

複合的な自然環境便益の時空間評価に関する基礎的研究

林希一郎*、町村尚**、杉田暁***、大場真****、片田有哉*、小林航*、
藤本彩菜**、松井孝典**、福井弘道***

*名古屋大学、**大阪大学、***中部大学、****国立環境研究所

1. はじめに

人間社会の自然に対する関与や自然資源の利用の増大が、複合的な環境問題をもたらし、また問題解決を困難にしている。今日、これらの問題に対して、時空間的に複合的なデータ分析を通じて、問題解決を目指す動きが活発化している。自然環境からの便益に着目するアプローチとして、生態系サービスの空間評価に関する研究がある（文献：1）。国連ミレニアム生態系評価（文献：2）によると、生態系サービスとは、供給サービス、調整サービス、文化サービス、基盤サービスに分類されており、具体的には、供給サービスは生態系から得られる生産物（食糧、淡水、繊維などを含む）であり、調整サービスは気候調節や水浄化サービスなどを、また文化サービスはレクリエーション、審美的サービス、精神・宗教的価値、教育的価値などを含む。最後の基盤サービスは上記3つの生態系サービスの基盤となるものであり、栄養塩循環や土壌形成などが含まれるとされている（文献：2）。生態系サービスに関する空間分析のアプローチには、生物物理量などの生態系サービス機能に着目するもの、すなわち生態系サービス供給ポテンシャルに着目するアプローチ（文献：3、4）と、生態系サービスへの需要や受益に着目するアプローチ（文献：5）などがある。前者は、潜在的な自然生態系の有するポテンシャルを評価するものであるが、実際に人間社会での利用可能性については考慮されない。したがって、人間社会での需要や利用可能性を含めた、すなわち生態系サービスの需要や受益を含めた総合的な生態系サービスの空間分析が重要となる。一方、土地利用等の変化に伴い、生態系サービス供給ポテンシャルは大きく変化してきたと考えられる。多くの場合、減少してきたと思われる。このため、今後の生態系サービスの保全優先度等を検討する上では、過去からの時系列的な変遷を考慮に入れた意思決定が重要となる。

本研究では、人間と自然の相互作用を生態系サービスの軸でとらえ、それらを時空間スケールで把握し、分析を進めることを目的とする。対象地域は、筆者らの研究蓄積がある愛知県を中心とした中部地方とした。

2. 方法

研究全体のフレームワークとしては、生態系サービスの供給と需要・受益を時空間スケールで把握し、需要と供給の空間バランスの変化、時間的変遷を分析することにある。空間スケールの分析としては、筆者らはこれまでに現地調査をベースとした手法（文献：6、7）、衛星画像等のリモートセンシングデータを活用した数mから数十mスケールの分析（文献：3）、森林簿等の活用を軸とした分析（文献：8、9）など各種の分析スケールでの生態系サービス評価を実施してきた。また、時間スケールの分析としては、各種GISデータの整備が進んでいない1950年代以降のデータ整備を進めてきた（文献：10）。研究全体の目指すところは、非常に広範に渡るため、本年度は、特に以下の3点に焦点をあてて研究を実施した。

- 生態系サービス供給ポテンシャル推計手法の検討：UAVの活用
- 生態系サービス供給ポテンシャルの時間変化に関する分析
- 生態系サービスの供給と需要・受益に関する時空間分析の統合フレームについての検討

（1）生態系サービス供給ポテンシャル推計手法の検討：UAVの活用

リモートセンシングデータ、森林簿等のデータを用いた分析は精度の面で課題がある。そこで、本研究では、両者の課題を補う生態系サービス供給ポテンシャル推計の手法として、UAVの活用に注目した。UAVは、現地調査による詳細調査よりも、人的コストが低く、広範囲での分析が可能である。また、リモートセンシングデータより細かい分解能のデータの取得が可能である。これらの利点を生かし、UAVを用いた生態系サービス供給ポテンシャルの推計可能性、および森林簿等その他のデータの代替可能性を検討した。

中部大学国際GISセンター所有のUAV(Phantom 3 Professional(DJI)、以下Phantom3)を用い、強度間伐人工林の空撮画像解析を通じて、森林の諸情報を収集し、それらを用いて森林の生態系サービス供給ポテンシ

