

(一社) 日本リモートセンシング学会九州支部
2019 年度研究発表会論文集

2020 年 2 月 29 日

於 長崎大学工学部

目次

斜面や影が地表面温度に与える影響について 佐竹峻, 多炭雅博(宮崎大)	1
大規模灌漑圃場における作物種による地表面温度と気温の関係性 小川春菜, 多炭雅博(宮崎大)	5
Sentinel-1 衛星画像を用いた SAR 後方散乱係数とイネの作物パラメータの関連について 長渡溪太, Emal Wali, 多炭雅博(宮崎大)	10

斜面や影が地表面温度に与える影響について

Impacts of surface slope and shadow to the land surface temperature

○佐竹峻・多炭雅博¹

Ryo Satake, Masahiro Tasumi

Abstract : Surface temperature measurements by satellite has been more and more popular. In terrestrial applications, such surface temperature data have been popularly used for heat-island and evapotranspiration studies. However, due to the relatively short history of surface temperature measurements, several questions related to the characteristics of surface temperature have remained. This study investigates the impact of surface slope and the effect of shadows to surface temperature, to enrich the knowledge of characteristics of surface temperature. A series of field experiment was conducted using a woody-made sloping terrain model in Miyazaki, Japan, to measure the surface temperatures on sloping surfaces and to evaluate the effect of shadow. The result indicated that solar radiation is the primary factor that controls surface temperature. Some variation of temperature were confirmed for the same level of solar radiation, which might be derived by difference in surface aspect. Some results showed that air temperature acted as minimum limit of surface temperature in daytime clear-sky condition, but not always. Surface temperature under cloudy condition approached to air temperature regardless the surface slope and the aspect. When the surface is suddenly shaded, the surface temperature decreased rapidly in the initial stage, then the decrement speed decreased with time. The result of this study helps better understand the characteristics of surface temperature in sloping terrains and unstable radiation conditions.

Keywords : surface temperature, topographic effect, remote-sensing, shadow

1. はじめに

今日、多くの人工衛星によって地表面温度観測が行われており、地表面温度データが身近に入手できるようになっている。地表面温度は地表面や大気の熱収支を支配するパラメータであり、その空間分布を把握することは重要である。以前より、衛星観測による地表面温度マップはヒートアイランド研究や蒸発散量推定に利用されているが、地表面温度に関する情報は不足している[1][2]。堀口らによると計測時期や地表面被覆の影響もあるが、気温と地表面温度は関係が強い[3]。斜面や影の影響による地表面温度の動向を捉えられると、日射環境の複雑な都市のヒートアイランド問題や地表面温度からの流域蒸発散推定に役立てることができる。そこで本研究では、斜面の地表面温度を実測し、その温度特性を明確にするとともに、影による地表面温度への影響についても評価する。

2. 計測及び解析方法

(1) 計測方法

図1に示すように、厚さ9mmのベニヤ板でピラミッド型の斜面模型を作成し、水平面および東西南北それぞれの向きの傾斜角30°と45°のベニヤ板斜面温度を計測した。なお、観測日ごとの斜面条件を一定とするために、計測は常に乾燥条件下の無風または風の緩やかな日に、宮崎大学構内の周囲に建物の少な

い開けた草地上で行った。

計測日時は2019年8月16日12:00-14:55、同年9月19日13:00-17:35、同年9月23日09:05-12:00、16:00-16:30、同年11月20日08:00-16:30と同年12月4日10:00-11:15である。計測にはシンワ測定株式会社・放射温度計C（測定精度は $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ）を使用し、放射率は0.98に設定し計測した。

計測は主に晴天環境下で行ったが、一部曇天下で行ったものもある。また影が地表面温度に与える影響を把握するため、晴天環境下で日射を遮断するボードを使って直達光を遮断し、地表面温度の推移を調べる実験も行った。本研究では気温は実測していないものの、熱収支式からは顕熱の小さい状態で地表面温度は気温に近似することが想定される。このような気温と地表面温度との関係を調べるため、宮崎気象台の気温データも補足的に使用した。

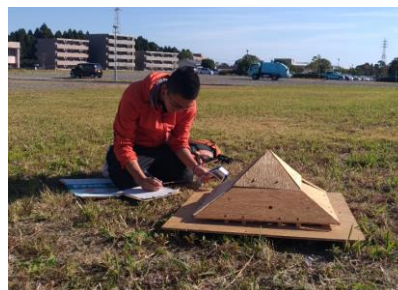


図1. 使用した斜面模型と温度計測環境

(2) 地表面温度の解析方法

本研究では日射と斜面の垂線がなす角を θ と定義し、斜面日射強度を表す指標として $\cos\theta$ を用いた。なお、水平面において、 θ は太陽天頂角と同義になる。

¹ 宮崎大学農学部
(〒889-2155 宮崎県宮崎市学園木花台1-1)
(連絡先 Tel: 0985-58-7991、
E-mail: tasumi@cc.miyazaki-u.ac.jp)

$\cos\theta$ は時刻と斜面方位・傾斜角の 3 者の関係から幾何学的に決まる値であり、その斜面における大気外斜面日射量 (= 大気の影響が無い場合の直達日射量) にほぼ比例する。このため、直達日射が卓越する晴天日の日中では、 $\cos\theta$ は日射強度を表す指標としてよく機能する。一方で散乱光の影響が強い早朝や夕方、また曇天日では $\cos\theta$ は日射強度の指標としては機能しない。本研究における解析では、斜面温度に最も影響を与える要因が $\cos\theta$ で表される日射強度であるとの仮定のもと、 $\cos\theta$ と斜面温度との関係を解析した。またその際、斜面方位や時刻が何か斜面温度に特徴的な影響を与えるかどうかを調べるため、斜面方位と時刻の影響についても評価した。

3. 結果と考察

計測を通して得た地表面温度と $\cos\theta$ との関係を散布図にした。

(1) 晴天日における斜面温度

晴天日の 8 月 16 日に計測した地表面温度と $\cos\theta$ との関係を図 2 に示す。また $\cos\theta$ を階級別にまとめたものを図 3 に示す。図 3 からは $\cos\theta$ と地表面温度の間に線形関係があることが読み取れる。また、一部地表面温度が気温を数℃下回るデータがあったものの、気温が概ね地表面温度の下限として機能しているように見受けられる。図 2 に見られるように、晴天日において地表面温度は全体的には日射に強い影響を受けつつも、同じ $\cos\theta$ の値 (例えば 0.6) であっても地表面温度に 10℃ 程度の開きが見られた。この開きは観測時刻の違いでは説明が難しい。そこで斜面方位による影響を調べた (図 4)。図 4 に見られるように、傾斜角 30°の斜面において、同じ $\cos\theta$ の値 (例えば 0.6) であっても北向き斜面で地表面温度が低く、東向き斜面で高かった。すなわち類似の日射強度環境において、斜面方位の違いで地表面温度が変化していた。同様の傾向は傾斜角 45°の斜面においても見られた。斜面方位が地表面温度に与える影響の理由は不明であるが、今後より詳細な調査をしていきたい。

地表面温度と気温との関係について、図 2 では気温が地表面温度の下限として機能していたように見受けられたものの、図 5 に示す 11 月 20 日の計測においては多くのデータで地表面温度が気温を下回っており、気温が地表面温度の下限として機能していなかった。晴天日の日中において地表面温度が気温を大きく下回る現象は伝導や対流では説明が難しいため、放射冷却が卓越した環境下にあった可能性が高いものの、この原因ははっきりとはわからなかった。地表面温度と気温との関係についても、今後さらに調査検討をする必要がある。

