

## リモートセンシングを用いたヒノキ人工林の蒸散量広域予測モデルを開発

衛星リモートセンシング技術と森林調査データを組み合わせ、これまでより高い精度でヒノキ林の蒸散量を予測できる新モデルを開発しました。衛星だけでなく、近年多く利用されているドローンも使えます。森林の水源涵養機能の評価や管理の効率化などに大きく貢献することが期待される成果です。

森林は「緑のダム」と呼ばれます。水を地面に浸透させ、地下水を涵養する機能を持っているからです。しかし、日本では近年、間伐などの手入れが行き届かずに過密化した人工林が問題となっています。こうした人工林では蒸発散（土壌からの蒸発や樹木からの蒸散）によって水分が大気中に放出され、相当量の地下水資源が失われていることが指摘されています。日本のような森林の豊かな地域では、特に樹木からの蒸散（ $E_t$ ）が大きな割合を占めています。 $E_t$ を広域かつ正確に把握できれば、人間が利用可能な地下水量を可視化し、渇水時には計画的な地下水利用が可能となります。

本研究チームは、 $E_t$ をこれまでより正確に予測できる新モデルを開発しました。対象はヒノキ人工林で、衛星リモートセンシング技術と森林調査データ（FI）を組み合わせ、 $E_t$ を計算します。

$E_t$ の予測は気象条件や植物の生理的反応に大きく影響されるため、複雑で難易度が高い問題でした。しかし、今回開発したモデルは、衛星が観測した地表の温度とマルチスペクトルデータ、FIを活用することで、これらの要素を効果的に統合することに成功しました。また、 $E_t$ に大きく影響する辺材面積（樹木断面のうち水が流れる面積）もFIのデータを基に計算し、モデルに統合しました。その結果、この新モデルの予測値は実際の $E_t$ との間に高い相関（相関係数  $r = 0.76 - 0.89$ ）を示しました。

この研究成果は他の樹種の $E_t$ 推定にも応用できる可能性があります。また、ドローンなど他のリモートセンシング手法にも適用できます。このため、新モデルは、樹種ごとの $E_t$ をより詳細かつ正確に推定するための貴重な手法となり、森林管理の効率化と精度向上に大きく貢献し、持続可能な林業や森林の水源涵養機能の評価に資することが期待されます。

### 研究代表者

筑波大学生命環境系／放射線・アイソトープ地球システム研究センター（CRiES）

恩田 裕一 教授

筑波大学理工情報生命学術院生命地球科学研究群地球科学学位プログラム

橋本 朝陽

## 研究の背景

森林は「緑のダム」と呼ばれます。水を地面から浸透させ、地下水を涵養する機能を持っているからです。しかし、日本では近年、間伐などの手入れが行き届かず過密化した人工林が問題となっています。こうした人工林では蒸発散<sup>注1)</sup>によって水分が大気中に放出され、相当量の地下水資源が失われていることが指摘されています。そして、日本のような森林の豊かな地域では、特に樹木からの蒸散 (Et) が大きな割合を占めています。Et を広域かつ正確に把握できれば、人間が利用可能な地下水量を可視化し、渇水時には計画的な地下水利用が可能となります。

このため本研究では、森林の蒸散量 (Et) の正確な予測に焦点を当てました。Et は気象学的要因<sup>注2)</sup>や植物の生理学的反応<sup>注3)</sup>によって影響を受けます。これまでの衛星リモートセンシングを利用した Et 推定モデルでは、植物の活動という複雑な要素を十分に考慮していない問題がありました。

