

研究報告書

「粒子フィルタを用いた森林植生モデルのデータ同化手法の確立と環境変動下の植生動態の将来予測」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 27 年 12 月～平成 31 年 3 月

研究者: 伊勢 武史

1. 研究のねらい

本研究の目的は、ビッグデータを用いてシミュレーションモデルを改良する大規模データ同化によって森林植生モデルを最適化し、情報協働による資源管理技術の確立に貢献することである。本研究が目指す、粒子フィルタというデータ同化手法を応用した森林植生モデルの大規模データ同化は、成功すれば世界初の試みとなる。

地球温暖化などの環境変動下で持続可能で安定した森林資源管理を実現するには、植物の環境応答性を高精度で理解することと、それに基づく将来予測と適切なマネジメントが不可欠である。これまでも、森林の植物の環境応答性については種々の観測やフィールド研究が実施されてきたが、その知見を統合して将来予測に活用することは十分になされてこなかった。その原因は、観測データをシミュレーションに取り込むデータ同化手法が確立されていないことだと考えられる。

そこで本研究では、人工衛星観測などのビッグデータを活用し、データ同化によって問題解決のための情報を客観的・効率的に抽出するシステムをつくる。現実的な予測システムを構築するために、環境応答の不確実性・地表面の不均質性・応答のタイムラグを明示的に考慮できるシミュレーションモデルを構築し、それに適したデータ同化手法を用いる。本研究は森林植生を例とした研究を実施するが、その後の食料用植物への応用を見越し、多様な利用形態に対応する改変しやすいシステム開発を行う。

粒子フィルタを用いたデータ同化は、モデル選択・改良・将来予測という一連の作業に革新を起こす。この手法は、システムチェックにつくりだされる多数のモデルからの選択を繰り返すことにより、生育環境の不均質性・気候変動に由来する不確実性・観測誤差なども明示的に考慮し、モデルを最適化できる。植物科学と情報科学の融合分野は切実に必要とされており、この分野開拓のための先駆となる。研究交流を実施することによって、データ駆動型科学による持続可能な森林管理を実現するとともに、食料用植物の適切な栽培管理への応用も積極的に進める。

情報協働栽培の確立には、実験・観測の専門家と計算・理論の専門家の密接な協力が不可欠である。そのため、本研究の成果を理解してもらい、使ってもらうための具体的な仕組みを検討する。将来予測の結果を開示し、「未来のあるべき姿」について、研究機関・産業界などと広く考える機会を持つ。

2. 研究成果

(1) 概要

陸上生態系モデルに観測ビッグデータを同化することでシミュレーションを最適化し、展葉・落葉フェノロジー(季節性)のタイミングを広域で推定することができた。これにより、地球温暖化などの環境変化に対する植物の応答予測の精緻化が可能になった。さらに果樹への応用が実現し、生育環境条件に大きく左右される対象作物の気候応答を予測できるようになった。

まず、人工衛星観測によるビッグデータから、日本全国の落葉広葉樹林の季節変化を抽出した。次に、粒子フィルタというデータ同化手法の適用を可能とする陸上生態系モデルを構築し、光合成速度や有機物分配比率などのパラメタを包括的に最適化できるようにした。その結果、展葉・落葉のタイミングを正確に推定するモデルを構築することができ、従来は局所的な知見しか存在しなかったフェノロジー研究において、広範囲で成り立つ関係性を定式化することができた。加えて、植物が持つ環境適応という性質を客観的に定量化することもできた。

さらに、植生をディープラーニングにより自動検出する手法「chopped picture method」を開発することで、従来は取得に手間がかかり誤差も大きかった詳細な植生タイプや土地利用の把握を無償の航空観測データから得ることができるようになった。これはビッグデータそのものの拡大といえる。この手法により自動検出された山梨県甲府盆地におけるブドウ果樹栽培地において、空間分解能 30m の人工衛星データから推定された植物フェノロジーをデータ同化し、ブドウ果樹の展葉・落葉タイミングの定式化を実現することができた。ブドウのフェノロジーについては、従来はフランスでの研究結果を日本でも使うことが多かったが、気候・土壌・日照などの条件が異なるため、現実を反映できないことも多かった。本研究により、今後は人工衛星や航空機観測によるビッグデータから定量的なフェノロジー研究が可能であることが示された。

本研究で開発されたデータ同化およびディープラーニングに関する技術は情報協働栽培や環境管理に幅広く応用可能であるため、積極的な情報提供と利活用促進を行った。その結果、環境コンサルティング企業などの産業界や幅広い分野の研究者との交流を実施することができた。Chopped picture method のソースコードとユーザーマニュアルを整備し希望者に配布しているため、今後も多くの利活用が見込まれる。