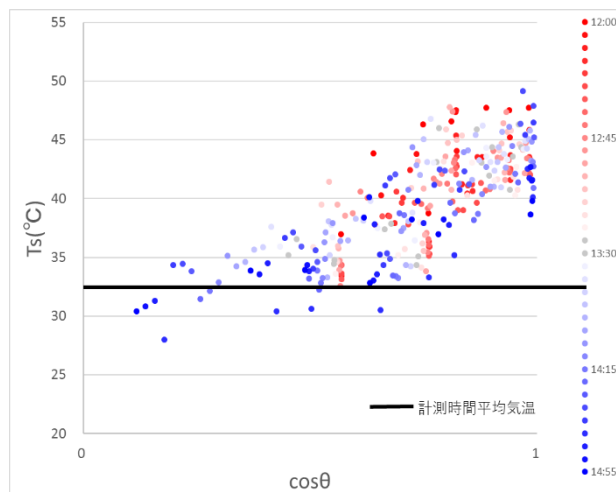


図 2. 8 月 16 日の計測結果

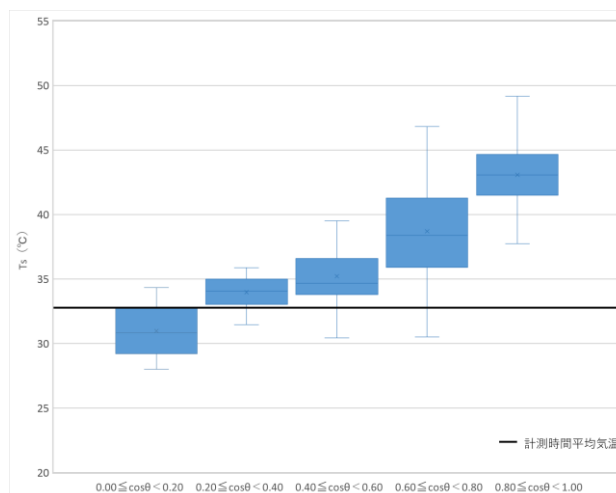


図 3. 8 月 16 日の $\cos\theta$ 階級別計測結果

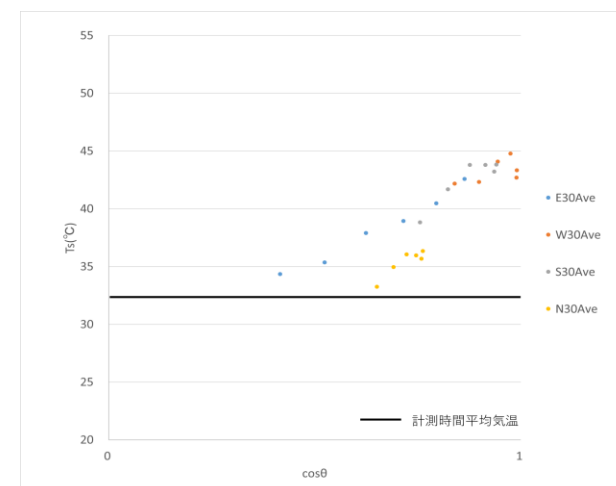


図 4. 8 月 16 日の傾斜角 30°の斜面における斜面方位別計測結果

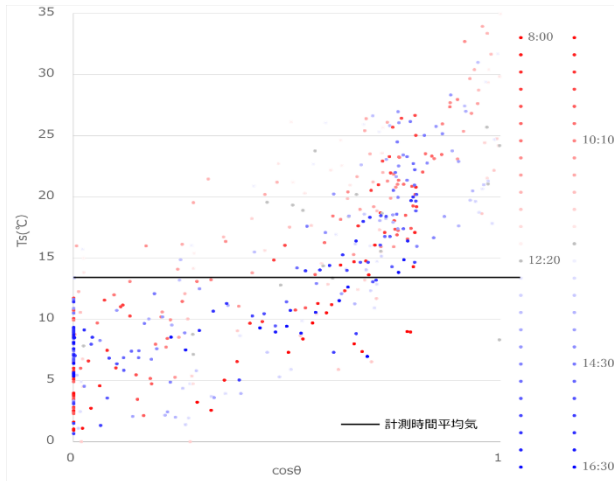


図 5. 11 月 20 日の計測結果

(2) 曇天日における斜面温度

図 6 は曇天日である 9 月 23 日の計測結果である。地表面温度は $\cos\theta$ の大きさに関係なくほぼ一定（最高値と最低値との差が 2°C ）で、なおかつ気温と非常に近い値であった。この観測日の場合、日射のほとんどがおそらく散乱光として入射しており、 $\cos\theta$ は日射強度の指標としては機能していない。斜面方位や傾斜による日射環境の違いは無く、日射強度は晴天日に比べると非常に小さく、なおかつ時間のみに依存している状態だったと考えられる。図 5 において、16:00 から 16:30 にかけて地表面温度が低下しているのは、日射量あるいは気温の低下、またはその両方を反映したものであると考える。

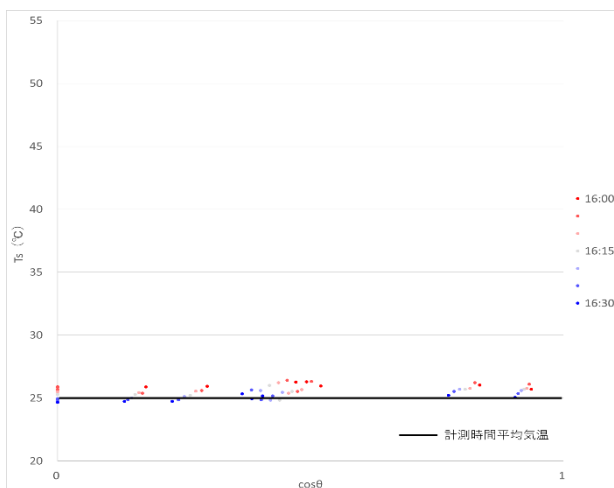


図 6. 9 月 23 日の計測結果

(3) 影の影響

影が地表面温度に与える影響について調査するため、直達日射を急に遮った後の地表面温度の推移を計測した。また同様に、いったん遮った直達日射の遮断を解いた後の地表面温度の推移も計測した。こ

れらの計測結果を図 7 に示す。

直達日射を遮断した場合は計測開始 0 秒から 60 秒の間に地表面温度は著しく低下した。この時の温度変化率は -0.149°C/s であった。その後 250 秒ほどかけて地表面温度は徐々に低下し、開始後 300 秒頃には安定に近づいた（変化率 -0.007°C/s ）。このように、直達日射遮断後の地表面温度低下は線形ではなく、自然対数的な低下であった。直達日射の遮断を解いた後の地表面温度上昇局面においても、遮断解除後 0 秒から 60 秒まで地表面温度は急激に上昇した（変化率 0.175°C/s ）。今回は計測時間が短く決定的なことは言えないものの、直達日射を遮断した時と同様、地表面温度の変化は自然対数的であることが考えられる。

この影による地表面温度の下降と、影の解除による上昇は、放射収支と熱収支から理論的に説明できる。放射収支の面では、ステファン・ボルツマンの法則より地表面の出す長波放射量は地表面温度（絶対温度）の 4 乗に比例する。温度下降局面では、地表面温度が下がれば下がるほど、射出されるエネルギーが少なくなり、地表面温度の下降が抑制される。また温度上昇局面では、地表面温度が上がれば上がるほど、射出されるエネルギーが多くなり、地表面温度の上昇が抑制される。

熱収支も同様に、温度下降局面では、地表面温度が下がれば下がるほど、地表面温度と気温の差が縮まるので顕熱輸送量が小さくなり、地表面温度の一層の低下を緩和抑制する。温度上昇局面では、地表面温度が上昇し、気温との差が大きくなるにつれて顕熱輸送量が大きくなり、地表面温度の一層の上昇を緩和抑制する。このように、放射収支・熱収支の両面から、気温下降局面、上昇局面ともに、図 7 に見られるように温度変化は徐々に緩やかになる。

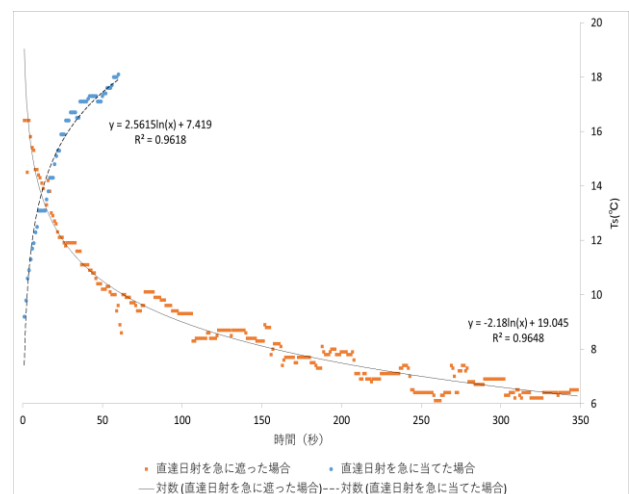


図 7. 影による地表面温度への影響 (12 月 4 日)

4. 結論

本研究では傾斜と影による地表面温度への影響を実測により明らかにすることを目的とした。地表面温度に大きな影響を与えているものは日射強度であった。本研究では地表面をベニヤ板としたが、別な素材を用いた実験や地表の水分状態を変化させた実験を今後行うことで、様々な地表面環境の気温を推定する基礎データとなり得る。

謝辞

本研究は JAXA 地球観測研究公募共同研究「GCOM 陸圏プロダクトとしての全球蒸発散指数推定アルゴリズムの開発」による研究費助成を受けて行われた。

引用文献

- [1] 入江 (2006) ランドサットデータをベースとしたヒートアイランドの緩和に資する緑地の配置の評価手法に関する研究, 日本都市計画学会 都市計画論文集 No.41-3, pp.355-360.
- [2] 砂田ら (1997) 裸地・灌漑水田における蒸発散量空間分布の推定, 水工学論文集 第 41 巻, pp.55-60.
- [3] 堀口ら (1985) 農業気象における人工衛星データの利用に関する研究 (2) 気温と赤外放射温度計による地表面温度との関係, 農業気象 (J. Agr. Met) 40 (4) , pp.379-385.

