J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 153, p.47 ～ 49 (2023)



# 賞を頂いた研究の続きをオーストラリアで実施中

坂口　敦 [1]

土壌の物理性 149 号掲載の論文「水田転換畑における土壌の乾燥と気孔コンダクタンスを用いたダイズの水ストレスの関係の観測および観測時刻別モデル化」に対して学会賞を頂き，本原稿を執筆させて頂く事になりました．賞を頂いた研究については引き続きオーストラリアで実施中ですので，経過を報告させて頂きます．

現在，私は UAV で各圃場の作物の葉温を自動観測して，その日のうちにスマートフォンに畝間灌漑をすべき圃場を図示するシステムの開発を目指しております．決して農業気象に寝返った訳では御座いません．作物の葉温を土壌水分センサーとして利用しているだけであり，無料のセンサーが面的に圃場に埋設されていると考えております．本システムが普及した場合，適切な灌漑のタイミングが分からない不安から灌水をしすぎて水資源を無駄にしてしまうことと，灌漑タイミングを逃した結果として減収してしまうことの双方が改善され，食料生産量の増加をもたらすものと期待しています．研究実施場所はオーストラリア北部の熱帯サバナ地域にある農業試験場です．当地域は短い雨期の降雨を貯水するためのダムを建設した事により出現した，広大な灌漑農業地帯です．現在も新たな農地を開拓中です．

私は当地域を 15 歳の時に知りました．故 · 母親が私の為にニュージーランド語学研修を申し込んでくれる所でしたが，その費用を知って私は驚愕し，断りました．そこで無料の語学研修などはないかと東京のオーストラリア大使館を訪問した日がちょうど新規灌漑開拓地への投資を促すプレゼンテーションの開催日でした．商社の方々などに紛れて聞いていたところ，その映像の広大さに驚愕し，西瓜の価格に不満を持っていた私はここで西瓜を大量生産しようと思いました．そして乾燥地なので塩ビ管に定間隔で小孔を開けて，西瓜の株元にだけ水やりをしようと考えました．現在，当地で比較用に点滴灌漑区も設けていますから，夢が叶いました．

賞を頂いた研究をもとに，まず圃場全体を UAV で空撮した熱画像から日向の葉の葉温を推定する方法を考案しました．機械学習で葉を認識する手法は人気がありますが，高所から圃場全体を空撮すると個葉は小さすぎて認識できません．低空飛行して解像度を高めれば良いと思われがちですが，圃場全体の空撮に時間がかかり，地域内の多数の圃場を空撮し終える前に UAV のバッテリーが尽きてしまいます．更に，後述致しますが同一時間帯に同圃場を複数回空撮する必要があり，低空飛行はできません．そこで，圃場の熱画像の中で，空撮時の気象条件から推定可能な理論上の日向の葉温がとり得る範囲内の温度を有する画素が日向の葉の画素であると仮定しました．偶然に日向の葉温の範囲内の温度を有する日陰の葉や畝間の地表面もあるはずですが，巨視的に見ているので無視し得ると仮定しています．任意の気象条件下での日向の葉温の上限値は算出可能です．しかし，下限値について計算式はあるものの，計算に葉温観測値が必要なので，葉温を求めるという目的の為には使用できません．そこで，熱画像内の画素の温度に対する画素数のヒストグラム（Fig. 1）の中で葉温の範囲内に入る画素数の割合は，熱画像の空撮時に同時に空撮される可視画像内の日向の葉の画素数の割合と同じになるはずと考えました．Fig. 1 の上限葉温（$T_{c.h}$）は計算で求め，上限葉温よりも低温の画素について，可視画像内の日向葉の画素の割合分の画素数を差し引きし（Leaf の面積），残った画素の最高温度を下限葉温（$T_{c.l}$）としました．そして，葉温の上限値と下限値の範囲内の温度の画素を画素数で