(2) 詳細

研究テーマA 「ビッグデータ取得と整理」

本研究は陸上生態系のシミュレーションモデルおよび将来予測をビッグデータで改良することを目的としているため、人工衛星観測などのビッグデータを整備することが重要な基盤となる。本研究は 2 段階で実施した。第一段階は日本全国の落葉広葉樹林のフェノロジーモデルの最適化であり、そのために人工衛星観測データプロダクト「MOD15 葉面積指数(LAI)」の 8 日周期で観測された解像度 1km のデータを用い、研究対象地の植生の現況を年変動(成長・かく乱・死亡など)と季節性(展葉・落葉)の両面からパターンを整理した。その結果は、世界初の粒子フィルタを用いた非連続性を含む陸上生態系モデルの広域最適化として発表された(主な研究成果リスト(1)3)。

研究の第二段階は、前段階で開発された技術を作物に適用することである。複雑な地形の

なかに小規模の農地や市街地がモザイク状に分布している日本の農業で人工衛星観測ビッグデータを用いた情報協働栽培を達成するには、対象とする農地を正確に効率よく識別することが不可欠である。そのためにディープラーニングによる植生の自動識別技術を開発した。これは、従来のディープラーニングの典型であったオブジェクト単体の検出ではなく、植生のような不定形の物体をテキストで分類する技術であり、chopped picture method と命名した。この技術を arXiv でプレプリントとして公開(Ise et al. 2017)したのち、査読論文として発表した(主な研究成果リスト(1)2)。この技術は革新を呼ぶものとして MIT Technology Review (2017年8月)などの海外メディアに取り上げられ、世界的な注目を集めた。山梨県甲府盆地の果樹(ブドウ)を対象とした研究では、Google Earth の航空写真にディープラーニングを適用することで対象となる果樹栽培地をピンポイントで識別できるようになった。また、解像度 30m の LANDSAT データを用いたことで、前段階の研究(解像度 500m)では不可能だった、日本の典型的な農地-市街地モザイクのなかから対象農地を抽出することができた。特に甲府盆地は、市街地・果樹園・その他の農地が複雑なモザイク状の分布をなしている。このような場所で対象とする果樹だけを自動的に抜き出す技術が実用化されたことで、今後の情報協働栽培の前進に貢献できる。また、LANDSAT から得られる季節変化は、第一段階で用いた葉面積指数(LAI)ではなく植生指数(NDVI)であるため、物理的な落葉ではなく、黄葉(葉から葉緑素が抜けた状態)を推定する。これに対応するシミュレーションモデルの改造を実施した。

研究テーマB 「データ同化の実装とモデル選択」

データ同化は、観測ビッグデータを用いて客観的にシミュレーションモデルを最適化する技術である。不均質性・非連続性の高い陸上生態系におけるデータ同化の応用は遅れていたが、本研究では粒子フィルタというデータ同化技術を用いることでハードルを乗り越えた。粒子フィルタを包括的に適用できる生態系シミュレーションモデルを構築し、内部に存在するすべてのパラメタを同時に、総合的に最適化した。粒子フィルタは逐次型データ同化を実行するため、シミュレーション期間とともに推定精度が向上することが特徴である。本研究では合計 4 年間という比較的長期にわたり、30 分間隔でのシミュレーションおよび 8 日ごとのデータ同化を、日本列島をカバーする約 1 万グリッドの地点に対して実施した。その結果、落葉広葉樹林の普遍的な展葉・落葉フェノロジーのパターンを客観的に抽出でき、従来のフェノロジーモデルはカバーできていなかった植物の環境適応を定量化した世界初の研究となった(主な研究成果リスト(1)3)。すなわち、北方に生育する落葉広葉樹は、南方のものと比較して展葉基準温度が低く、比較的低温でも展葉を開始する(図 1)。また北方の落葉広葉樹はかなり低温になるまで落葉せず、こうして低温環境でも成長期間を長くしている。南方の落葉広葉樹は春は遅めに展葉・秋は早めに落葉することで、霜害などのリスクを小さくしている。言葉で書けば当たり前に感じられるこのような環境適応を広域で定量化したところが本研究の成果である。

データ同化のプログラム実装が本研究の心臓部であるため、計算効率・メモリ効率などの最適化をふくめて重点的に試験し、パフォーマンスを高めた。将来の発展性を考え、森林植生モデル部分をモジュール化し、将来の食料用植物モデルへの応用を視野に、他のモデルと置き換え可能にした。さまざまな地理条件・環境条件に対応し、さらに観測誤差(不確実性)を明示的に考慮したロバストなモデルの構築を実現した。

