

作物育種向けドローン空撮画像解析ツールの開発

飯島 俊匡, 浦池 隆文, 林 峻輔, 伊藤 壮生,
岡崎 伸哉, 本間 稔規, 今岡 広一,
中川 浩輔*, 小林 聡*, 五十嵐秀成*, 大西 志全**,
木内 均**, 品田 博史**, 熊谷 聡***, 山下 陽子****

Development of a Drone Aerial Image Analysis Tool for Plant Breeding.

Toshimasa IJIMA, Takafumi URAIKE, Shunsuke HAYASHI, Soki ITO,
Shinya OKAZAKI, Toshinori HONMA, Koichi IMAOKA,
Kosuke NAKAGAWA*, Satoshi KOBAYASHI*, Hidenari IGARASHI*, Shizen OHNISHI**,
Hitoshi KIUCHI**, Hiroshi SHINADA**, Satoshi KUMAGAI***, Yoko YAMASHITA****

抄 録

農作物の品種改良（育種）において、収量性は重要な選抜評価項目の一つであり、その収量性と光合成能力は密接に関係している。光合成能力が高いと葉は活発に蒸散し、気化熱により葉面温度が下がる。つまり、葉面温度が低い育種材料の方が光合成能力が高く、収量性に優れると考えられる。これまで葉面温度の計測は、人が放射温度計を用いて数百点の育種材料を一つずつ定期的に計測しており、多くの時間と手間を要していた。加えて、葉面温度は刻々と変化するため、計測に時間を要すると温度比較が困難になる。そこで、ドローンとサーモグラフィを用いた葉面温度の効率的な計測手法を開発した結果、調査時間を約1/10に短縮可能となった。また、生育解析のための空撮画像解析ツールを開発し、豆類、小麦、水稲及び馬鈴しょで検証した結果、豆類などで葉面温度と収量性の相関が一定程度確認され、育種作業の効率化が見込めた。

キーワード：画像解析，作物育種，葉面温度，UAV

Abstract

In plant breeding, yield is one of the most important selection evaluation parameters, and its yield is closely related to photosynthetic capacity. When photosynthetic capacity is high, leaf transpiration is enhanced, and canopy temperature decreases due to heat of vaporization. In other words, breeding materials with lower canopy temperature is considered to have higher photosynthetic capacity and higher yield potential. Until now, the measurement of canopy temperature has required a lot of time and labor, using a radiation thermometer to measure hundreds of breeding materials by hand. In addition, since the canopy temperature changes from moment to moment, temperature comparisons become difficult if measurements are time-consuming. Therefore, we developed an efficient method of measuring canopy temperature using a drone and an infrared camera, which enabled us to reduce the survey time to about 1/10. And we developed an aerial image analysis tool for growth analysis and confirmed its effectiveness in beans, wheat, rice, and potatoes. In beans and others, a certain degree of correlation between canopy temperature and yield was confirmed, and we expect to improve the efficiency of breeding operations.

KEY-WORDS : Image Analysis, Plant Breeding, Canopy Temperature, UAV

* 十勝農業試験場 Tokachi Agricultural Experiment Station **北見農業試験場 Kitami Agricultural Experiment Station

*** 上川農業試験場 Kamikawa Agricultural Experiment Station ****中央農業試験場 Central Agricultural Experiment Station

事業名：経常研究

課題名：UAV活用型作物育種に向けた効率的な撮影画像解析ツールの開発（令和元～3年度）

1. はじめに

農作物の品種改良（育種）は、農業の生産性や高付加価値化に重要な役割を果たしてきたが、農政上の重要課題である食糧自給率の向上や生産コスト低減などによる農業の体質強化を実現するためには、さらに多収で栽培特性に優れた新品種を育成し、その普及を図っていくことが必要である。しかし、新たな実用品種の育成までには長期間を要し、膨大な育種材料を試験栽培して有望な個体を選抜していく必要がある（図1左）。