ャルの推計手法の検討を行った。

本研究では岐阜県高山市の強度間伐（約80%）ヒノキ人工林（36.0126N、137.3660E）を対象として（図1）、UAVによる空撮（自動航行ソフトMap Pilot for DJI(Drones Made Easy)を活用）を展葉期（2016年9月21日、撮影枚数129、対地高度80m）、紅葉期（同年11月2日、枚数1029、高度40, 50, 60m）、落葉期（同年12月2日、枚数743、高度60m）の3回実施するとともに、それらを画像解析(Photo Scan Professional(Agisoft)（以下Photo Scan））し、3D高密度クラウド、DSM（Digital Surface Model）、オルソ画像を作成した。本研究では、Phantom3 備え付けのカメラ（センサー：1/2.3、解像度：4000×3000px、レンズ：FOV94° 20mm）を使用した。画像解析にはRAWデータを使用し、コントラスト等の調整は行っていない。対象森林の分析では複数のフライト画像をまとめて解析した。

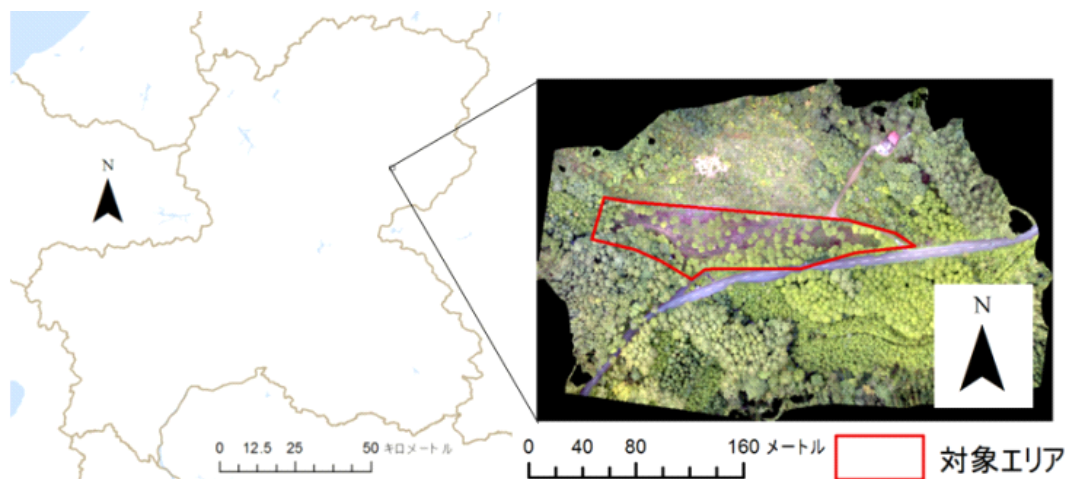


図1 岐阜県高山市人工林

（面積0.81ha、主要樹種：ヒノキ、樹齢：103年（岐阜県森林簿より））

得られたデータからDTM(Digital Terrain Model)、DCM (Digital Canopy Model)を作成し、樹高、樹頂点位置、個々の樹木の樹冠面積、森林全体のボリュームなどの森林物理量を推計した。DTMの作成では、オルソ画像の目視判読による地表面の特定によってポイント(5mメッシュ内に一か所以上)を抽出し、これらに対してArcGISのKrigingツールを用いた内挿処理による手法を用いた。さらにArcGISのRaster Calculatorを用いてDSMからDTMを差し引き、DCMを算出した。次に、統計解析ツールであるRのパッケージrLiDAR ver. 0.1 on R ver. 3.3.1 (R Core Team)を用いてDCMから樹頂点を抽出し、樹頂点における高さを樹高とした。さらに、DCMをArcGISのGaussianフィルタによって平滑化した。その後、樹冠の抽出をポロノイ分割で行ったが、Watershed法(文献：11)等その他の手法の適用は今後の課題である。

空撮と並行して樹木の現地調査を行った。対象樹木149本の樹種とDBH(Diameter at Breast Height)を測定(11月調査)し、また149本中25本についてはレーザー距離計LASWE550A S(Nikon)を用いて樹高を計測(12月調査)した。

これらの森林基礎情報を用いて、生態系サービス評価における指標を定め、基盤サービス、調整サービス項目の生態系サービス供給ポテンシャルを推計した(表1)。手法の詳細は文献(12)に記載した。