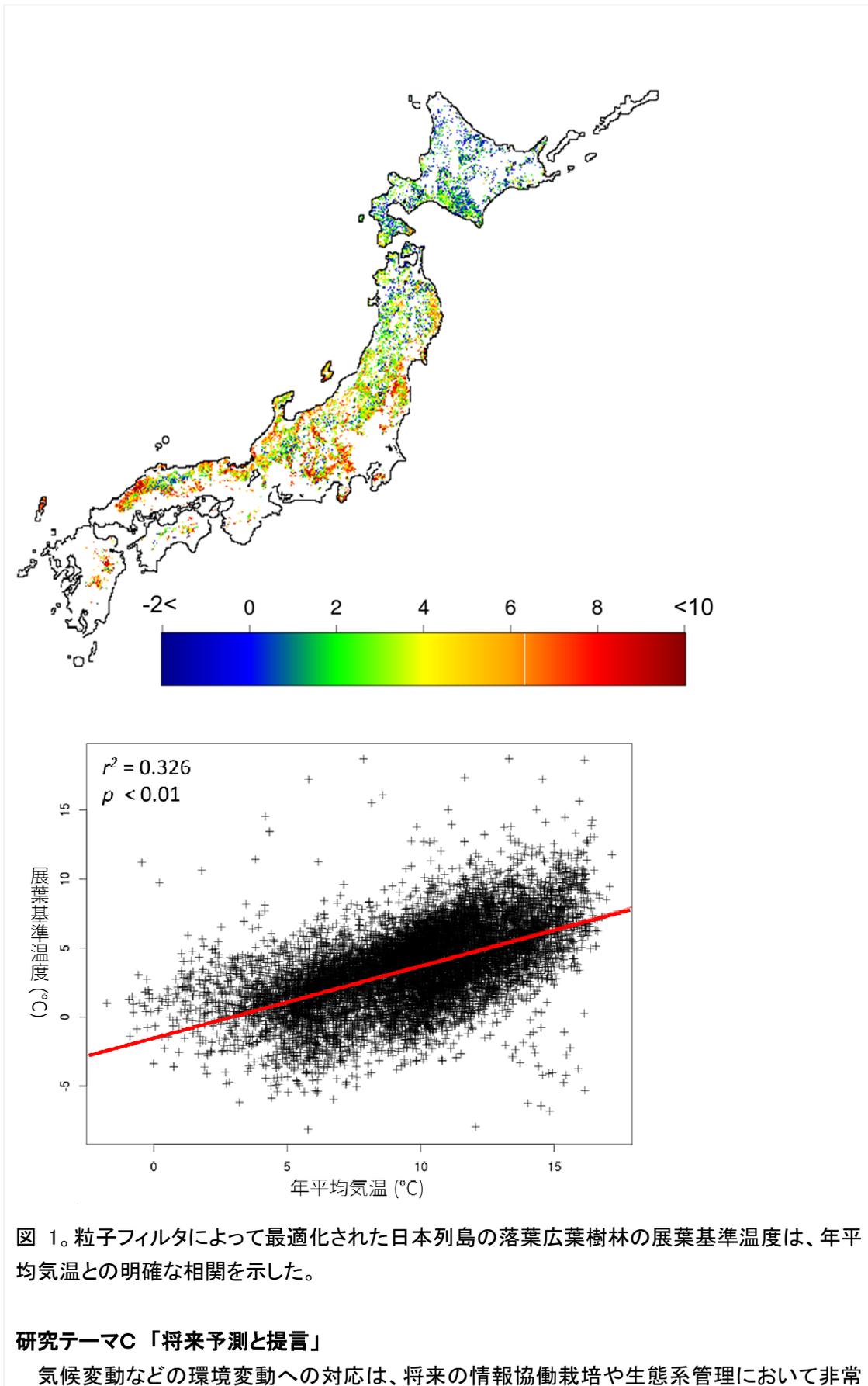


図 1。粒子フィルタによって最適化された日本列島の落葉広葉樹林の展葉基準温度は、年平均気温との明確な相関を示した。

研究テーマC 「将来予測と提言」

気候変動などの環境変動への対応は、将来の情報協働栽培や生態系管理において非常

に重要なミッションであり、今後の社会の安定にも深くかかわっている。気候変動による展葉・落葉時期の変化は、林業や農業の未来に深くかかわる。IPCC(気候変動に関する政府間パネル)第四次報告書のA1Bシナリオにもとづくと、21世紀中の日本の温度上昇は3.4℃と見積もられている(環境省 2009, 温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート)。