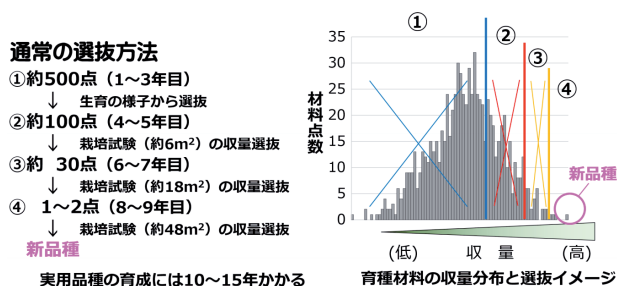


図1 作物育種の流れ

育種における選抜評価では、品質や食味、病害虫への耐性など様々な特性を評価項目としており、収量性もその重要な選抜評価項目となっている（図1）。育種では多数の育種材料を広範囲に試験栽培している（図2）ため、収穫及び選抜評価は手作業で行う必要があり、多くの時間と人手を要している。したがって、収穫を行う前に収量性について選抜評価が行えれば、育種の効率化が可能となる。



図2 小麦の育種圃場

光合成は植物の生長と食糧生産にとって基本となる重要な機能であり、作物の収量性にも反映される。しかし、光合成能力の測定には時間がかかるため、多数の育種材料を計測する必要がある育種には適さない。そこで、光合成能力の間接的な指標として、気孔からの蒸散による気化熱に着目した。作物の光合成能力が高ければ活発な蒸散が行われ、作物の表

面温度（葉面温度）が低下するため、葉面温度が低い育種材料が高い光合成能力を有し、収量性も高い可能性が考えられる。これまでに様々な作物において、葉面温度に顕著な品種間差があり、多収品種の葉面温度が低い事例が報告されている（図3）¹⁻³⁾。

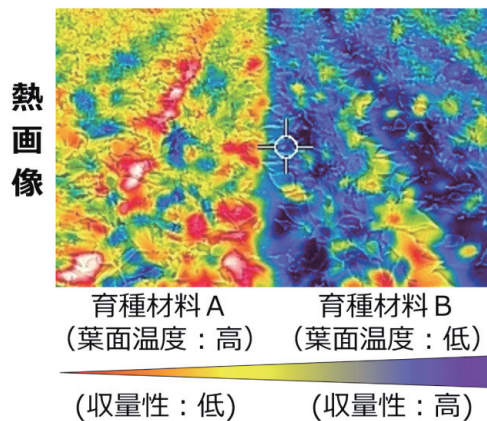


図3 葉面温度と収量性（十勝農試 2015年）

葉面温度の計測は、簡易かつ非破壊的手法であるため、葉面温度から間接的に光合成能力が評価できれば、育種における多収選抜手法として非常に有効である。このため、小麦の一部の育種事業では、放射温度計で測定した葉面温度を収量性の間接指標として利用することが検討されている。しかし、これまで葉面温度の計測は、人が放射温度計を用いて数百点の育種材料を一つずつ定期的に計測しており、多くの時間と手間を要していた。加えて、葉面温度は微気象変動（干ばつや雲の断片的通過など）の影響が大きく刻々と変化するため、広域な育種圃場の計測に時間を要すると育種材料間の正確な温度比較が困難になる。そこで、ドローンとサーモグラフィーを用いた葉面温度の効率的な計測手法と、生育解析のための空撮画像解析ツールを開発することで、作物育種の効率化・迅速化に取り組んだので報告する。

2. 葉面温度の効率的な計測手法の開発

本研究では、道総研で育種を進めている作物のうち、豆類、小麦、馬鈴しょ、水稻を対象として検証を行った。また、機材は地上における葉面温度測定には携帯型の放射温度計（図4）A & D社製AD-5634などを用いた。熱画像の空撮は、DJI社製のドローンMatrice200又はMatrice210とサーモグラフィーZenmuse XT2の組合せ、及びDJI社製のドローンMatrice300 RTKとサーモグラフィーZenmuse H20Tの組合せを用いた（図5）。それぞれの仕様を表1、表2に示す。



図4 放射温度計 図5 ドローンとサーモグラフィー
(上: Matrice210, 下: Matrice300 RTK)