炭素固定量推計では、スギ・ヒノキ人工林を対象とした文献(13)の式(1)を用いた。

$$v = \pi d^2 h / 4 \{2(1 - 1.2/h)\}^{1.06} \quad (1)$$

v : 幹材積(m^3), d : DBH(m), h : 樹高(m)

式(1)を文献(14)の式(2)へ代入することで、木1本あたりの炭素固定量を推計した。

$$C = \sum_j \{ [V_j \cdot D_j \cdot BEF_j] \cdot (1 + R_j) \cdot CF \} \quad (2)$$

C : 炭素固定量(t-C), V : 幹材積(m^3), D : 容積密度(t-d.m./ m^3), BEF : バイオマス拡大係数(無次元), R : 地上部に対する地下部の比率(無次元), CF : 炭素含有率(=0.5[t-C/t-d.m.]), j : 樹種

ここで、 D および BEF , R , CF は樹種固有の値であり、文献 (14) の値を利用した。

微気候調節サービスでは、文献 (15) を参考に、評価指標として森林体積 (m^3/ha) を用いた。樹木体積は ArcGIS の Surface Volume ツールを活用し、森林表面を DCM、参照平面を 0 としてエリア内の合計値を推計した。

大気浄化サービスは、文献 (16, 17) を参考に、葉面積指数の代替指標として樹冠表面積を用いた。樹冠表面積の計算には、ArcGIS Surface Volume ツールを活用した。

水の調節サービスについては、文献 (18) を参考に、対象エリアの全投影面積に占める樹冠投影面積の割合を樹冠疎密度 (%) を用いた。

(2) 生態系サービス供給ポテンシャルの時間変遷に関する分析

過去における生態系サービス供給ポテンシャルの推計は、過去のデータを現在調査することは困難であるため、過去の土地利用と現在の生態系サービス供給ポテンシャルの原単位を用いた推計値となる。文献 (10) では、電子化した名古屋市周辺の過去の土地利用図と、現在の土地利用図の比較を通じて、生態系サービス供給ポテンシャルの時空間分析を行っている。本研究では、この手法にならない、愛知県東部地域の広域的な生態系サービス供給ポテンシャルの 1955 年と 2010 年頃の変化を推計した。1955 年の土地利用図は、地理調査所 (現・国土地理院) の土地利用図 (名古屋北部、名古屋南部、瀬戸、挙母、明智、足助、御油、岡崎、半田) のデータをスキャンした後、当該地図の凡例をトレーニングサンプルとした教師付き分類を行い、その後、誤分類の修正を経て、複数枚の土地利用図を合成する手法で実施した。

現在の土地利用図は、JAXA の公開している日本域高解像度土地利用土地被覆図 2016 年 9 月リリース版 (バージョン 16.09、http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/lulc_jindex.htm) の 10m 解像度のデータを用いた。

1955 年の土地利用分類は、高解像度土地利用被覆図にならない、複数の土地利用分類を集約し、解像度は 10m メッシュスケールになるようにした。

生態系サービス供給ポテンシャルの推計原単位は、2012 年以来筆者らの研究チームが実施している名古屋市内の森林現地調査データにもとづくものである (文献：10, 19)。