1996年から2005年の東京の平均気温は16.6℃(気象庁データベースより)であり、ここから3.4℃上昇すれば、屋久島と奄美大島の間位置する鹿児島県のトカラ列島と同程度となる。これは甚大な変化であり、植物への影響ははかりしれない。本研究の成果は、このような温暖化後の環境への生態系の反応を考えるうえで重要な知見となる。たとえば、従来のフェノロジー研究(展葉基準温度を5℃とした場合)では、2000年の東京の展葉開始日は3月26日となる。これは現在の状況をうまく表現しているといえるが、3.4℃温暖化した2100年の東京に適用すると、展葉開始日は2月4日となり、48日も早くなると見積もってしまう。本研究では、ビッグデータから客観的に推定された植物の環境適応を明示的に導入したため、2100年の展葉開始日は2000年と比較して15日早くなると推定され、従来の知見を大幅にアップデートしている。現在のところ、地球温暖化を予測する気候モデルの空間解像度は200km程度と非常に低いためこれがフェノロジー予測の限界を規定しているが、これがさらに精細なものになれば、地域ごとの詳細が分かるようになると期待される。

研究テーマD 「利活用促進と人材育成・交流」

本研究の最終目的は、開発された技術によって情報協働栽培を達成することである。開発されたデータ同化技術・ディープラーニング技術は農業・林業や環境管理に幅広く応用可能であるため、積極的な情報紹介と利活用促進を実施した。例として、アグリビジネス創出フェア(東京ビッグサイト:2017年10月)に出展しデータ同化の農業利用について紹介したこと、SciFos活動として住友林業株式会社およびアジア航測株式会社を訪問し環境コンサルティングへの応用について議論したことなどがある。さらに、ディープラーニングの具体例を紹介する学会集会を企画したところ(主な研究成果リスト(3)5)100名を越す参加者を集め、その後研究についての相談が相次いだ。国立研究開発法人水産研究・教育機構からは魚群の自動検出、国立環境研究所琵琶湖分室からは藻場の自動検出、中国科学院からはゴム農園におけるアリの巣の自動検出など、当初想定していなかったディープラーニングの応用について打診があり、いくつかは共同研究に発展している。京都市内では、無鄰菴や歴彩館でディープラーニングの利活用についての一般向けの講演を実施した。帰化植物セイタカアワダチソウの分布を市民ボランティアとともにデータベース化するプロジェクトについて、NHKのEテレ「高校講座(2018年11月放送)」にて全国放送された。

さらに、京都大学農学研究科・農学部の学生を中心に、即戦力としてのディープラーニング技術を身に着けた農業や環境管理の専門家という情報協働栽培領域が期待する次世代研究者の育成を行ってきた。彼らは本研究の成果であるchopped picture methodを駆使し、富有柿の品質不良・森林の樹木タイプ・コケの生物種・中国南部のゴム園におけるアリの巣・セイタカアワダチソウなどを自動識別することに成功している。

3. 今後の展開

本研究によって開発されたビッグデータ処理技術とデータ同化技術の利活用を推進するとともに、本研究の基礎理論がさまざまな栽培植物や植生に応用可能であることを実証するための研究も継続する。ディープラーニング手法である chopped picture method については、現在はコード・マニュアル・練習データを希望者に配布するという形式で利活用を進めているが、これを Github などのウェブシステム上で公開することで、世界的な利用者の獲得と、双方向性・カスタマイズ性を高めた開発を進めていく。データ同化に用いた陸上生態系モデル SSSEM についても同様の公開を進めていく。

本研究で開発された技術は、農業・林業・環境管理など多彩な分野で応用可能であるため、利用の実例を増やしていくように産学連携および社会連携を進めていく。たとえば、植生のタイプとサイズを自動識別し、ドローンなどの遠隔観測データによって植生動態を推定するという技術は、地形の複雑な山間部・丘陵地における農業や林業の IT 化に貢献できる。また外来生物を人工知能で自動識別するなどの研究テーマは、シチズンサイエンスとして市民と協働した社会事業に発展させることが可能である。

4. 自己評価

情報協働栽培は、深刻な環境変化の見込まれる将来の農作物の安定供給に資するという点で非常に重要な社会的意義を帯びている。本研究は(1)ビッグデータと(2)データ同化を用いることで植物動態の把握と定式化を目指した。

ビッグデータに関しては、日本全国をカバーする 500m メッシュの人工衛星データに加え、農地—市街地モザイクの多い日本の土地利用の把握に適した 30m メッシュの人工衛星データを用いることで、要求レベルに応じた空間スケールで解析が可能であることを実証した。さらに、ディープラーニングを用いた chopped picture method を開発し、植生を自動識別することが可能になった。これは、ディープラーニングで新たなビッグデータを創出するという点で革新的である。