表1 ドローンとサーモグラフィーの仕様1

| ドローン: DJI Matrice200/210 | |
|---------------------------|---|
| 大きさ | 887 × 880 × 378[mm] |
| 最大ペイロード | 標準バッテリー: 約 2.3[kg] 大バッテリー: 約 1.6[kg] |
| 最大飛行時間 (最大ペイロード時) | 標準バッテリー: 13[分] 大バッテリー: 24[分] |
| サーモグラフィー: DJI Zenmuse XT2 | |
| 熱画像解像度 | 640 × 512[pixel] |
| 熱画像画素ピッチ | 17[μ m] |
| 熱画像範囲 (高利得) | -25 ~ 135[°C] |
| 最大フレームレート | 30[Hz] |
| 熱画像レンズ画角 (焦点距離 19mm) | 水平 32[°] 垂直 26[°] |

表2 ドローンとサーモグラフィーの仕様2

| ドローン: DJI Matrice300 RTK | |
|----------------------------|---------------------|
| 大きさ | 810 × 670 × 430[mm] |
| 最大ペイロード | 標準バッテリー: 約 2.7[kg] |
| 最大飛行時間 (H20T 搭載時) | 標準バッテリー: 36[分] |
| サーモグラフィー: DJI Zenmuse H20T | |
| 熱画像解像度 | 640 × 512[pixel] |
| 熱画像画素ピッチ | 12[μ m] |
| 熱画像範囲 (高利得) | -40 ~ 150[°C] |
| 最大フレームレート | 30[Hz] |
| 熱画像レンズ画角 (焦点距離 13.5mm) | 対角 40.6[°] |

2.1 熱画像の撮影条件

ドローンとサーモグラフィーを用いて生育解析に利用可能な熱画像を撮影するためには、対象とする作物により株の大きさや葉の形態、栽培環境などが異なる(図6)ことから、各作物に応じた撮影方法を検討する必要がある。

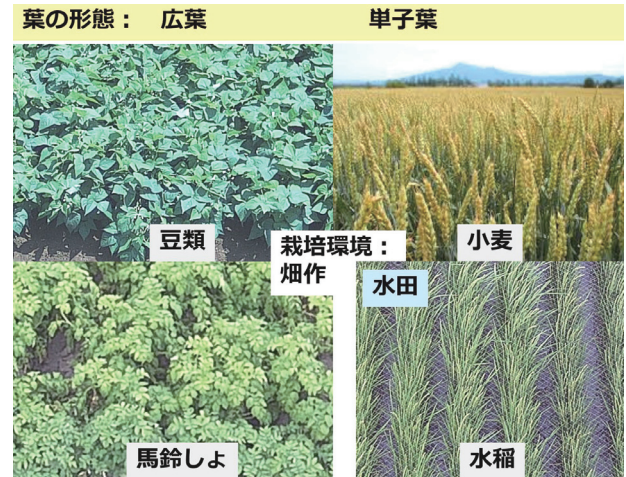


図6 作物ごとの違い

畑作の作物では、図7のように鉛直下向きに圃場を撮影して得られる熱画像から葉面温度を抽出することが可能である。図7に示す熱画像は、低温部から高温部が青～黄～赤で表現される擬似カラー表示となっており、作物の部分が紫色(白黒印刷では濃い灰色)、土壌部分が黄～赤(白黒印刷では薄い灰色)となっていることがわかる。

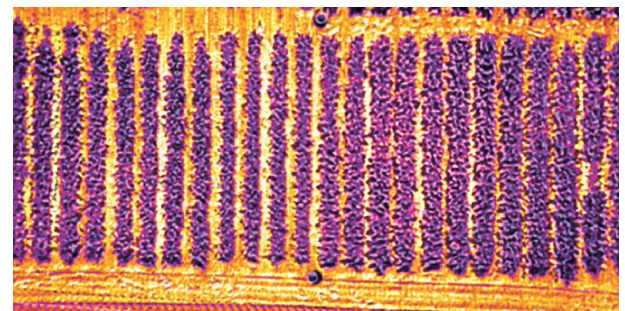
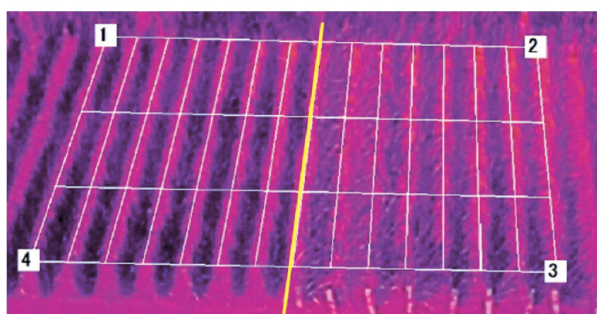