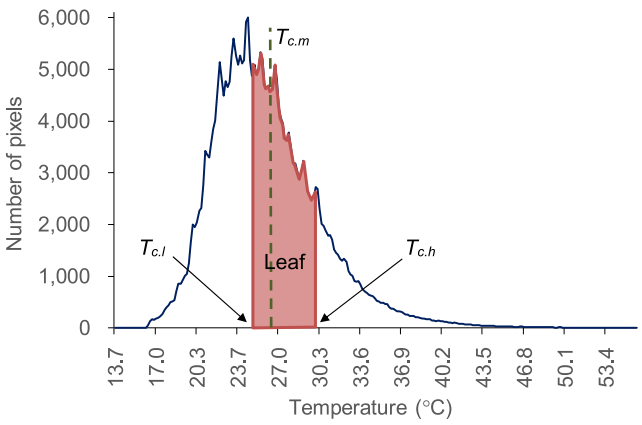



**Fig. 1**　圃場の熱画像の画素の温度と画素数．

[1] 山口大学創成科学研究科
2023 年 1 月 16 日受稿　2023 年 1 月 16 日受理

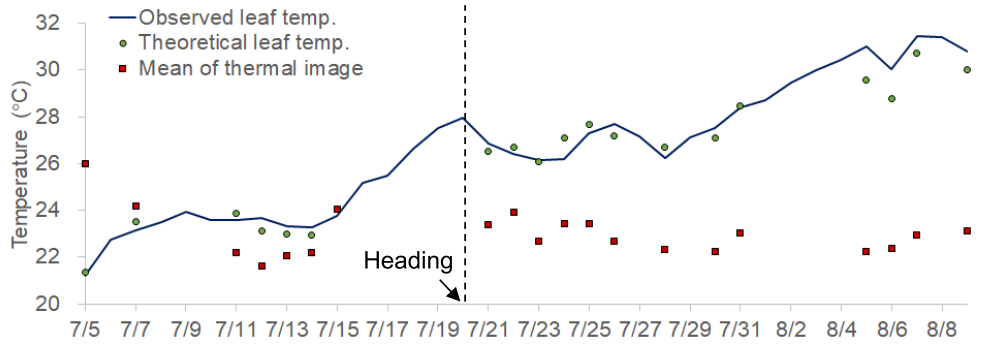



**Fig. 2** 日向葉温推定値（○）と観測値（–）および圃場の熱画像の平均温度（□）.

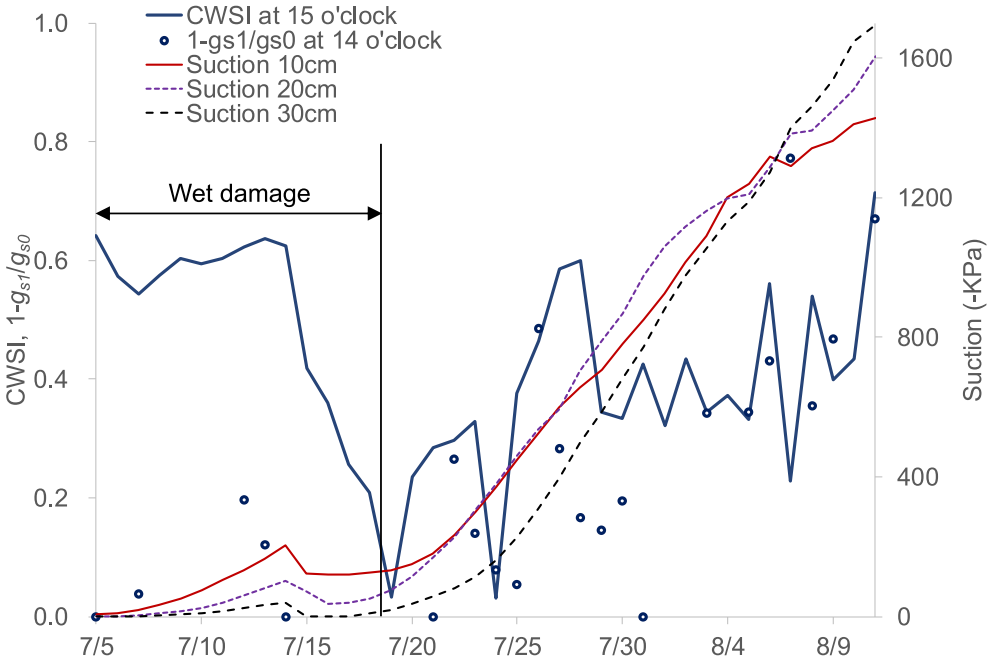



**Fig. 3** 15 時の CWSI と土壌の吸引圧の経日変化（○は気孔コンダクタンスから求めた 14 時の水ストレス：葉温から求める CWSI とは最適観測時刻が異なる）.

加重平均した温度（$T_{c.m}$）を圃場の日向葉の平均温度と考えました．トウモロコシ圃場で観測した結果，Fig. 2 に○で示すように，折れ線で示した熱赤外線センサーを用いて圃場内の 3 か所で定点観測した作物群落上部の温度と近い温度を推定でき，Mean Absolute Error（MAE）は 0.51 °C でした．また，□で示した UAV で空撮した圃場の平均温度とは大きな差が見られました．ここで，可視画像内の日向葉の位置の熱画像内の画素の温度を平均すれば良いと思われる方がいらっしゃるかもしれませんが，可視画像カメラと熱画像カメラのわずかな位置の差に起因して，両画像を完全に重ね合わせる事は困難です．