## 研究内容と成果

本研究では、単一樹種で構成されているヒノキ人工林を対象に、Et 推定モデルを開発しました。これまでのモデルより正確に Et を推定するため、気象学的な蒸散 ( $Et_{base}$ ) と植物生理学的な蒸散 ( $Et_{leaf}$ ) を考慮し、これらを組み合わせました。また、予測値と比較する実測データとして、全国4地点で得られた樹液流量<sup>注4)</sup> データ (SF) を利用しました (図1b, d)。これは、樹木の中に流れている水の量を計測するもので、Et の実測値として広く利用されています。主に栃木県佐野市の唐沢山における SF データを用いてモデルを開発し、神奈川県で1カ所、福岡県で2カ所の SF データでモデル精度の検証を行いました。各地域は 900~4500 m<sup>2</sup> の大きさです。

森林調査データ (FI) は各樹種の生育範囲と樹齢データが記録されたものです (図1e)。本研究では、群馬県桐生市における FI データと衛星画像を利用することで、ヒノキ林の活性度と葉の面積を衛星から推定できる指標の開発を試みました。

唐沢山において、気象学的な影響が強くなる冬季の Et は、衛星から得られた表面温度<sup>注5)</sup> と高い相関関係があることが分かりました。また、植物生理学的な影響が強くなる夏季において SF は、葉の面積と植生活性度の積と高い相関関係がみられました。

以上を踏まえて、 $Et_{base}$ 、 $Et_{leaf}$  を以下のように定義しました。

$$Et_{base} = 15.427 \rho^{-1} - 12.014$$

$$Et_{leaf} = 2.3541 NIR \exp(I_{Green,Red} \rho^{-1})$$

ここで、 $\rho$  は空気密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $NIR$  は近赤外域における反射率<sup>注6)</sup>、 $I_{Green,Red}$  は可視光緑・赤の反射率を用いた正規化指標<sup>注7)</sup> です。これらのデータは衛星画像から取得できます。また、近赤外、可視光緑・赤の反射率はマルチスペクトルセンサーを用いて得ることができます。マルチスペクトルセンサーは、画像を色別に撮影することで、植物の活性度などさまざまな情報を取得できます。人間が赤、緑、青などの色情報を用いて物体を識別することに似ています。

$Et_{base}$ 、 $Et_{leaf}$  は、気温によって依存率が変化します。したがって、観測したい日の気温を 0 から 1 の間で示す表面温度指数<sup>注8)</sup> (TI) を用いて、各蒸散源の依存性を表しました。

$$Et_{origin} = TI Et_{leaf} + (1 - TI) Et_{base}$$

ここで、 $Et_{origin}$  は  $Et$  推定モデルの基本形です (図 2)。このモデルは、 $Et$  の推定に表面温度を利用します。衛星画像撮影直前に降雨があった場合、雨水の直接の蒸発によって表面温度が低下し、 $Et$  の推定精度に影響を及ぼすことが考えられます。そこで、地表面の湿潤度を示す先行降雨指数<sup>注9)</sup> (API) を用いることで、 $Et$  推定値の信頼度評価および補正を行いました。

$$API_{(a,b)} = TI API_{(a)} + (1 - TI) API_{(b)}$$

ここで、 $a$  および  $b$ : 降雨をさかのぼる時間です。雨水の蒸発のしやすさは気温に依存することから、 $TI$  および短期間・長期間の API を組み合わせることでより正確に地表の湿潤度を表すことができます。

$$Et_{error} = 0.2227API_{(12,192)} - 0.0442$$

$$Et_{API} = Et_{origin} - Et_{error}$$

ここで、 $Et_{error}$ : API から推定される推定  $Et$  の誤差、 $Et_{API}$ : API で補正された  $Et$  です (図 3)。 $Et$  は辺材面積<sup>注10)</sup> に依存することが知られています。辺材面積を考慮するため、FI から得られる樹齢もしくは胸高直径<sup>注11)</sup> を利用し、モデルに組み込みました。

$$Et_{estimated} = \varphi Et_{API}$$

ここで、 $Et_{estimated}$ : 推定される蒸散量(mm/day)、 $\varphi$ : 辺材面積係数です。その結果、 $Et_{estimated}$  は SF から得られた  $Et$  と  $r = 0.76 - 0.89$  <sup>注12)</sup> の高い相関関係を示しました (図 4)。