図7 豆類の熱画像(擬似カラー)

水稲の場合、葉の形態が単子葉で細長く、加えて水田に水を入れた時期の熱画像を得る必要があることから、水面による反射の影響を受けずに作物の温度だけを得られるよう、撮影方法を工夫した。具体的には、図8のように条と平行な向きで俯角を取って圃場を撮影することで、稲が重なった状態の熱画像が得られ、水面の影響を受けずに水稲のみの葉面温度の抽出が可能であることがわかった。このとき、水稲において品種間の葉面温度差を比較したところ、古い従来品種と収量性に優れる品種「ななつばし」間の葉面温度差を確認できた。品種間の温度差が小さいため図8に示す擬似カラー表

示では色の違いはわずかであるが、葉面温度が低い水稻は濃い紫色（白黒印刷では濃い灰色）、高い水稻は薄い紫色（白黒印刷ではやや濃い灰色）となっている。



「ななつぼし」 「古い品種」
 (葉面温度：低) (葉面温度：高)

図8 水稻の熱画像と品種間の葉面温度差

さらに、様々な飛行高度で品種間の葉面温度の差を評価したところ、撮影高度が低いほど品種間の葉面温度の差が明確になることがわかった。一方、熱画像一枚にはなるべく多くの育種材料が写っている方が葉面温度の計測及び品種間差の比較のために望ましく、サーモグラフィーの撮影画角が固定であることから、高度が高ければ高いほど広範囲が撮影可能となる。また、熱画像の画素分解能も固定であることから、作物の大きさもしくは育種材料毎の試験区画の大きさに応じて、熱画像の地上分解能を確保するため飛行高度は制限される。具体的には、飛行高度25mでは熱画像の地上分解能は約22mm、飛行高度50mのそれは約44mmとなる。

これらの諸条件を考慮し、葉面温度の取得時期について、獲得した熱画像をもとに検討を行い、各作物における熱画像撮影条件を決定した（表3）。撮影時期に関しては、豆類では地表面が覆われる7月中旬から倒伏や葉の黄化が生じる8月中旬まで、小麦ではこれまでの知見から、出穂期である5月中旬から登熟期を迎える6月下旬まで、馬鈴しょでは株が一定程度生育し、土壌露出が低下する6月下旬から倒伏が生じる7月下旬までの条件が適していた。

表3 各作物における熱画像撮影条件

| 作物 | 撮影方法 | 飛行高度 | 撮影時期 |
|------|------|--------|---------------|
| 豆類 | 鉛直 | 25-50m | 7月中旬 ～8月中旬 |
| 小麦 | 鉛直 | 35-70m | 5月中旬 ～6月下旬 |
| 馬鈴しょ | 鉛直 | 30-50m | 6月下旬 ～7月下旬 |
| 水稻 | 俯瞰 | 20-35m | 7月中旬 ～8月上旬 |

水稻では、止葉期～穂ばらみ期である7月中旬から出穂揃期を迎える8月上旬までの条件が適していた。加えて、7月上旬から下旬において、「えみまる」×「そらゆき」及び「空育191号」×「上育473号」の交配後代を対象に、各生育時期における葉面温度データを検証した結果、穂ばらみ期にあたる7月中旬の葉面温度が重要であることが示された（表4）。この結果は、放射温度計で測定した新旧品種群と「ななつぼし」間の葉面温度差と収量との解析において、出穂前の止葉～穂ばらみ期において有意な負の相関が認められた過去の報告⁴⁾と同様であった。

表4 水稻における葉面温度差と収量の相関係数
 (上川農試 2021年)

| 撮影日 | 7/9 | 7/12 | 7/15 | 7/21 (出穂期) |
|------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| 相関係数 | -0.416 ** | -0.416 ** | -0.578 ** | -0.392 ** |