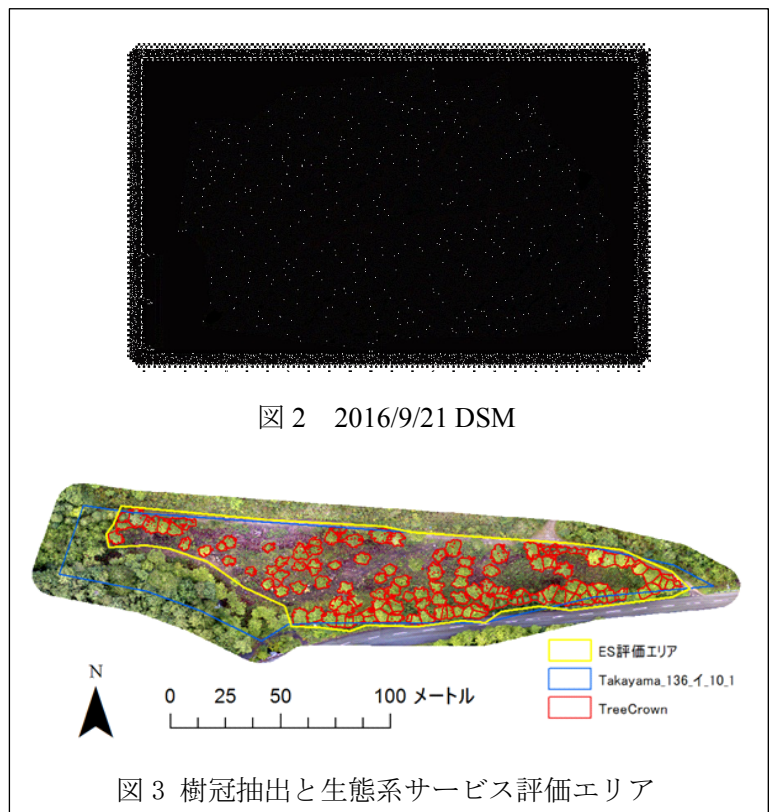
(3) 生態系サービスの供給と需要に関する時空間分析の統合フレーム

筆者らがこれまでに蓄積してきた生態系サービス供給ポテンシャルの空間情報、生態系サービス需要・受益に関する空間情報を統合して時空間分析を行うための基礎情報の検討を行った。まずは、生態系サービス別のマップの比較検討、次に統合化の方法について検討を行った。

これらの分析には、統計ソフト R (フリーソフト)、SPSS (IBM)、ArcGIS 10.4.1 for Desktop (ESRI ジャパン)、ERDAS IMAGINE2014 (日本インターグラフ)、エクセル 2010 (Microsoft) を活用した。

3. 結果と考察

UAV を用いた分析では、森林基礎情報とともに、生態系サービス供給ポテンシャルの推計を行った。図 2、3 及び表 1 に結果の一部を示した。生態系サービス供給ポテンシャルの推計では、簡易な手法であるが、いくつかの生態系サービス項目についての推計値が得られた。なお、今回の推計において、DTM の作成の重要性が指摘できる。国土地理院の作成する 10m メッシュの DEM (Digital Elevation Model) を DTM と



して用いた樹高推計も併せて実施したが、目視による地面判読から作成した DTM の方が、現地調査データと検証したところ、精度が高い結果が得られた。今回の対象地は強度間伐地であり、地面の目視判読が比較的容易であったが、通常の密な森林においてはこれが困難であることが想定される。この場合は、DEM を用いることになるが、ある程度の誤差が生じる可能性がある。この点を改善することは今後の課題である。また、今回は限られた生態系サービスのみでの供給ポテンシャルを推計したが、生態系サービス項目を増加させることが課題であり、森林簿データとの代替可能性をより詳細に評価する必要がある。