大規模灌漑圃場における作物種による地表面温度と気温の関係性

The relationship between land surface and air temperatures at large-scale irrigated fields having different types of crop

○小川春菜¹・多炭雅博¹
Haruna Ogawa, Masahiro Tasumi

Abstract : This study investigates the relationship between land surface temperature and air temperature in an irrigated agriculture condition. The study area is southern Idaho, United States, and the study period was from 2016 to 2017. Land surface temperature data for selected sample fields were obtained from Landsat-8 thermal imagery, and the corresponding air temperature were obtained from near-by weather station. Field NDVI data by Landsat-8 were also applied to understand the crop status of the sample fields. In high NDVI conditions (NDVI > 0.8), surface temperatures of the sample fields were close to air temperature and the difference was primarily within 5°C. If limited to the coldest fields of each crop types, the difference becomes within 2°C in summer. The difference of surface-air temperatures in high-NDVI fields tended not to be affected by crop types, probably because evapotranspiration ratio of high-NDVI fields were similar among the investigated crops. While more investigations are needed, this result shows a potential to estimate air temperature from surface temperature in agricultural conditions, and to improve evapotranspiration estimations.

Keywords : land surface temperature, air temperature, irrigated agriculture, Landsat-8

1. はじめに

気温は農業において作物の生育や品質に重要な影響を及ぼす気象要因で、古くから気温と作物の成長や収量との関係は研究されてきた（例えば Jung et al., 1997; Mazurczyk et al., 2003; Soureshjani et al., 2019）。人工衛星による地表面温度観測データの普及に伴い、近年では地表面温度を利用した気温の空間分布推定についても各種研究がおこなわれている（例えば Hadria et al., 2018）。現在、人工衛星による地表面温度観測データの陸域における主な利用用途は火山・山火事監視と蒸発散推定であるが（Sobrino et al., 2016）、地表面温度と気温の差は蒸発散量や植生の水ストレスとの関係が強い（Duffkova, 2006）。蒸発散量推定モデルでは CIMEC (calibration using inverse modeling at extreme conditions) と呼ばれるオペレーター自身が画像中の特異ピクセル（例えば顕熱がゼロで気温＝地表面温度となるピクセル）を選定する手法がよく使われる（Bhattarai et al., 2017）。しかし CIMEC におけるピクセル選定は主観的で定義が難しく（Choi et al., 2009）、これが高精度の蒸発散推定を困難にしており、より客観性の高い手法の模索が続けられている（Bhattarai et al., 2017）。本研究において農業環境下での地表面温度と気温との関係を調査することは、気温の空間分布推定に寄与するとともに、いくつかの蒸発散推定モデルの客観性と信頼性の向上に寄与する可能性がある。

地表面温度と気温との関係は、以下の式で近似することができる。

$$T_s - T_a = \frac{H \cdot r_{ah}}{\rho \cdot C_p} \quad (1)$$

ここで、 T_s は地表面温度、 T_a は気温、 H は顕熱フラックス、 r_{ah} は空気力学的抵抗、 ρ は空気密度、 C_p は空気の熱容量である。日中において人工衛星による地表面観測が可能な晴天日では、顕熱の大きい乾いた地表面で $T_s \gg T_a$ となり、顕熱の小さい湿潤地表面で T_s が T_a に近づく。顕熱がゼロの地表面（すなわち有効エネルギーのすべてが潜熱として消費される地表面）では、空気力学的抵抗の値に関わらず、 $T_s \approx T_a$ となる。

植生で覆われた地表面（＝キャノピー表面）の場合、はキャノピーの熱容量が空気の熱容量に近いため、蒸発散（すなわち潜熱）の多少にかかわらず、葉面温度と気温の温度差は一般的に $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内に収まる（Goward et al., 1994）とされ、この原理を利用した気温推定は TVX (temperature-vegetation index) 法として知られている（Vancutsem et al., 2010）。Denih ら（2018）も森林において、蒸発散の多少にかかわらず樹冠温度と気温が近似であったと報告している。この関係を利用すれば十分厚い植生キャノピーの表面温度から気温が推定できるが、この関係を利用した気温推定の精度が低い（Prince et al., 1998）あるいは関係自体が成り立たない（Vancutsem et al., 2010）との報告も多い。蒸発散推定モデルとして有名な VIT 台形モデル（Moran et al., 1994）においても、十分発達したキャノピー表面温度は蒸発散の影響を受けるとの検証結果が示されている。植

¹ 宮崎大学農学部
(〒889-2155 宮崎県宮崎市学園木花台1-1)
(連絡先 Tel: 0985-58-7991、
E-mail: gb17008@student.miyazaki-u.ac.jp)

生キャノピー温度からの気温推定は、手法として有望かつ魅力的ではあるもののよくわかっていない。そこで本研究では、衛星による蒸発散推定の需要が高い十分管理された広大な灌漑農地を対象を絞り、衛星観測からの地表面温度と地上観測による気温の関係を調査した。またこの関係が作物種にどの程度依存するのかについても検討を行った。

2. 調査方法

2-1. 研究対象地および対象期間

衛星観測による Ts と地上気象観測による Ta を比較する上での適地選定においては、以下の諸条件を考慮する必要がある。

- ・ 圃場規模—衛星観測 Ts の空間分解能の 2 倍以上の圃場（空間分解能 100m の Landsat-8 の場合は 200m×200m 程度以上の圃場）が多数存在することが望ましい。
- ・ 作付状態—圃場の作付作物や作物種、水管理状況等の情報があることが望ましい。
- ・ 気候条件—雨季には衛星観測機会が著しく低下するため、作付時期と雨季が重なっていないことが望ましい。
- ・ 地上気象観測—農地環境下での地上気象観測データがあることが望ましい。

本研究では、以上 4 条件すべてを概ね満たす研究対象地として、アメリカ合衆国アイダホ州 Twin Falls 灌漑地区に位置する、AgriMet Twin Falls 気象観測所（42.5N, 114.3W, 標高 3,920m）の周囲 15km 以内とした。対象地は一区画 400m×400m～800m×800m 程度の大規模圃場が多く存在し、半乾燥地に位置するため雲による衛星観測機会損失が比較的小なく、地区内にアメリカ干拓局の AgriMet（Cooperative Agricultural Weather Network）農業気象観測所が存在する。また農務省等による作付状況に関するデータも豊富である。なお研究対象期間は 2016 年～2017 年にかけての主要作物栽培期間（春～秋）とした。

2-2. 使用データ

衛星観測データとして、対象期間中の Landsat8 衛星画像の中から、雲量 20%以下の観測日における Ts および NDVI データを METRIC-EEFlux サイト (<https://eeflux-level1.appspot.com/>) からダウンロード入手した。使用した衛星データの観測日を以下にリストする。

2016 年：4/12, 5/30, 7/1, 8/2, 10/21

2017 年：5/1, 6/18, 7/20, 8/21, 10/24

撮影時刻はどのデータも現地時間（夏時間）の 12 時 20 分頃で、太陽時ではおおよそ午前 10:40 頃とな

る。なお EEFlux では画像処理に METRIC 蒸発散量推定モデル（Allen et al., 2007）の画像処理アルゴリズムを採用しており、Ts 推定の際には地表面射出率も考慮されている。衛星観測データの読み取りは、圃場外の地表面情報の混入を避けるため、各サンプル圃場の中心部に位置する 1 ピクセルのみを対象とした。