#### 今後の展開

本研究では、3カ所で得られた SF データを用いて、モデルの精度検証を行いました。今後は、より多くの地域で SF データを観測することで、更なる精度向上を図ります。また、モデルを今回より広域で適用することにより、日本のヒノキ林における水収支データを高解像度でモニタリングすることを目指していきます。また、他の樹種の SF データを収集・解析することで、ヒノキ以外のさまざまな樹種への応用可能性も探っていく予定です。

本モデルは可視光に近い波長のマルチスペクトルデータと、表面温度データを用いています。これらのセンサーは比較的安価で、一般向けのものが数多く販売されています。そのため、衛星リモートセンシングだけでなく、ドローンなどの近接リモートセンシングにも応用しやすくなっています。そのため、他のリモートセンシング手法を用いた場合でのモデル精度検証も行っていきたいと考えています。

参考図

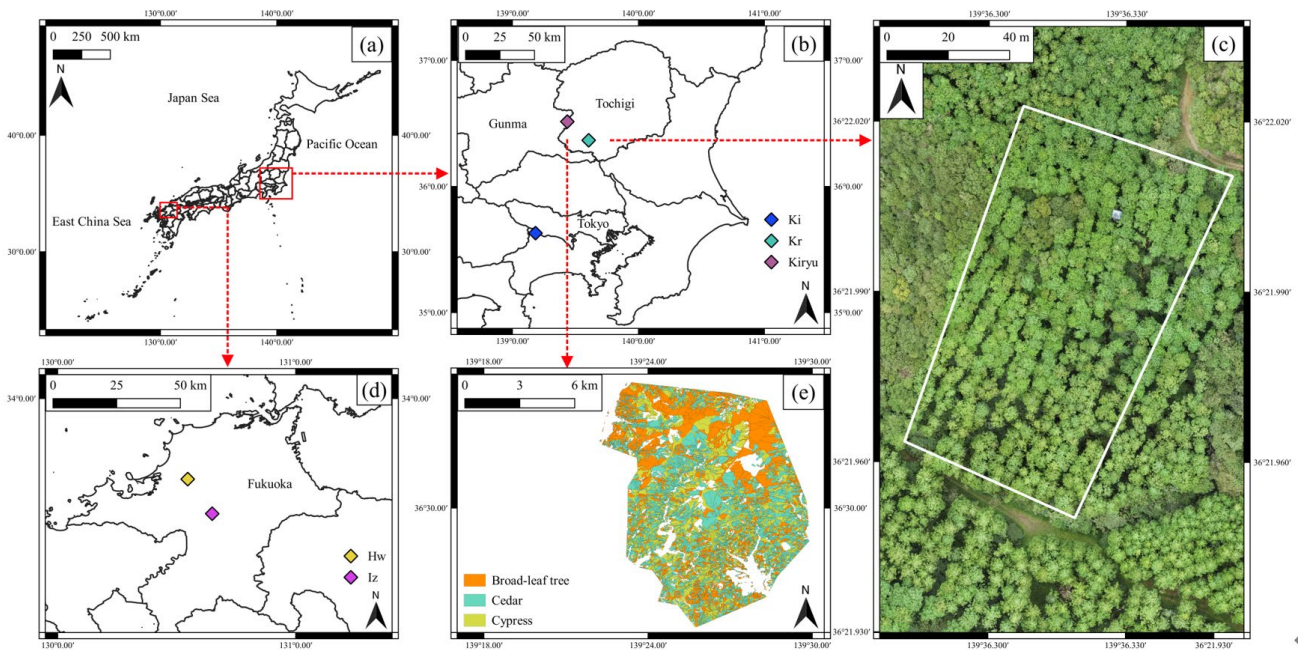


図 1. SF データを利用した各地域の位置。Hw, Iz は福岡県、Ki は神奈川県に位置する人工ヒノキ林である。Kr は今回モデル開発に利用した SF データを取得した唐沢山（栃木県佐野市）の位置であり、(c)の白枠における SF データを利用した。(e)は群馬県桐生市における FI データで、広葉樹 (Broad-leaf tree)、スギ (Cedar)、ヒノキ (Cypress) の生育範囲が詳細に記載されている。