注)「えみまる」×「そらゆき」および「空育191号」×「上育473号」の交配後代 (n=100)、葉面温度の基準品種は「ななつぼし」、**はp<0.01を示す。

3. 生育解析のための空撮画像解析ツールの開発

3.1 育種圃場向け対空マーカーの試作

前節で定めた撮影条件で撮影した一枚の熱画像は、図7や図8に示すように育種圃場の一部となるが、圃場のどこを撮影したのかを画像から判別することは困難である。ドローンやサーモグラフィーにはGPSも搭載されているが、今回使用した機材のGPS精度では、試験区画の位置を正確に推定することは不可能である。そこで、熱画像に写っている試験区画がどの育種材料であるか画像から判別するため、空撮画像から認識可能な対空マーカーを作成した。

育種圃場では、試験区画とそこで生育する育種材料は既知であることから、試験区画番号が推定できれば良い。また、試験区画は等間隔に整列していることから、一枚の熱画像に対して少なくとも一つの対空マーカーがあれば、試験区画番号との対応付けが可能となる。一方、ドローンは風などの影響を受け、機体の角度や高度が安定しないこともあり、撮影画像の角度や大きさに変動が生じる。加えて、試験圃場を撮影する向きが常に同じとは限らないため、用いる対空マーカーは見る角度に依存せず一意にその番号を識別可能であることが重要である。そこで、同心円状のバイナリコードを用いた対空マーカーとした。今回用いたバイナリコードは1を黒、0を白で表現した12bitのコードで、白黒の各bitを同心円状に並べた時、位相を変えても同じ並び順が生じないよう生成した。

また、今回使用したサーモグラフィーは、得られる熱画像の一回り大きな撮影範囲で可視画像を同時に得られたため、対空マーカーは可視画像から判別することとした。飛行高度25mで得られる可視画像の地上分解能は、Zemuse XT2で

約6mm, Zenmuse H20Tで約12mmであるため、圃場への設置性等も考慮し、対空マーカの大きさは45×45cmとした(図9)。豆類の育種圃場において、試験区画20区ごとに対空マーカを設置し、高度25mで撮影した画像を図10に示す。



図9 対空マーカ (45×45cm)



図10 豆類の試験圃場の空撮画像

次節の開発した画像解析ツールでは、この対空マーカの可視画像を画像解析することで、マーカの位置とバイナリコードによる識別番号を自動的に検出して表示する機能を搭載した。

3.2 生育解析向け画像解析ツールの開発

育種に向けた生育解析を行うため、空撮で得られた熱画像から育種材料の葉面温度を試験区画ごとに抽出する画像解析ツールを開発した。本ツールはWindowsパソコン上で動くソフトウェアとし、ドローンとサーモグラフィーを用いて撮影した育種圃場の熱画像から、各試験区内の葉面に相当する部分について、平均温度及び最低、最高温度を抽出してcsvファイルに出力するものである(図11)。

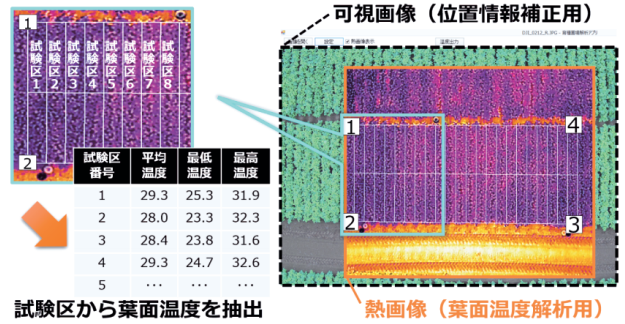


図11 各試験区の葉面温度の抽出

本ツールでは、試験区番号と抽出する各試験区への対応付けが容易となるよう、前節で述べた空撮可視画像から対空マーカの位置と識別番号の自動抽出が可能である。また、各作物はその葉の形態や生育状況などにより、試験区内に占める葉の領域が異なるため、試験区内の計測幅や長さを調整可能とし(図12)、複数の熱画像を連続して処理するため設定データの維持や保存が可能とした(図13)。

