の利用が制限されており、研究機関に使用許可を得ればSSHを利用できる場合でも、許可申請手続きや運用開始後のセキュリティの維持管理がサーバ管理者の負担となりかねない。そこで、外部サーバで観測データの管理を行っている観測サイトに対し、Hypertext Transfer Protocol (HTTP) を用いて観測データの公開サイトを開設し、公開用の観測データファイルを1時間毎に更新するような設定を依頼した。FluxProアプリケーションサーバは、この観測サイトの公開サイトからrsyncコマンドを用いて観測データを回収する。なお、ネットワークセキュリティ上、観測サイト側でHTTP を用いた観測データの公開サイトを開設することが困難な場合は、FluxProアプリケーションサーバ から観測サイトのデータロガーに直接アクセスして、観測データを回収する方法を採用した(引用文献4)の「2.1 G system for gathering EC measurements」参照)。

②FluxProのデータ公開サイトの機関公式公開サーバへの移設。一般に、研究機関内で独自に公開サーバを構築・管理するためには、それぞれの研究機関が定めたネットワークセキュリティ基準を満たす必要がある。すなわち、ネットワーク管理ソフトウェアの定期的なアップデートや緊急時対応に加えて、教育訓練の受講、定期的なセキュリティ検査で指摘された問題点の解消、セキュリティ強化のための新たな要請事項への対処などである。このように、ネットワークセキュリティを専門としない研究者には、独自公開サーバの維持管理は大きな負担となる。そこで、FluxProのデータ公開サイトを、独自公開サーバから専門家によるセキュリティ管理が組織的に行われている所属機関の公式公開サーバに移設した。FluxProアプリケーションサーバは1時間毎に機関公式公開サーバへ接続し、SSH を用いて更新データの自動アップデートを行っている。また、SSH設定が許可されていない外部サーバから機関公式公開サーバに更新データをアップロードする場合には、sshpass コマンドを利用することでアクセス毎のユーザー認証を回避し、1時間毎の自動アップロードが可能となった。

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のようなインターネットを利用したシステムの運営を継続するためには、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）

開発したプログラムは計測ルーチンと計算ルーチンで構成した。計測ルーチンでは、渦相関法の適用に必要な大気中の風速とガス濃度の連続測定データを0.1秒毎に測器から取得する。計算ルーチンでは、計測ルーチンで取得した風速とガス濃度のデータに対して30分毎に渦相関法を適用し、各フラックスを算出する。補正については、精度と計算負荷のバランスを十分に考慮して、最適なものを採用した（図4）。世界的に普及しているプログラム（PC上で動作）と比較して、本プログラムは十分な精度でフラックスを算出し、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。本プログラムをOn-site computation scheme of eddy covariance fluxes for CR loggers (OsEddy) と名付け、要望に応じて提供することとした。今後は、他のメーカー・モデルの測器にも対応させるべく改良を行っていく予定である。

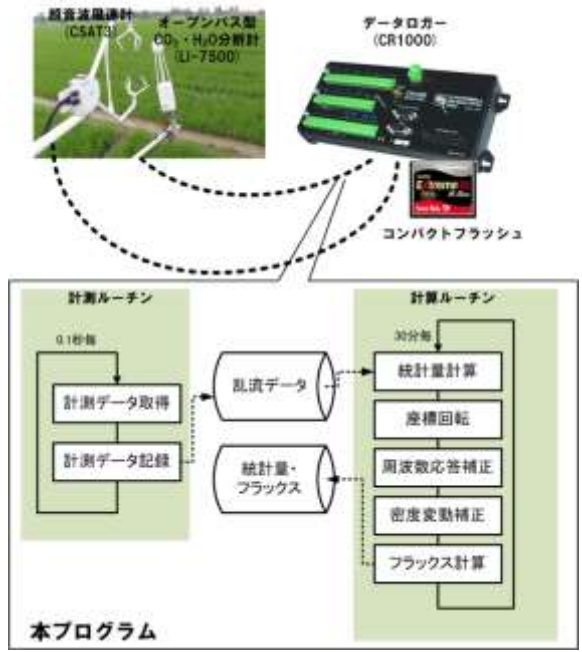


図4 OsEddyの概要

(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（森林総合研究所フラックスネットの事例）

森林総研フラックスネットの5サイトではすでに長期の観測データが保管されている。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（図5）の運用を行った。インターネットを経由したデータ交換を頻繁に行うに伴い、アクセス制限の範囲および転送プロトコルの見直しを行い、デ