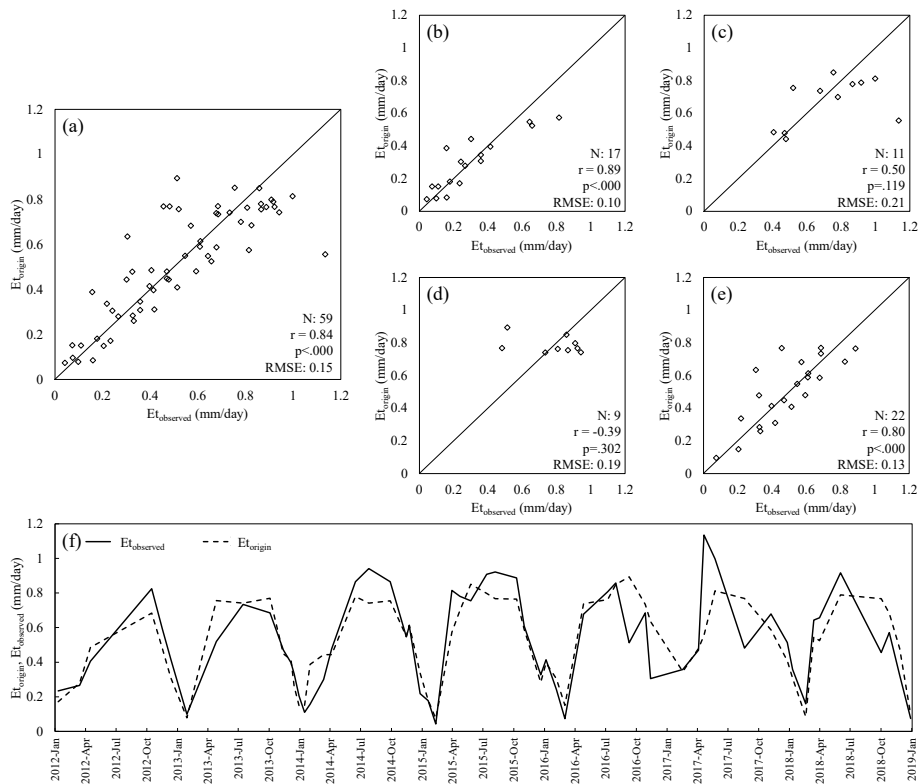


図 2. 唐沢山における  $Et_{origin}$  と観測された  $Et$  の関係。(a) 全期間、(b) 1-3 月、(c) 4-6 月、(d) 7-9 月、(e) 10-12 月。これらの図の実線は 1:1 の直線であり、線に近いほど、精度よく  $Et$  を推定できていることになる。(f)は 2012 年から 2018 年に観測された  $Et_{origin}$  と観測された  $Et$  の変動。