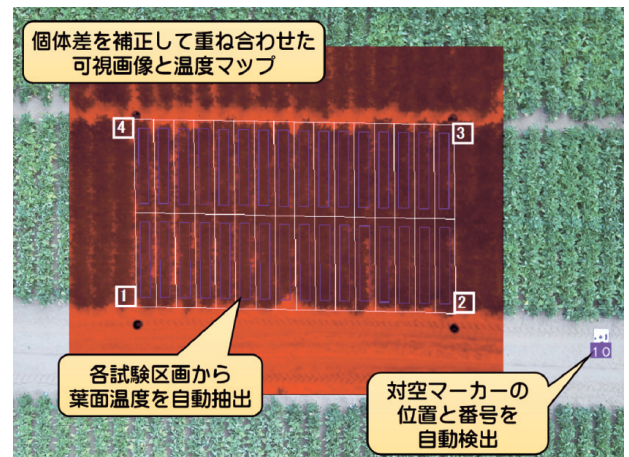


図12 開発した画像解析ツール



図13 画像解析ツールの設定画面

さらに、今回使用したサーモグラフィーでは、レンズの歪みや熱画像の出力値について、個体ごとに差が生じたため、それぞれの補正機能もツールに搭載した(図14)。

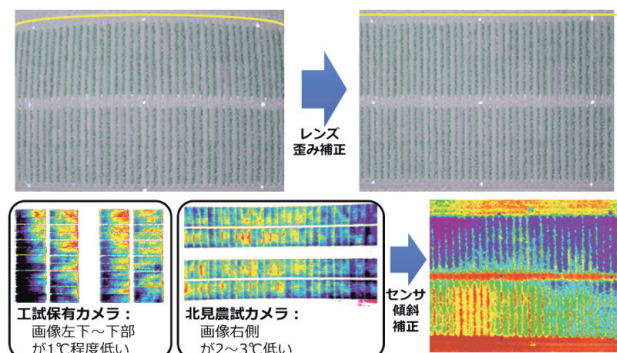


図 14 レンズ及びセンサの補正処理

4. 開発した計測手法の評価

葉面温度を用いて収量性を評価するため、開発したドローンを用いた葉面温度計測法と従来法(放射温度計による地上測定)について、調査時間を比較した結果、豆類(いんげんまめ)では調査時間が約1/10に短縮された(図15)。

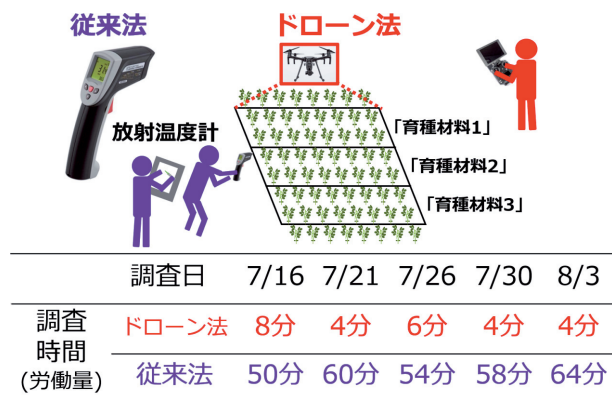


図 15 従来法とドローン法の調査時間 (十勝農試 2021 年)

また、両測定法で得られた葉面温度の相関について豆類(いんげんまめ)で評価した結果、図16に示すような相関が得られた。ドローン法に比べ従来法の方が高温で計測された点が見受けられるが、放射温度計による測定の際に、葉面ではなく地表部分の温度を計測していたと推察され、両測定法の相関関係は生育解析の実用上問題ないと考えられる。さらに、開発した計測手法で得られた葉面温度と収量性の相関関係については各作物で検証を進めている。小麦の品種育成材料を対象とした解析では、 -0.67 程度の相関が確認されており、葉面温度の下位30%を圃場で廃棄するような形で、育種

作業の効率化が想定されている⁵⁾。また、小麦以外の作物において、豆類(いんげんまめ)の品種育成材料を対象とした解析では、 -0.581 程度の相関が確認されており(図17)、水稲や馬鈴しょにおいても育種利用に向けた検討が進められている⁵⁾。