表 1 ES 評価項目と推計値

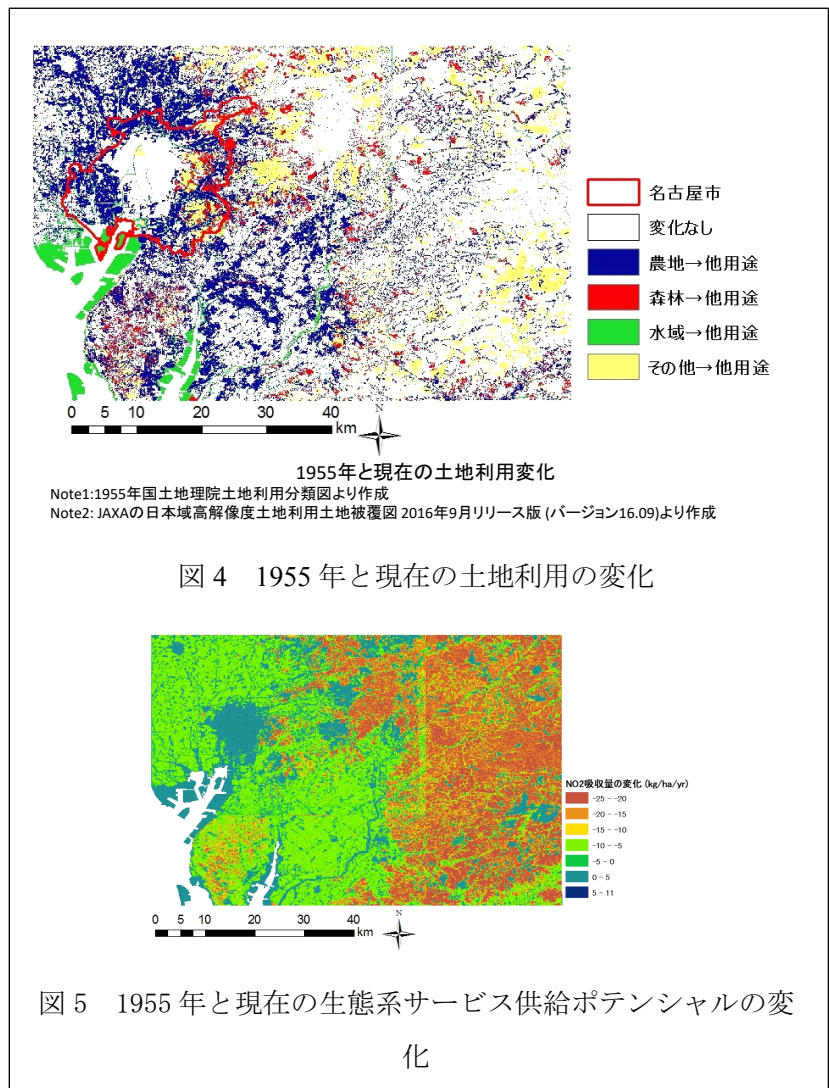
| ES 項目 | 評価指標 | 単位 | 推計値 | 評価方法 |
|----------|-------|------------------------------------|-----|-----------------|
| 基盤サービス | | | | |
| a) 炭素固定 | 炭素固定量 | tC/ha | 65 | 文献：14, 15 |
| 調節サービス | | | | |
| b) 気候の調節 | 樹木体積 | 10 ⁴ m ³ /ha | 7.8 | ArcGIS による体積計算 |
| c) 大気浄化 | 樹冠表面積 | 10 ⁴ m ² /ha | 1.8 | ArcGIS による表面積計算 |
| d) 水の調節 | 樹冠疎密度 | % | 37 | rLidar による樹冠抽出 |

出所: 文献 (10) を参考に作成。オリジナルは文献(12)に掲載。

生態系サービス供給ポテンシャルの時間変遷に関する分析では、愛知県東部地方の古地図の作成、現在と 1955 年の土地利用変化、生態系サービス供給ポテンシャルの推計を行った (図 4、5)。これによると過去約 60 年間に、都市部では農地から都市的利用へ大きく土地利用の変化が進んでいることがわかる。都市周辺部では森林の減少も進んでいることから、総じて生態系サービス供給ポテンシャルの減少がみられる。本項では、このうち NO₂ 吸収についての暫定的な結果を示した。当該推計では文献 (20、21) を参考とした。現時点では、愛知県全域をカバーする古地図の電子化が終了しておらず、愛知県全体としての土地利用変化、およびそれに伴う生態系サービス供給ポテンシャルの変化を推計するに至っていないが、引き続きデータの整備を続け、分析を進める必要がある。

これらの基礎データの収集・分析とともに、生態系サービスの受給の空間分析を進めている。個々のデータについては、上記に加えて、これまでの筆者らの研究チームでは各種の関連データの整備を進めてきた。データは主として名古屋市、愛知県を中心としているが、中部・近畿地方、他国 (ミャンマー、ラオス) 等での研究も進めており、基礎データの整備を行っている。

なお、本研究は、別途進めている生態系サービス受益モデルを含めた重層的な空間分析について、統合的プラットフォーム上での整理方法の検討を行うことを目標としている。統合化手法としては、統計的な手法を用いた



方法、既存モデルを用いた方法等があり、これらの比較検討を通じて、研究を進めている。まずは、個々の生態系サービスの供給ポテンシャルおよび需要・受給の空間構造の把握が重要であり、次に、統合的フレームワークの検討が必要となる。

4. まとめ

本年度は、初年度ということもあり、生態系サービス供給ポテンシャルの基礎データ収集の新しい手法の開発、過去データの整備を進めた。また、これらのデータを総合的に空間分析するための基礎的な分析フレームワークの検討を行った。次年度以降では、引き続き基礎データの整備を進めるとともに、特に統合分析フレームワークの研究にも焦点を当てて進めることを考えている。