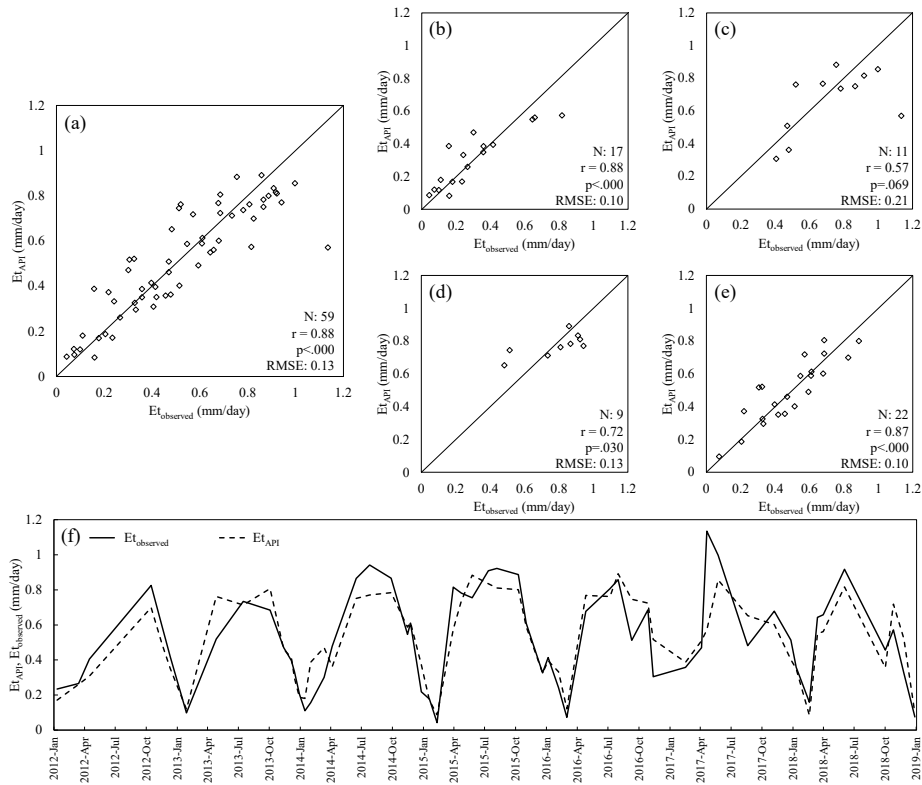


図3. 唐沢山における  $Et_{API}$  と観測された  $Et$  との関係。(a) 全期間、(b) 1-3月、(c) 4-6月、(d) 7-9月、(e) 10-12月。特に雨が多く降る7-9月の間で、精度の向上がみられる。(f)は2012年から2018年までの  $Et_{API}$  と観測された  $Et$  の変動。

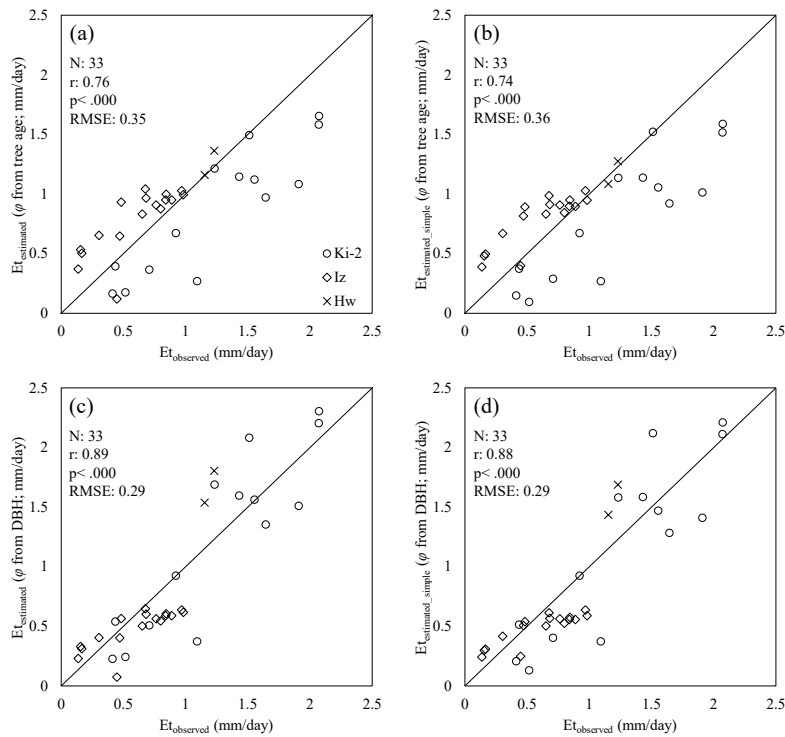


図4. 福岡県で2カ所、神奈川県で1カ所の地点で得られたSFデータを利用した  $Et_{estimated}$  と  $Et_{observed}$  の関係。(a)樹齢から求めた  $\phi$  を用いて  $Et_{estimated}$  を計算、(b) 樹齢から求めた  $\phi$  を用いて  $Et_{estimated\_simple}$  (APIで補正していない推定  $Et$ ) を計算、(c) 胸高直径から求めた  $\phi$  を用いて  $Et_{estimated}$  を計算、(d) DBHから求めた  $\phi$  を用いて  $Et_{estimated\_simple}$  を計算した。