地上気象観測による気温データとしては、Twin Falls 気象観測所による 15 分毎気温データから、衛星観測時刻を含む 15 分間の平均気温を衛星観測地表面温度に対応する気温とした。作物情報はアメリカ国立農業統計局 (National Agricultural Statistics Service : NASS) による 2016 年および 2017 年の作物分類図（図 1）から取得した。

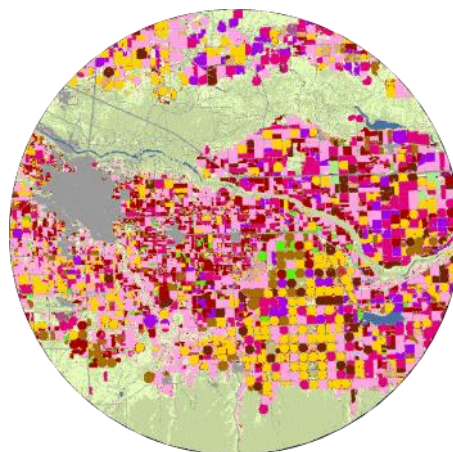


図 1：研究対象地域における作物分類図（2016 年）

2-3. データ解析方法

AgriMet の Twin Falls 気象観測所を中心とする半径約 15km の範囲内に位置する 400m×400m 以上の灌漑圃場から約 100 圃場をそれぞれの衛星観測日について無作為に選定した後、この地域の代表作物であり、生育に季節性のある corn（トウモロコシ）、barley（大麦）、winter wheat（冬小麦）、sugarbeets（テンサイ）、dry beans（乾燥豆）、potatoes（ジャガイモ）に分類される圃場を対象に解析を行った。解析対象圃場数を表 1 に示す。これらの圃場について、圃場中心部の 1 ピクセルの Ts および NDVI 値を読み取り、作物種ごとの気温と Ts との関係について考察した。

3. 結果と考察

3-1. Ts と NDVI の時系列推移と気温との関係

観測日の全対象圃場について、2016 年における Ts 分布と NDVI の時系列変化を作物ごとに示す（図 2）。なお図中の Ts 分布図には破線で気温も示している。2016 年の特徴として全体的に地表面温度が気

表 1：作物種ごとの解析対象圃場数

2016	4月12日	5月30日	7月1日	8月2日	10月21日
corn	19	16	23	17	19
barley	7	22	13	16	12
winter wheat	11	14	12	13	7
sugarbeets	5	2	8	7	6
dry beans	4	8	2	6	6
potatoes	8	5	7	7	5
合計	54	67	65	66	55
2017	5月1日	6月18日	7月20日	8月21日	10月24日
corn	16	16	28	26	26
barley	3	9	5	6	6
winter wheat	10	10	12	10	3
sugarbeets	3	10	9	10	5
dry beans	7	7	8	11	16
potatoes	9	8	9	8	8
合計	48	60	71	71	64

温よりも高いことが挙げられる。これは、式(1)より熱収支において地表面から顕熱が放出されることに起因する。また、大麦や冬小麦の 5/30 と 7/1、サトウダイコンやジャガイモの 7/1 と 8/2 のように、圃場の NDVI が全体的に高い時期は Ts と気温の差が小さい傾向が見て取れる。逆に NDVI が低い時期はこれらの差が大きい傾向にある。これは、NDVI が高い時期は作物が成長していることに加えて十分に農地が灌漑されており、有効エネルギーのほとんどが蒸発散に使用されるため、顕熱が小さい（したがって Ts が気温に近づく）ことが原因だと考えられる。2017 年においても同様の傾向が確認できた。

3-2. 各作物種における NDVI と地表面温度—気温差との関係

図 3 に、2016 年における各作物種の NDVI と、地表面温度・気温間の温度差 (Ts-Ta) との関係を示す。全体的に作物種によらず NDVI と Ts-Ta には負の関係があることが分かる。Corn の例では Moran ら (1994) が提唱するような、植生指標と Ts-Ta との間の台形関係がよく表れていた。NDVI が低い領域 (NDVI<0.2) では Ts は気温より最大 15℃ ほど高い圃場が作物種に関わらず見受けられた。式(1)に見られるように、空気力学的抵抗の値にも影響されるものの、温度差の大きい圃場は顕熱が大きく潜熱が小さい、乾いた裸地圃場であると考えられる。NDVI が低い領域においても温度差の小さい圃場が存在し、これは湿った裸地圃場であると思われる。NDVI が高い領域 (NDVI>0.8) では、作物種によらず地表面温度・気温間の温度差は概ね 5℃ 以内に収まっていた。NDVI が高い圃場は成長した作物が多く存在する圃場で、植物による蒸発散が盛んに行われ、熱収支のうち潜熱が大きな割合を占める。よっ