5. 謝辞

本研究は中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究 IDEAS201609 の助成を受けたものである。また、(株) 中部フォレストマネジメントに、森林に対する調査許可をいただいた。現地調査では、林研究室、町村研究室の学生諸氏に協力していただいた。さらに、名古屋大学未来材料・システム研究所共同利用・共同研究の助成および、日本学術振興会の最先端・次世代研究開発支援プログラム、環境研究総合推進費 1-1401、科学研究費助成事業基盤研究 (C) 15K00622 等で得られた成果の一部を活用した。

参考文献・データ

1. Costanza, R., d' Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O' Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., and van den Belt, M., *Nature*, 387, 253-260, 1997.
2. Millennium Ecosystem Assessment (MA) *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, D.C., USA, 2005.
3. M. Ooba, K. Hayashi, T. Suzuki, R. Li, *IJERD*, 6-2, 66-72, 2015.
4. M. Ooba, M. Fujii, K. Hayashi, *Journal of Cleaner Production*, 130, 35-44, 2016.
5. Ana P. García-Nieto, Marina García-Llorente, Irene Iniesta-Arandia, Berta Martín-López, *Ecosystem Services*, 4 (2013), 126-138, 2013.
6. K. Hayashi, M. Ooba M., Y. Hasegawa, *IJERD*, 6-1, 97-102, 2015.
7. 長谷川泰洋, 林希一郎, *ランドスケープ研究(オンライン論文集)*, 7, 116-125, 2014.
8. M. Ooba, K. Hayashi, M. Fujii, T. Fujita, T. Machimura, *J. of Cleaner Production*, 88, 318-325, 2015.
9. A. Dhakal, M. Ooba, K. Hayashi, *Int J of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 10, 3, 2014. <http://dx.doi.org/10.1080/21513732.2014.920420>
10. W. Kobayashi, K. Hayashi, M. Ooba, *IAIA16 conference web proceedings*, 2016.
11. Å. Persson, J. Holmgren, U. Söderman, *Eng. Remote Sens.*, 68, 9, 925-932, 2002.
12. Y. Katada, K. Hayashi, S. Sugita, T. Machimura, A. Fujimoto, *IAIA17 conference web proceedings*, forthcoming.
13. 井上昭夫, 黒川泰亭, *日本森林学会誌*, 83, 2, 130-134, 2001.
14. 国立環境研究所地球環境研究センター 温室効果ガスインベントリオフィス(GIO), *日本国温室効果ガスインベントリ報告書*, 国立環境研究所, 6_10-6_14, 2014.
15. 蛭田有希, 石川幹子, *都市計画論文集*, 47, 3, 259-264, 2012.
16. 只木良也, *信州大学環境科学報*, 12, 36-45, 1990.
17. 伊藤拓弥, 松英恵吾, 内藤健司, *写真測量とリモートセンシング*, 47, 1, 26-35, 2008.
18. 吉田弘, 瑞野道夫, *水工学論文集*, 42, 223-228, 1998.
19. 名古屋大学エコトピア科学研究所林研究室, *名古屋の森の生態系サービス調査(途中経過の整理) ver. 1.0*, 2015.
20. 小川和雄, 三輪誠, 嶋田知英, 小川進, *埼玉県環境科学国際センター報*, 1, 106 -117, 2000.

21. 戸塚績、三宅博, 大気汚染学会誌, 26, 4, A71-A80, 1991.

関連業績

(1) 国際会議

- Y. Katada, K. Hayashi, S. Sugita, T. Machimura, A. Fujimoto, Assessment of Forest Ecosystem Services Using Unmanned Aerial Vehicles. IAIA17, 4-7 April, 2017, LE CENTRE SHERATON MONTRÉAL HÔTEL Montréal, Canada.
- A. Fujimoto, T. Machimura, T. Matsui, K. Hayashi, S. Sugita, Y. Katada, Application of UAV-SFM Technique to Estimate Forest Stand Structure and Biomass in Takayama, Japan, ISRS2017, 17-19 May, 2017, Nagoya University Higashiyama Campus, Nagoya, Japan. (予定)

(2) 国内学会

- 片田有哉, 林希一郎, 杉田暁, UAVを用いた森林生態系サービス評価に関する研究. 環境情報科学ポスターセッション, 2016年12月5日, 日本大学会館, 東京, 日本.