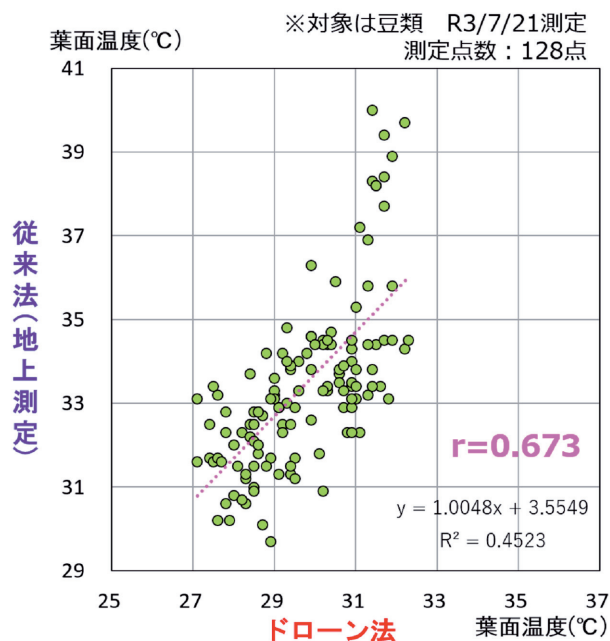


図 16 従来法とドローン法の葉面温度の相関 (十勝農試 2021 年)

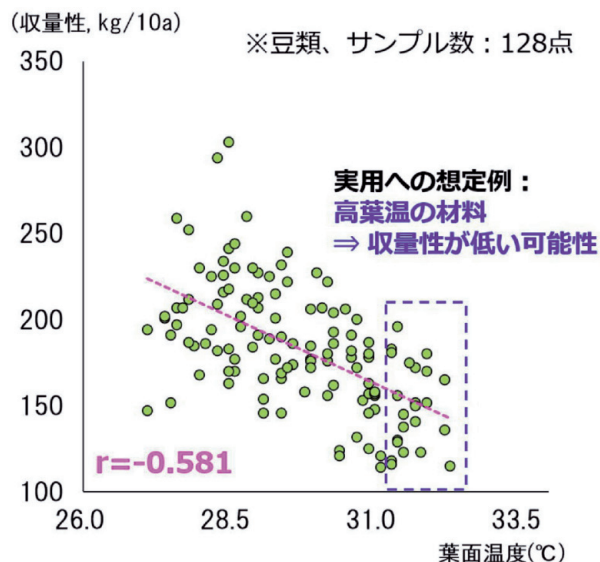


図 17 豆類における葉面温度と収量性の相関 (十勝農試 2021 年)

5. おわりに

ドローンとサーモグラフィーを用いた葉面温度の効率的な計測手法と、生育解析のための空撮画像解析ツールを開発し

た。開発した計測手法を評価した結果、放射温度計による従来法に比べ調査時間を約1/10に短縮するなど迅速化を実現した。また、解析ツールで得られた葉面温度データを生育解析における指標の一つとして活用することで、育種作業の効率化が見込まれる。

育種材料における葉面温度と収量性の相関については、作物によっては一定程度確認されたが、降水量が少ない干ばつ条件など、気象条件によっては相関が大きく低下することが確認された。したがって将来的には、植生指数（NDVI）等、新たな選抜指標を含めた評価方法の開発を図ることで、育種における選抜精度の更なる向上を検討する必要があると考えられる。

引用文献

- 1) Takeshi Horie, Shoji Matsuura, et al., "Genotypic difference in canopy diffusive conductance measured by a new remote-sensing method and its association with the difference in rice yield potential.", *Plant, Cell and Environment*, Vol.29, pp.653-660, 2006.
- 2) Toshiyuki Takai, Masahiro Yano, et al., "Canopy temperature on clear and cloudy days can be used to estimate varietal differences in stomatal conductance in rice", *Field Crops Research*, Vol. 115, pp. 165-170, 2010.
- 3) 中川浩輔, 鴻坂扶美子, 他, "子実用インゲンマメ多収品種「十育B81号」の気象条件に対する収量反応と葉温・気孔密度特性", 第243回日本作物学会講演会論文集, pp.151, 2017.
- 4) 西村努, 佐藤博一, 他, "葉面温度測定による北海道水稲の多収選抜の可能性について", 育種・作物学会北海道談話会会報 61, pp.64-65, 2020.
- 5) 大西志全, 木内均, 他, "UAVとサーモグラフィーで測定した葉面温度によるコムギの収量性選抜の可能性", 日本育種学会第141回講演会, 2022.