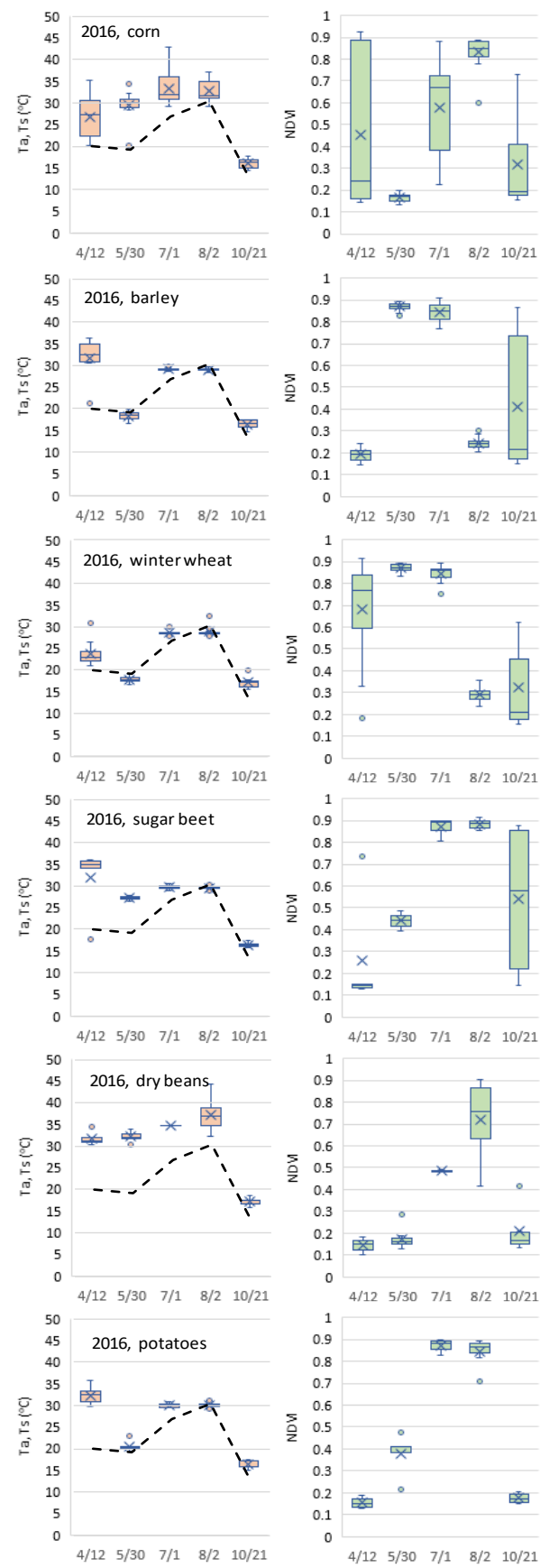


図 2：2016 年における作物種別の地表面温度と気温 (破線) および NDVI 分布図

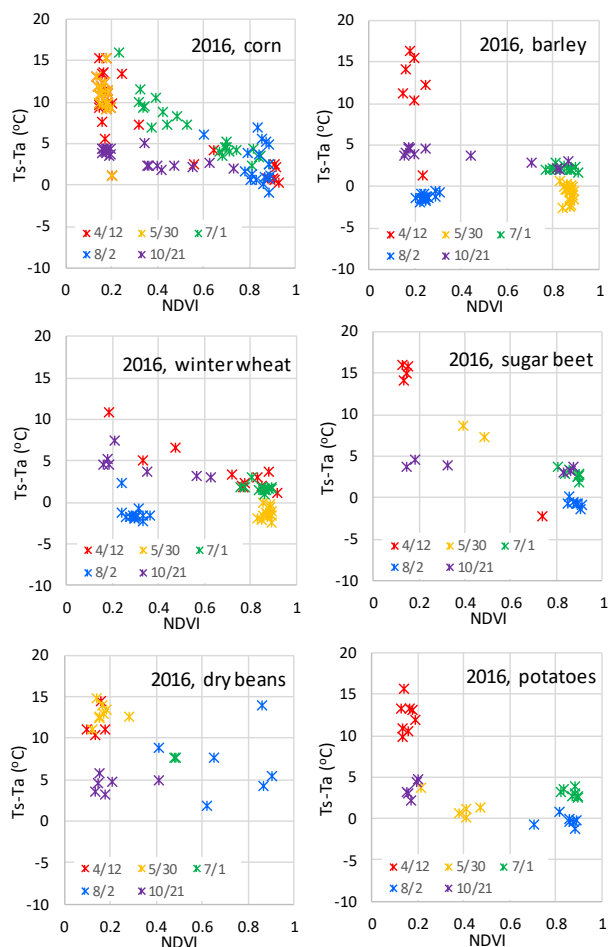


図 3: 2016 年における作物種別の NDVI と地表面－気温差との関係

て、顕熱が小さくなり、結果として地表面温度と気温の差が小さくなったものと考えられる。図 3 に示した作物種のうち、乾燥豆だけは NDVI が高い領域でも他の作物種に比べて大きな温度差が認められたが、NDVI が高い領域のサンプル数が少なかったこと、2017 年にはこのような特徴は認められなかったこともあり、きちんと考察するためにはサンプル数を増やした検証が必要である。

地表面温度・気温間の温度差が負になる例も観測された。鉛直方向の熱収支からはこの地域において晴天日の午前 10:40 (太陽時) 付近に地表面温度が気温を下回ることは考えにくい。そこでこの原因は、水平方向の熱移動の影響 (すなわち移流) によるもの、Ts の推定誤差、あるいは気象台による観測気温と実際の圃場における気温との違いに起因するものだと考えられる。同作物種において観測日ごとの温度差の分布に着目すると、観測日ごとでかたまって分布しており、作物の生育状況を把握できる。例えば、2016 年のトウモロコシは 4 月 12 日と 5 月 30 日は NDVI が低く、生育初期であるが、7 月 1 日、8 月 2 日と経過するとともに NDVI が高くなり、トウ

モロコシが成長していることが分かる。そして、10 月 22 日になると再び NDVI が低くなっており、収穫を終えたことが推測できる (図 3)。2017 年においても、図 3 と概ね同様の傾向が確認できた。

3-3. 各作物種における NDVI の高い圃場群の最低地表面温度と気温との関係

NDVI の高い圃場では作物種によらず安定して Ts が気温に近い傾向にあることに着目し、NDVI>0.8 以上の圃場のみを対象に、各観測日において作物種別の最低地表面温度を図化した (図 4)。2016 年、2017 年ともに、特に 10 月下旬で最低地表面温度と気温の乖離が目立ったものの、夏場を中心に多くの時期で、NDVI の高い圃場の最低地表面温度は気温と非常に近かった。特に 2017 年の 6 月から 8 月にかけては、NDVI>0.8 以上のサンプルが存在したすべての作物種で最低地表面温度と気温の差は 2°C 未満で、その過半数が 1°C 未満であった。温度差が 4°C を超えたのは、圃場サンプル数が少なくデータ解析に信頼性の欠ける 2016 年 8 月 2 日の乾燥豆のみであった。今後サンプル数を増やした上でさらなる検討が必要であるものの、この結果は、一定以上のサンプル数がある場合、NDVI の高い圃場群の中で比較的地表面温度の低い圃場の Ts を気温とみなせる等の知見につながる可能性がある。

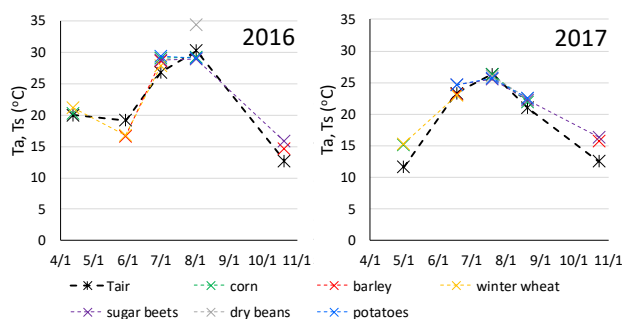


図 4: NDVI>0.8 以上の圃場群の最低地表面温度と気温との関係

なお、図 4 からは最低地表面温度と気温の差において、作物種の影響がほぼ見られない。この理由はおそらく、今回対象とした作物種においては、NDVI の高い生育中期において、作物種による蒸発散量の違いが少ないことから説明できる。FAO の灌漑指標 (Allen et al., 1998) によると、全ての作物ではないものの、多くの路地作物で、圃場水管理が適正に行われた場合の生育中期における蒸発散量の違いは概ね 15%以下、穀物や豆類に限ると概ね 5%以下である。この原理を利用して、作物種の情報が未整備な地域においても、NDVI>0.8 等の条件を設定することにより、作物種に依存しない形で地表面温度が

ら気温を推定できる可能性もある。

4. おわりに

本研究ではアメリカアイダホ州の圃場を対象に、作物種ごとに Landsat8 による地表面温度と観測所の気温データを比較した。また、これらの差と NDVI の関係性を見出すことで地表面温度での気温代替の可能性を検討した。地表面温度—気温と NDVI には負の関係が認められ、これは作物種によらないことが示唆された。しかし、地表面温度—気温がゼロに近い時期は作物の生育状況によって限られるため、常に地表面温度を気温とみなすことができない。今後更に調査を行う必要がある。また、地表面温度—気温はNDVIだけでなく土壌条件や風速も影響を及ぼすと考えられる。影響を及ぼすそれぞれの要因がどのように相互に作用して地表面温度を決定するのか検討することも、気温—地表面温度差が小さくなる条件を発見する上で重要である。

謝辞

本研究は JAXA 地球観測研究公募共同研究「GCOM 陸圏プロダクトとしての全球蒸発散指数推定アルゴリズムの開発」による研究費助成を受けて行われた。

引用文献

- 1) Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998): Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy.
- 2) Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - model. J. Irrig. Drain. Eng. ASCE., 133, 380-394.
- 3) Bhattarai, N., Quackenbush, L.J., Im, J., Shaw, S.B. 2017. A new optimized algorithm for automating endmember pixel selection in the SEBAL and METRIC models. Remote Sensing of Environment. 196:178-192.
- 4) Choi, M/, Kustas, W.P., Anderson, M.C., Allen, R.G. 2009. An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (Iowa, U.S.) during SMACEX. Agricultural and Forest Meteorology. 149:2082-2097.
- 5) Fuqin Li d, Jeppe H. Kjaersgaard c
- 6) Denih, A., Maeda, A., Tasumi, M., Shinohara, Y., Takeshita, S. 2018. Evaluation of GCOM-C ETindex Estimation Algorithm at Lodgepole Pine Tree Open Forest in Idaho, USA. Journal of Rainwater Catchment Systems. 24:1:9-14.
- 7) Duffkova, R. 2006. Difference in canopy and air temperature as an indicator of grassland water stress. Soil and Water Research. 1:4:127-138.
- 8) Goward, S.N., Waring, R.H., Dye, D.G., Yang, J.L. 1994. Ecological remote-sensing at OTTER - Satellite macroscale observations. Ecological Applications, 4:322-343.
- 9) Hadria, R., Benabdelouahab, T., Mahyou, H., Balaghi, R., Bydekerke, L., El Hairech, T., Ceccato, P. 2018. International Journal of Remote Sensing. 39:2:356-373.
- 10) Jung, Y-S., Kim, E.H., Kim, H.H. 1997. Assessment of low temperature damage on rice production in 1980 and 1993 in Korea. J. Agric. Meteorol. 52:917-922.
- 11) Mazurczyk, W., Lutomirska, B., Wierzbicka, A. 2003. Relation between air temperature and length of vegetation period of potato crops. Agricultural and Forest Meteorology, 118:3-4:169-172.
- 12) Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y., Vidal, A. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. Remote Sensing of Environment. 49:246-263.
- 13) Prince, S.D., Goetz, S.J., Dubayah, R.O., Czajkowski, K.P., Thawley, M. 1998. Inference of surface and air temperature, atmospheric precipitable water and vapor pressure deficit using Advanced Very High-Resolution Radiometer satellite observations: comparison with field observations. Journal of Hydrology. 212-213:230-249.
- 14) Sobrino, J.A., Del Frate, F., Drusch, M., Jiménez-Muñoz, J.C., Manunta, P., Regan, A. 2016. Review of thermal infrared applications and requirements for future high-resolution sensors. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing. 54:5:2963-2972.
- 15) Soureshjani, H.K., Dehkordi, A.G., Bahador, M. 2019. Temperature effect on yield of winter and spring irrigated crops. Agricultural and Forest Meteorology, 279:15:107664
- 16) Vancutsem, C., Ceccato, P., Dinku, T., Connor, S.J. 2010. Evaluation of MODIS land surface temperature data to estimate air temperature in different ecosystems over Africa. Remote Sensing of Environment. 114:449-465.