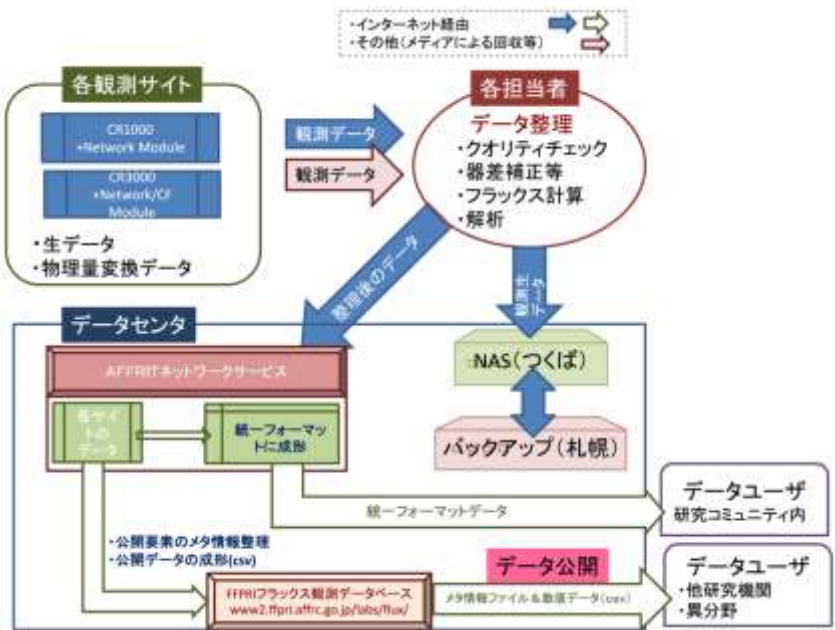


図5 森林総合研究所のデータ管理概念

ータセキュリティを高めた。

さらに、農林水産研究情報総合センター(AFFRIT)のネットワークサービスの一環として提供されているサーバの共有フォルダの活用を継続し、統一フォーマットで成形された観測データの保管を行った。このサービスの利用によって、安全性が高まり利便性が確保され、研究コミュニティ内のデータ利用が促進されている。また、外部へのデータ提供のために設けられた公開データベースへの移行も、この統一フォーマットデータをベースに行うことで、作業の効率化がはかられた。

#### (4) データ共有・統合に向けてのメタデータ整理とデータ公開

本課題開始に先行して実施された「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」の成果として各研究機関のサイトではデータ公開を行ってきた。本課題においても、センサーネットワーク化や自動解析化の成果として、さらに迅速で精緻なデータの公開を進めた。データ公開の方法と範囲は機関やサイトごとに様々であるが、どのサイトも早期の公開を目指し逐次公開範囲を拡大している(表2)。最近の観測結果はサブテーマ(1)の各サイトの報告の中で示した。また、データのメタ情報が適切に管理されることも非常に重要で、データの公開に合わせて更新した。主な公開先は各研究所、AsiaFlux、FLUXNETなどのデータベースである。さらに、地球観測の推進戦略の具体化として広範な地球観測データの統合を目指して実施されているプロジェクト「データ統合・解析システムDIAS」へ国内サイトのメタ情報を提供した。各データベースは相互にリンクされており、データの流通性は

表2 データの公開状況

	森林総合研究所					国立環境研究所
	札幌 SAP	安比 API	富士吉田 FJY	山城 YMS	農北 KHW	富士北麓 FHK
研究所DB	2000-12 <sup>1)</sup>	2000-11 <sup>1)</sup>	2000-11 <sup>1)</sup>	2000-11 <sup>1)</sup>	2000-08 <sup>1)</sup>	2006-2010の 一部項目 <sup>2)</sup>
AsiaFluxDB <sup>4)</sup>	—	—	2000	—	—	2006-2009 (2006-13:更新準備)
DIAS <sup>5)</sup>	メタ情報を提供					メタ情報を提供
その他	JalTER <sup>7)</sup> 準サイト(札幌、富士吉田、山城)					FLUXNET <sup>10)</sup> に2006-09を提供 JalTER <sup>7)</sup> 準サイト

	農業環境技術研究所		産業技術総合研究所		
	真潮 MSE	マイメンシン MYM	高山 TKY	サケラート SKR	メクロン MKL
研究所DB	2001-05 <sup>2)</sup> (2006-09:準備中)	— (2007-09:準備中)	1993-2009 <sup>3)</sup>	—	—
AsiaFluxDB <sup>4)</sup>	2001-06	— (2007-09:準備中)	1993-2007	2001-04	2003-04
DIAS <sup>5)</sup>	—		メタ情報を提供		
その他	FLUXNET <sup>10)</sup> に2002-06を提供 CEOPつくばリファレンス サイト <sup>6)</sup> :2007-10:一部公開)		CO <sub>2</sub> 濃度 (WMO/WDCGG <sup>8)</sup> : 1993-2008) JalTER <sup>7)</sup> コアサイト		