陸上生態系のデータ同化については、不均質性・非連続性の高い陸上生態系に特化したシミュレーションモデルを開発し、粒子フィルタというデータ同化技術を用いることで可能にした。これには、多数の CPU を持つ並列計算機導入の効果が大きい。その結果、これまでは漠然とした把握しかなされていなかった広域での展葉・落葉フェノロジーを定量化できるようになった。

研究の進め方を工夫することで、本研究の目的の達成に資するようにした。研究実施体制の整備としては、研究補助者を雇用し、ビッグデータの取得と管理・データ同化実験の実行と管理という比較的単純な作業を責任をもって担当させることができた。研究費執行は、この研究補助者の人件費と上述の並列計算機、さらにはディープラーニングの実行のための GPGPU 計算機に重点を置いた。潤沢なさがけ研究費の恩恵で研究は効率よく進捗した。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果としては、陸上生態系モデルがデータ同化可能であること、並列計算機による大規模計算が新たな知見を生み出すこと、テクスチャ

にもとづく植生の自動識別を可能にしたことなど技術的・応用可能性についての貢献に加え、植物の環境適応など基礎的な生物学にも貢献することができた。本研究の最終ゴールは情報協働栽培の実現による社会・経済への貢献である。研究期間内に広域観測データによるブドウのフェノロジーの定式化を行うことができ、これは生育環境条件を厳しく選ぶ果樹の適地適作や、気候変動後の産地の推定などに利用可能である。

今後は、開発した技術を多彩な農作物に適用することで、実際に情報協働栽培が役に立つことを実証していく。リンゴ・モモなどブドウ以外の落葉性の果樹には本技術の応用がただちに可能であるため、積極的な産学連携を進める。さらに、そのほかの栽培植物にも応用可能な技術の汎用化に向けた開発にも引き続き取り組んでいく。本研究では、ニュースになることは多いものの、何に役立つのかイメージのわきにくい人工知能という技術が、どのように未来を豊かにするのかを示すことができた。農業・林業という第一次産業は人工知能という科学の最先端から遠いところにあるという誤解も多いが、実はこのような産業にこそ人工知能が恩恵をもたらすことを今後も実証していく。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Arakida H., T. Miyoshi, T. Ise, S.-I. Shima, S. Kotsuki. Non-Gaussian data assimilation of satellite-based leaf area index observations with an individual-based dynamic global vegetation model. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2017, 24, 553–567.
2. Ise T., S. Ikeda, IS. Watanabe, K. Ichii. Regional-scale data assimilation of a terrestrial ecosystem model: leaf phenology parameters are dependent on local climatic conditions. *Frontiers in Environmental Science*. 2018, 6:95, doi: 10.3389/fenvs.2018.00095.
3. Ise T., M. Minagawa, M. Onishi. Classifying 3 Moss Species by Deep Learning, Using the “Chopped Picture” Method. *Open Journal of Ecology*. 2018, 8, 166–173.
2. Ise T., M. Minagawa, M. Onishi. Classifying 3 Moss Species by Deep Learning, Using the “Chopped Picture” Method. *Open Journal of Ecology*. 2018, 8, 166–173.
3. Ise T., S. Ikeda, S. Watanabe, K. Ichii. Regional-scale data assimilation of a terrestrial ecosystem model: leaf phenology parameters are dependent on local climatic conditions. *Frontiers in Environmental Science*. 2018, 6:95, doi: 10.3389/fenvs.2018.00095.

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 1 件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. MIT Technology Review. How Moss Helped Machine Vision Overcome an Achilles’ Heel. 2017/8/14. 日本語版タイトル「京都の「コケ」を識別する手法が深層学習の弱点を克服する」.
2. MIT Technology Review. An AI learns to spot tree species, with help from a drone.

2018/5/10. 日本語版タイトル「京大研究チーム、ドローン空撮から樹木の種類を AI で判別」.
3. Ise T., M. Minagawa, M. Onishi. Obtaining big data of vegetation using artificial neural network. American Geophysical Union Fall Meeting. 2017/12/15.
4. 伊勢武史. データ科学から考える、サイエンスと社会のかかわり. 日本育種学会第 131 回講演会. 2017/3/30.
5. Onishi M., T. Ise. Automatic classification of trees using a UAV onboard camera and deep learning. arXiv. 2018, arXiv:1708.01986.
6. Ise T., Y. Oba. Estimating mesoscale linkage between land-surface conditions and marine productions in Japan: a study using a sparse high-dimensional model. arXiv. 2018, arXiv:1809.07946.