## 用語解説

- 注1) 蒸発散 地球上の水循環の一つであり、陸域の水が水蒸気となり大気中に戻される現象。日本の森林では、雨水が葉や枝によって遮断され、そのまま蒸発する「樹冠遮断蒸発」、植物が行う「蒸散」、森林土壌から蒸発する「林床面蒸発」の主に三つの蒸発散源が存在する。
- 注2) 気象学的要因 気温や湿度など気象によって大きく左右される要素。
- 注3) 植物の生理学的反応 植物が成長するために行う光合成や、夜間に行われる呼吸など、植物の生存・成長に必要な反応。
- 注4) 樹液流量 樹木の内側に流れている水の量。英語では Sap Flow と呼ばれ、主に樹木外側の辺材と呼ばれる部分で水を運搬する。
- 注5) 表面温度 地表を構成している物の表面の温度。熱赤外 (Landsat8 の場合、10.6-11.19  $\mu\text{m}$ ) における放射輝度を用いて観測される。
- 注6) 反射率 ある波長帯における入射強度に対する反射強度の割合。
- 注7) 正規化指標 主に二つの波長帯における反射率を利用した指標で、-1 から 1 の間で推移する。正規化をすることで、対象物の特徴をとらえやすくなる。
- 注8) 表面温度指数 表面温度を 0 から 1 の間で表す指数。地域による気候の差異を考慮できるため、表面温度がその地域においてどれほど高い (低い) のかを表せる。
- 注9) 先行降雨指数 地表に湿潤度を観測したい日において、過去の降水量を足し合わせることで、より効果的に地表の湿潤度を表せる指標。
- 注10) 辺材面積 樹木の断面における辺材の面積。辺材は樹木が水を通す部分であることから、 $E_t$  の量と大きく関係する。
- 注11) 胸高直径 人間の胸の位置における樹木の直径。主に樹木の成長具合の指標として用いられる。
- 注12)  $r$  (相関係数) 二つのデータにおける直線的な関連を示す値。-1 から 1 の間で表され、0 から離れているほど、二つのデータの関連が強いことを意味する。

## 研究資金

本研究は、科学研究費助成事業 (2022-2024 年度)、戦略的イノベーション創造プログラム (2018-2022 年度)、科学技術振興機構 (JST) ベルモントフォーラム (2021-2023 年度) の一環として支援を受けて実施されました。

## 掲載論文

- 【題名】: Satellite Remote Sensing Model for Estimating Canopy Transpiration in Cypress Plantation Using in situ Sap Flow Observations and Forest Inventory  
(樹液流観測と森林調査データを用いた衛星リモートセンシングによるヒノキ林の樹冠蒸散量推定モデル)
- 【著者名】: Asahi Hashimoto, Chen-Wei Chiu, Yuichi Onda, Makiko Tateishi, Kenji Tsuruta, Takashi Gomi  
橋本 朝陽 (筑波大学)、Chen-Wei Chiu (筑波大学)、恩田 裕一 (筑波大学)、立石 (岡崎) 麻紀子 (京都大学)、鶴田 健二 (滋賀県琵琶湖環境科学研究センター)、五味 高志 (名古屋大学)
- 【掲載誌】 ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing
- 【掲載日】 2023 年 11 月 17 日

**【DOI】** 10.1016/j.isprsjprs.2023.11.009

**【URL】** <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271623003143>