1)FFPRI FluxNet データベース([http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/data\\_j.html](http://www2.ffpri.affrc.go.jp/labs/flux/data_j.html))

2)エコシステムデータベース(<http://ecomdb.nies.affrc.go.jp/>)

3)共同研究者対象(IP閉鎖によりユーザー個別に対応)

4)AsiaFlux Database(<https://db.cger.nies.go.jp/asiafluxdb/>)

5)CEOPつくばリファレンスサイト([http://www.geomv.tsukuba.ac.jp/~ceoptskuba/j/index\\_j.html](http://www.geomv.tsukuba.ac.jp/~ceoptskuba/j/index_j.html))

6)世界気象機関温室効果ガス世界資料センター(WMO/WDCGG)DB (<http://gaw.kishou.go.jp/wdogg/>)

7)長期生態学研究ネットワーク Japan Long Term Ecological Research (<http://www.jalter.org/>)

8)地球環境情報統合プログラム(<http://www.editoria.u-tokyo.ac.jp/projects/dias/>)

9)地球環境データベース(<http://db.cger.nies.go.jp/portal/data?Project=1000000000>)

10)FLUXNET(<http://fluxnet.ornl.gov/>)

さらに向上した。

## 5. 本研究により得られた成果

センサーネットワークの利点を活かすためには観測からデータ回収、解析、データベースまでの一連の処理を自動化できれば効率的である。現状は観測要素などのサイトごとの違いが大きいことに加え、品質管理・保証されたフラックスデータの解析などは自動化しづらい手続きを多く含んでいる。そのような状況下で、農研機構で運用している“FluxPro”はセンサーネットワークを使って、一連の解析結果の表示と公開のためのシステムが作られている。本プロジェクト内だけでなく、農研機構と関係のある農耕地で、モニタリングと解析システムとして多数の運用実績を示している。さらに、ロガー上でデータ解析を行う試みは、観測システムをコンパクトにして省力化につながる。開発されたこれらの手続きは、センサーネットワークの活用方法として導入可能なシステムとなり得る。また、アジア地域を中心とする広範なフラックス観測のシステム運営に波及できる技術として期待される。

また、各研究所のネットワーク化の概念図にも示されているように、データ回収の自動化の手続きの中にバックアップサーバーを立ち上げる事も可能となる。多地点に分散させて設置したバックアップサーバーを同期せることにより、研究機関ごとにデータ保全が進んだ。

センサーネットワーク化のための機器整備により、既設の老朽化した機器の更新が進んだ。機器の耐久年数にも依存するが、ネットワークに対応したことにより堅牢なシステム構成に移行できた。センサーネットワーク化と自動化により、長期にわたる陸域生態系の炭素循環観測の継続とデータ共有が進むことが期待される。

## 6. 引用文献

- 1) W. Kim, J. Cho, D. Komori, M. Aoki, M. Yokozawa, S. Kanae, and T. Oki: Hydrological Research Letters, 5, 73-77 (2011)  
“Tolerance of eddy covariance flux measurement”
- 2) W. Kim, D. Komori, and J. Cho: Journal of Agricultural Meteorology, 67, 163-171 (2011)  
“The characteristic of fractional uncertainty on eddy covariance measurement”
- 3) E. Falge and coauthors: Agricultural and Forest Meteorology, 107, 43-69 (2001)  
“Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange”
- 4) W. Kim, A. Miyata, A. Ashraf, A. Maruyama, A. Chidthaisong, C. Jaikaeo, D. Komori, E. Ikoma, G. Sakurai, H.-H. Seoh, I.C. Son, J. Cho, J. Kim, K. Ono, K. Nusit, K.H. Moon, M. Mano, M. Yokozawa, Md.A. Baten, M. Sanwangsri, M. Toda, N. Chaun, P. Polsan, S. Yonemura, S.-D. Kim, S. Miyazaki, S. Kanae, S. Phonkasi, S. Kammales, T. Takimoto, T. Nakai, T. Iizumi, V. Surapipith, W. Sonklin, Y. Lee, Y. Inoue, Y. Kim, and T. Oki: Journal of Agricultural Meteorology, 71, 32-50. (2015)  
“FluxPro as a realtime monitoring and surveilling system for eddy covariance flux measurement”

[研究成果の発表状況]

### (1) 誌上発表 (学術誌)

- ① W. Kim, A. Miyata, A. Ashraf, A. Maruyama, A. Chidthaisong, C. Jaikaeo, D. Komori, E. Ikoma,

G. Sakurai, H.-H. Seoh, I. C. Son, J. Cho, J. Kim, K. Ono, K. Nusit, K. H. Moon, M. Mano, M. Yokozawa, Md. A. Baten, M. Sanwangsri, M. Toda, N. Chaun, P. Polsan, S. Yonemura, S.-D. Kim, S. Miyazaki, S. Kanae, S. Phonkasi, S. Kammales, T. Takimoto, T. Nakai, T. Iizumi, V. Surapipith, W. Sonklin, Y. Lee, Y. Inoue, Y. Kim and T. Oki: *Journal of Agricultural Meteorology*, 71, 32-50. (2015)

“FluxPro as a realtime monitoring and surveilling system for eddy covariance flux measurement.”