Sentinel - 1 衛星画像を用いた SAR 後方散乱係数と イネの作物パラメータの関連について

Relationship between Sentinel-1 SAR backscatter coefficients and biophysical parameters of paddy rice

○長渡溪太¹・Emal Wali¹・多炭雅博¹

Keita Nagato, Emal Wali, Masahiro Tasumi

Abstract : This study investigated the relationship between SAR backscattering coefficients of Sentinel-1 and biophysical parameters of paddy rice. The study site is in a paddy field in Miyazaki, Japan. The study period was rice cultivation seasons of 2018 and 2019. As the backscattering coefficients, two polarization settings - VH (vertical transmitting, horizontal receiving) and VV (vertical transmitting, vertical receiving) – were investigated. For the biophysical parameters, ground measured plant height, leaf-area index, green vegetation cover and total dry biomass were investigated. A similar trend of backscattering coefficients were confirmed for the paddy field both in 2018 and 2019, implying that a specific temporal trend of SAR backscattering for paddy rice is available. This specific characteristic of paddy rice might be used to detect the area identification of rice cultivation and the monitoring of crop growth of rice. The relationship between SAR backscattering coefficients and biophysical parameters showed some strong correlations, implies a potential of biophysical monitoring of paddy rice by Sentinel-1 SAR observation. Future studies for the year-by-year deviation of the correlations are recommended by increasing the number of observation years.

Keywords : Sentinel-1, SAR, paddy rice, crop monitoring

1. はじめに

農林水産省では、作物生産に関する実態を明らかにするため、作物ごとの作付面積調査を実施している。イネの調査は現地での標本確認によって実施されているが（農林水産省, 2019）、これには多大な時間と労力を要するため、調査精度を維持しつつ、作業の省力化・効率化が求められている。このような水稻作付面積調査に関する問題に対応するため、衛星画像と農地ごとの区画情報についての GIS データを組み合わせることで、調査精度の維持向上や効率化が図られるように検討されている。

これに関して、合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar : SAR）を用いた調査の検討が進められている。SAR は自らのアンテナからマイクロ波を照射し、照射したマイクロ波のうち地表で散乱してアンテナに戻って来たマイクロ波を収集することで、地表についての情報を得る能動型センサである。マイクロ波は可視光と比較すると波長が長いので、雲を透過し地表を観測でき、太陽光を必要としないため夜間の観測も可能であることから天候や時間帯による制約を受けずに観測が可能である。このような特徴から、SAR を用いることで広域を一度に観測することができ、圃場の GIS データと組み合わせた解析を行うことで、圃場の水稻作付実施状況について判断することができる。

それに加え、コメの品質向上を目的とした衛星画像の利用についても研究が行われている。研究事例として、食味に強く影響するコメのタンパク質含量を衛星画像から推定し、品質管理に反映することで販売力の強化を目指す取り組みが北海道で開発されている。青森県と農業環境技術研究所（現農業環境変動研究センター）はタンパク質含有量の推定精度を向上させるための共同研究を行い、付加価値米の販売を実用化している。また、衛星画像から収穫適期を予測し、適期に収穫を行うことで胴割れ米の発生を抑制し、コメの品質低下防止に活用しようとする研究も行われている（石塚, 2014）。

このように、衛星画像から得られる情報を用いて、コメの収穫量増加や品質向上に活用しようとするさまざまな研究が行われており、衛星画像で得られるデータと、コメの収量や品質を示す各作物パラメータとの間にどのような関連があるのかについて調べることの必要性が高まっていると思われる。

SAR 画像にはデータとして後方散乱係数(σ^0 , シグマノート)が与えられている。後方散乱係数は、SAR アンテナから照射されて地表面で反射し、そのうちアンテナに戻ってきたマイクロ波の強度を数値化したものであり、地表に照射したマイクロ波とアンテナに戻ってきたマイクロ波について定量的な解析を進めることができる。本研究では、近年利用環境が格段に向上している SAR 画像について、水稻作付状況調査やイネの収量予測等への活用可能性を評価することを目的とした。宮崎大学農学部実習田にて2018年と2019年の2年間にわたって調査を行い、

¹ 宮崎大学農学部
(〒889-2155 宮崎県宮崎市学園木花台1-1)
(連絡先 Tel: 0985-58-7991、
E-mail: tasumi@cc.miyazaki-u.ac.jp)

水稻生育期間中の σ^0 の変動と、 σ^0 と LAI や乾燥重量といったイネの各パラメータ値との相関を調べ、SAR 画像からどの程度、イネの各パラメータが推定可能であるかについて検討した。

2. 研究方法

2-1. SAR 画像データの入手

本研究には 2018 年 1 月 4 日～12 月 30 日および 2019 年 1 月 11 日～12 月 25 日の Sentinel-1 の衛星画像を使用した。Sentinel-1 は欧州宇宙機関 (ESA) が運用している C バンド SAR であり、地表面形状や海面の流速・波高、海上風の観測等を目的としている。画像は ESA のホームページより入手した。画像の観測モードは IWS (Interferometric Wide Swath) であり、偏波は VV と VH を使用する。この観測モードによる画像の解像度は 20m×22m である。ダウンロード後、ESA が開発・無償提供している SNAP (Sentinels Application Platform) ソフトウェアを使用し、位置情報付与などの下処理を行った。SAR データの解析には ERDAS/Imagine 2018 を使用した。

2-2. 実習田における調査

宮崎大学農学部実習田は、宮崎市清武町木原に位置し、早期水稻コシヒカリを栽培している。水田は全部で 6 面あるが、本研究ではそのうち 1 面を調査対象とした。調査対象とした水田は面積が東西 40m×南北 70m の約 2800m²である。2018 年の田植え日は 4 月 7 日、収穫日は 7 月 27 日、2019 年の田植え日は 3 月 27 日、収穫日は 8 月 1 日である。

調査手順として、まず水稻生育期間中のイネの作物パラメータを計測した。調査項目はイネの草丈、葉面積指数 (LAI)、植被率、乾燥重量の 4 項目である。2018 年 4 月 10 日～7 月 27 日および 2019 年 4 月 5 日～7 月 22 日の期間で、衛星画像の撮影日に合わせて 12 日ごとに圃場での計測を行った。草丈は毎回圃場内で無作為に選んだ 5 株を計測し、その平均値を算出した。選んだ 5 株はサンプル採取し、採取したイネの葉面積指数 (LAI) を ImageJ という画像処理ソフトを利用して測定後、自然乾燥させたのち、乾燥重量を計測した。また現地では圃場のデジタルカメラ撮影を行い、Canopeo というアプリを使用して植覆率を求めた。

2-3. 解析方法

入手した Sentinel-1 画像から、対象地の後方散乱係数 (σ^0) を読み取った。調査範囲として、水田の中央の東西 30m×南北 50m を対象とし、その範囲

にあたる画像内の 15 ピクセル (1 ピクセルは 10m×10m) の σ^0 を読み取り、15 ピクセルの平均値を実習田における σ^0 の値とした。実習田における σ^0 の時系列推移を調べるとともに、水稻生育期間中におけるイネの草丈や LAI といった各作物パラメータとの比較を行った。

3. 結果と考察

3-1. σ^0 について

3-1-1. 2018 年の推移

2018 年の実習田における σ^0 の推移について図 1 に示す。またこの期間中の水田の様子を図 2 に示す。両偏波とも田植え期である 3 月下旬～4 月にかけて σ^0 が大きく下がっていることがわかる。その後 VV 偏波では 5 月に σ^0 が -5dB まで大きく上昇し、6 月下旬になると一旦 -10dB 程度まで減少するが、収穫期に近づくとも再び増加する。収穫日以降になるとやや値は減少するが、-7～-8dB 程度で推移している。VH 偏波の場合は田植え後から収穫期まで徐々に σ^0 が上昇し、収穫期には -12dB 程度まで上昇する。収穫後は徐々に値が減少し、10 月以降は -15dB 程度で推移している。

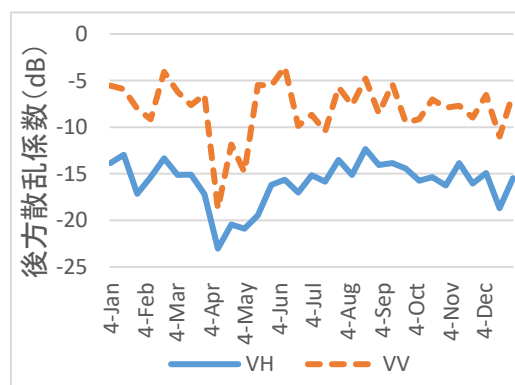


図 1 σ^0 の推移 (2018 年)

実習田では 4 月 4 日に引水が行われ、4 月 5 日以降は湛水状態であった。さらに、図 2 左に示すように、田植えから間もない 4 月ごろはイネの丈は低く、表面は凹凸の少ない滑らかな状態であった。図 1 では引水前の 3 月 29 日から引水後の 4 月 10 日にかけて σ^0 が両偏波とも大きく減少していることが認められ、これは滑らかな水田表面状態を反映したものであると考えられる。

田植えから収穫までの期間は、イネが生長し草丈が伸びるにつれて、植物体による散乱の影響が大きくなるために σ^0 が徐々に大きくなると考えられる。特に 7 月ごろは植物体が密集し地表はほとんど覆われている (図 2 中) ことから、この時期の散乱はほとんどが植物体によるものだと考えられる。

実習田は7月27日に収穫が行われ、全てのイネが刈り取られた状態となり、その後は雑草あるいはイネが再度繁茂している(図2右)。図1より収穫日以降の σ^0 の推移は、両偏波とも収穫期と同程度かそれより高い値を示していることが分かる。これはマイクロ波の散乱が収穫後に繁茂した植物体によって発生しているためだと考えられる。この植物体の草丈は生育時のイネに比べると低いですが、生育の有無や個々の草丈の違いが大きいため、それにより地表面の凹凸が大きくなり、 σ^0 が高くなったと考えられる。



図2 実習田の様子(左 4/10, 中 7/27, 右 8/20)

3-1-2. 2019年の推移

2019年の実習田の σ^0 の推移を図3に示す。またこの期間中の水田の様子を図4に示す。図3において、 σ^0 は年間を通してVV偏波のほうが大きく、両偏波ともに田植え前の3月ごろから値が減少し、田植え期の前後で最小を示し、その後生育期においては多少の増減はあるが徐々に値が増加していることがわかる。偏波ごとに見ていくと、VV偏波では3月中旬ごろから値が減少し、田植え後の4月17日に最小値となり、5月下旬まで値が増加している。その後は値に大きな増減はないが、収穫期まで-9dBほどの値が高い状態が続いている。VH偏波では3月に入ってから値が減少し、田植え直前の3月24日に最小値となり、その後VV偏波と同様に5月下旬まで値の上昇が続き、6月に入るといったん上昇は止まるが、7月に入ると再び上昇する。7月以降は増減を繰り返しているが、-15dB程度と比較的高い状態が続いている。

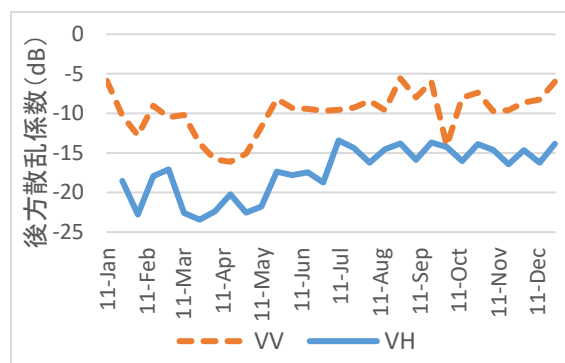


図3 σ^0 の推移(2019年)

実習田で引水が行われた時期は不明だが、3月8日に水田を撮影した時点ではすでに湛水しており(図4)、それ以降も湛水状態が続いている。 σ^0 は両偏波とも3月に入ってから大きく減少している。3月初めに引水が行われたと仮定すると、引水により水田の地表面が水面に変化したことが σ^0 に影響したと考えられる。また、7月前半においてはVV偏波の σ^0 にほとんど変化はないが、VH偏波では大きく上昇している。これは、出穂期に入り稲穂が垂れて水平方向に広がる(図4)ために、VH偏波での散乱が大きくなったものと考えられる。

実習田では8月1日に収穫が行われ、全てのイネが刈り取られた状態となり、その後は雑草が繁茂している(図4)。図3より収穫日以降の σ^0 値の推移をみると、両偏波とも収穫期と同程度かそれより高い値で推移していることがわかる。これはおそらく収穫後の雑草繁茂によって散乱が強くなったためである。



図4 実習田の様子(左から 3/8, 7/10, 8/3, 9/20)

3-1-3. 2018年と2019年との比較

σ^0 の推移について2018年と2019年を比較すると、値に数dB程度の差があることや、値の増減について細かな違いはあるものの、田植え期に最も値が小さくなりその後収穫期にかけて徐々に増加していくという傾向は同じであり、収穫後の σ^0 が高いという点も同様の結果となった。そのため、上で述べたような σ^0 の推移の特徴は、水田においてみられる特徴であると考えられる。この水田特有の後方散乱係数の特徴は、水田とその他の土地利用の判別に活用でき、 σ^0 値によってイネの生育段階についてもある程度把握できると考えられる。また、出穂期のようにVVとVHで σ^0 が異なる推移をする時期があり、より正確に生育状況を判断するには2つ以上の偏波を用いることが望ましいと思われる。

3-2. 作物パラメータの推移と σ^0 との相関について

次に、作物パラメータの推移と、 σ^0 との相関についてパラメータごとに述べる。

(1) 草丈

イネの草丈の推移を図 5 に示す. 2018 年と 2019 年では, 値やその推移に大きな差はない. 収穫期の草丈は 2019 年のほうが 5cm~10cm 程度大きい.

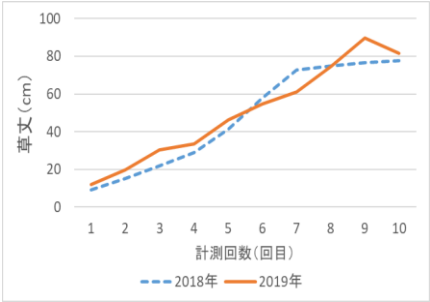


図 5 草丈の推移

図 6 に示す σ^0 との相関においては, VH 偏波および 2018 年の VV 偏波では草丈と σ^0 との間に正の線形関係が見られ, VH 偏波のほうが相関は強かった. 2019 年の VV 偏波では非線形 (対数) の関係がみられ, また他に比べて決定係数 (R^2) も小さかった. VH 偏波についてみると, 値の散布が 2018 年と 2019 年でかなり近く, 線形や近似式も近いものであった. よってこの結果からは, VH 偏波のほうが σ^0 と草丈の相関が高く, σ^0 値からおおよその草丈を予測するのに適していると考ええる.