② K. Ono and A. Maruyama: *Journal of Agricultural Meteorology*, 71, 318-329 (2015)

“Development of an onsite computation scheme of eddy-covariance fluxes”

(2) 口頭発表

① W. Kim : RCN FORECAST New Investigators Conference 2012 -New perspectives on data assimilation in global change science-, Woods Hole, MA, USA (2012)

“FluxPro as a realtime data assimilation system”

② M.Ueyama, K.Ichii, N.Saigusa, T.Hirano, M.Alberto, J.Asanuma, S.J.Han, Y.J.Hsia, M.Kang, J. Kim, K.Kitamura, Y.Kominami, H.Kondo, A.Kotani, Y.Kosugi, S.G.Li, Y.N.Li, T. Maeda, Y.Matsuura, A.Miyata, Y.Mizoguchi, T.Ohta, T.Shimizu, K.Takagi, I.Tamagawa, Y.Tang, H.Wang, Y.Yasuda, G.R.Yu, Y.P.Zhang, F.H.Zhao : 11th AsiaFlux Workshop, Seoul, Korea (2013)

“An integrated FLUX database for Asia”

③ K.Ichii, M.Ueyama, M.Kondo, A.Ito, T.Sasai, H.Sato, T.Hirano, J.Kim, N.Saigusa, M.Alberto, J.Asanuma, M.S.Bret-Harte, C.Edgar, S.E.Euskirchen, S.J.Han, Y.J.Hsia, M.Kang, K.Kitamura, Y. Kominami, H.Kondo, A.Kotani, Y.Kosugi, S.G.Li, Y.N.Li, T.Maeda, Y.Matsuura, A.Miyata, Y.Mizoguchi, T.Ohta, T. M.Saitoh, T.Shimizu, K.Takagi, Y.Tang, H.Wang, Y.Yasuda, G.R.Yu, Y.P.Zhang, F.H.Zhao, N.Zimov, S.A.Zimov : 11th AsiaFlux Workshop, Seoul, Korea (2013)

“Application of an integrated flux database for Asia: empirical upscaling and model evaluation”

④ W. Kim: The AsiaFlux training & seminar on methane flux and carbon cycle, Mymensingh, Bangladesh (2014)

“FluxPro: real time monitoring and surveilling system for the eddy covariance flux measurement”

⑤ W. Kim: AsiaFlux Workshop (2014)

“FluxPro as a realtime monitoring and surveilling system for eddy covariance flux measurement.”

⑥ W. Kim: American Geophysical Union Fall Meeting (2014)

“FluxPro as a realtime monitoring and surveilling system for eddy covariance flux measurement.”

⑦ W. Kim: 日本農業気象学会2015年全国大会 (2015)

「渦相関法の不確実性特性」

⑧ 溝口康子、山野井克己: 第126回日本森林学会大会 (2015)

「レガシーデータ掘り起こしの重要性と課題」

⑨ W. Kim: American Geophysical Union Fall Meeting (2015)

“Why we need to estimate the sampling uncertainty of eddy covariance flux measurement?”



## (3) 出願特許

- ① 小野圭介, 丸山篤志: 職務作成プログラム, 機構-P03 (2012)  
“データロガー上で作動する渦相関法フラックス計算プログラム”

## (4) 受賞等

なし

## (5) 一般への公表・報道等

なし

## (6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

①各研究所やフラックスネットワークのDBへデータ提供を続け、研究分野を中心にデータ利用が行われている。また、地球環境情報統融合プログラム (DIAS) (代表: 東京大学) へ観測サイトのメタ情報を提供した。

②FluxProの観測点が集中的に配置されているタイのチャオプラヤ川流域では、FluxProが提供する蒸発散量のデータが、流域の水資源管理に活用されている (<http://impact.eng.ku.ac.th/cc/>)。

## ③機関誌による資料提供

溝口康子、山野井克己、北村兼三、中井裕一郎、鈴木覚: 森林総合研究所研究報告 (研究資料)、13(4), 193-206 (2014) 「札幌森林気象試験地の気象 (1999~2008年)」

溝口康子、山野井克己: 森林総合研究所研究報告、14(4):209-218 (2015) 「羊ヶ丘実験林気象観測露場40年の記録」