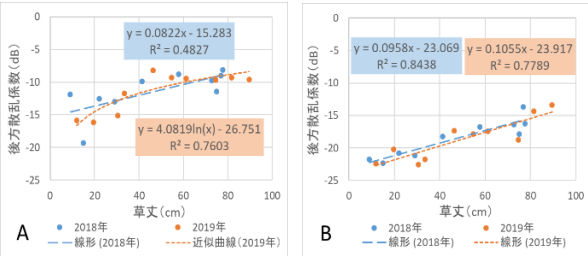


図 6 σ^0 と草丈との相関 (A: VV 偏波、B: VH 偏波)

(2) LAI

LAI の推移を図 7 に示す. LAI は両年とも 5 月後半~6 月ごろに大きく上昇し, 収穫期前に減少している. 値は全体的に 2019 年のほうが高く, 5 月下旬~6 月ごろの値の伸びも大きい, 7 月に大きく減少している.

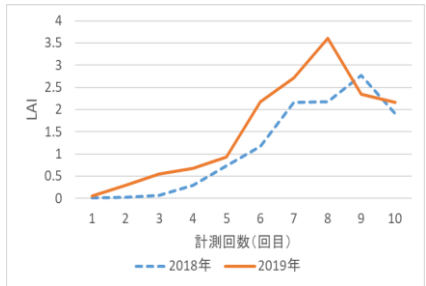


図 7 LAI の推移

図 8 に示す σ^0 との相関においては, 両偏波とも

対数の相関関係がみられた. 偏波ごとにみると, VV 偏波では 2019 年のほうが相関が強いが, VH 偏波の場合は 2018 年のほうが相関が強く, 各年で異なった. これは, LAI の値に両年で差があったことが影響していると考えられる. また, 図 7 および図 8 より, 生育期前半は LAI の上昇は小さいが σ^0 の増加は大きく, 生育期の後半においては, LAI は大きく上昇するが, σ^0 はそれほど大きな変化はないという傾向がみられた.

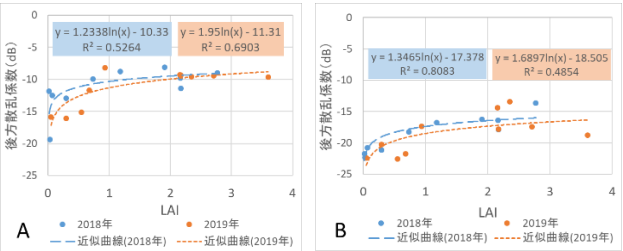


図 8 σ^0 と LAI との相関 (A: VV 偏波、B: VH 偏波)

(3) 植被率

植被率の推移を図 9 に示す. 両年とも 5 月中旬~6 月上旬にかけて値が大きく上昇し, 6 度目の計測時点までは同じような推移をした. 6 月以降は 2018 年のほうが植被率は高いが, 収穫前の 7 月 15 日~7 月 27 日の間に大きく低下している.

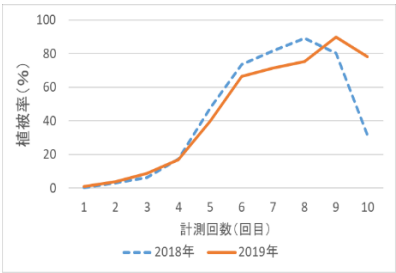


図 9 植被率の推移

図 10 に示す σ^0 との相関においては, 両偏波とも 2019 年のほうが R^2 が高かった. 偏波ごとにみると, VV 偏波では 2018 年は正の線形の関係を示したが, 2019 年は対数の関係を示し, 各年で関係が異なった. VH 偏波では両年とも正の線形関係を示し, 相関式も両年で近いものとなった. 図 9 および図 10 より, VV 偏波では 5 月半ばまでは植被率の増加は小さいが σ^0 の増加は大きく, 生育期後半では植被率は大きく増加するが σ^0 の増加は小さいという傾向がみられた. 一方 VH 偏波では植被率と σ^0 には比例関係がみられ, 各年とも R^2 は比較的高く, 大きな違いはなかった. よってこの結果からは, VH 偏波のほうが σ^0 から植被率を推定するのに適していると考ええる.

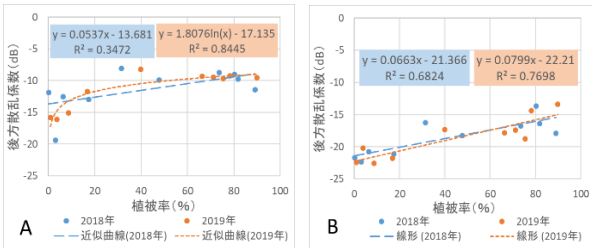


図 10 σ^0 と植被率との相関 (A:VV 偏波、B:VH 偏波)

(4) 乾燥重量

乾燥重量の推移を図 11 に示す。2018 年は 5 月ごろまでは重量はほとんど増加していないが、6 月以降は大きく増加している。2019 年は 2018 年よりも早い 5 月中旬ごろから増加し始めているが、増加の速度は 2018 年に比べてゆるやかであり、収穫直前の重量は 2018 年よりも小さい。

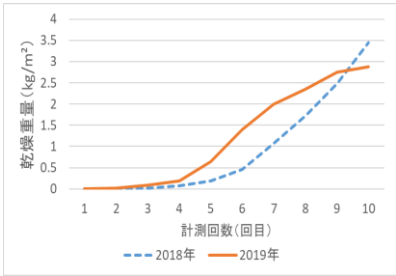


図 11 乾燥重量の推移

図 12 に示す σ^0 との相関においては、VV 偏波では両年とも対数の関係を示した。R²は 2019 年のほうが高かった。VH 偏波では 2018 年は対数の関係、2019 年は線形関係をそれぞれ示した。図 11 および図 12 より、生育期前半は乾燥重量の増加は小さいが σ^0 の増加は大きく、生育期後半では乾燥重量は大きく増加し、 σ^0 の増加は小さい傾向がみられた。

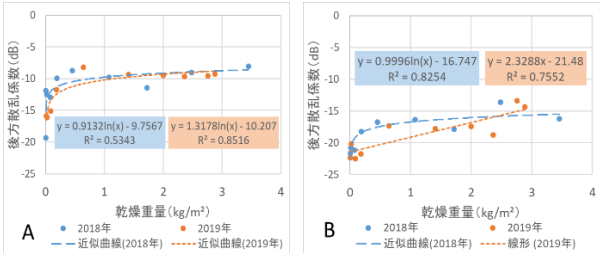


図 12 σ^0 と乾燥重量との相関 (A:VV 偏波、B:VH 偏波)

σ^0 と各作物パラメータの相関については、一部

を除いたほとんどで 2018 年と 2019 年で同じような関係がみられたものの、R²については各年で大きく異なる項目がいくつかあった。また、LAI や乾燥重量については偏波による相関の強さの違いが、2018 年と 2019 年で異なる結果となった。

これらの要因としては、2018 年と 2019 年でのイネの生育状況の違いが影響したのではないかと考えられる。各年の生育状況を比較すると、図 5 や図 7 から 2019 年のほうが草丈も LAI も大きく、イネの生長が大きいことが分かる。作物パラメータごとの相関の強さの違い、あるいは偏波による相関の強さの違いについては、数年分のデータをもとにしたさらなる調査が必要である。

4. おわりに

本研究では、SAR 画像の σ^0 値を水稻作付状況調査やイネの収量予測等に活用できるかどうか検討することを目的に、水田における σ^0 の推移と、 σ^0 とイネの作物パラメータとの相関について調査した。水田特有の σ^0 の変動が認められたことから、 σ^0 値から土地利用について水田であるか否かを判別することは可能であり、水稻作付面積の推定に活用できると考えられる。また、 σ^0 とイネの作物パラメータとの関連については、両偏波ともに一定の相関が認められた。偏波による相関の強さの違いや、作物パラメータごとの相関の強さの違いについては、今後も調査を続け、より長期にわたるデータをもとに検討する必要がある。本研究の結果より、衛星画像を用いて水稻作付面積の推定や、生育状況の把握によるコメの品質向上に活用できる可能性を見出すことができた。今後は各偏波の散乱特性の違いや生育段階ごとの散乱特性を考慮したより細かな解析が必要であると考えられる。

謝辞

本研究は JSPS 科学研究費 補助金 (科研費) JP18K05886 の助成を受けた。

引用文献

1) 石塚直樹 (2014), 農業分野における先進リモートセンシングの高度利用, 農業環境技術研究所成果発表会 2014
2) 農林水産省, 面積調査の概要, (アクセス日: 2020 年 1 月 17 日)
<<https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sakumotu/menseki/gaiyou/index.html#1>>