次に，日向葉の温度を推定する目的は作物が受けている水ストレスの程度を知りたいからですが，葉温と気象条件から Crop Water Stress Index（CWSI）という水ストレス指数を算出できます．しかし，本研究の最終目的は CWSI を求める事ではなく，CWSI から土壌の乾き具合を推定して灌漑のタイミングを判断する事です．土壌が乾けば CWSI は上昇するのですが，根域土壌の吸引圧と CWSI の関係は時刻に影響されており（賞を頂いた論文），土壌の吸引圧を CWSI が最も反映している時刻に UAV を飛ばす必要があります．そこで，時刻別に求めた CWSI と土壌の吸引圧の経日変化の相関関係を調べた結果，研究実施場所のトウモロコシ圃場においては 15 時が UAV を飛ばすのに最適な時刻である事が分かりました．しかし，Fig. 3 に示すように 15 時であっても CWSI と吸引圧の関係は不明瞭であり，CWSI から灌漑タイミングを判断できるようになるのは暫く先になりそうです．尚，観測開始から 7 月 18 日までは土壌の吸引圧が低いにも関わらず CWSI が高い期間が続きますが，これは観測開始前に降った豪雨と，豪雨直後なのに技官さんがスケジュール通りに畝間灌漑を行った結果として根域が酸欠になった為です．別件の浅層暗渠の研究から酸欠でも

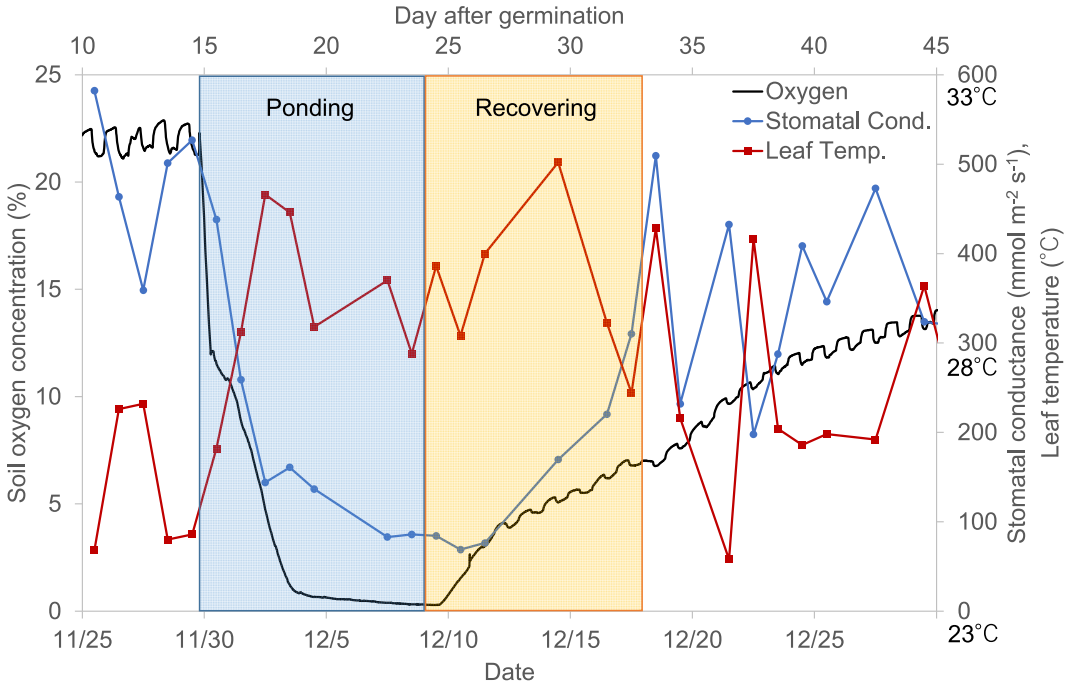



**Fig. 4** 土壌酸素濃度の低下に伴うダイズの気孔コンダクタンスと葉温の経日変化（2021 年に山口大学のグロースチャンバー内で行った試験より）.

気孔コンダクタンスが低下し（= 葉温は上昇して CWSI が上昇し），また酸欠が解消した後も気孔コンダクタンスの回復と葉温の低下に数日間を要する事（Fig. 4）を把握していた為，事前に土壌酸素濃度センサーを埋設しておく事ができました.

最後に，風速と日射の変動を受けて葉温も変動する為，15 時に UAV を 1 回飛ばしただけでは，不運にも 15 時台の平均葉温から大きく外れた葉温を得てしまう可能性があります．そこで，UAV の 15 時台の飛行回数を現実的に 10 分間隔で 6 回と仮定し，その 6 回の CWSI の平均値と 15 時台の 1 時間平均 CWSI との観測期間全日分の MAE を計算した結果，0.023 となりました．また，誤差が最大となった日では 0.067 となりました．多くの作物において収量を低下させない為には CWSI が 0.2 ～ 0.3 に至る前に灌漑する必要がある事が報告されているので，当地では 6 回の飛行で灌漑タイミングを判断する事が可能と考えました．しかし，任意の地域における UAV の必要な飛行回数は観測開始前に予測する必要があります．風速と日射は世界の気象台の一般的な観測項目なので，風速（m $s^{-1}$）と日射（W $m^{-2}$）の 1 時間内の変動の標準偏差と，UAV を 6 回飛行させた場合の CWSI の平均値と 1 時間平均 CWSI との MAE の関係について，3 変数の関係を表すモデルを見つけ出せるソフトウェアである Table Curve 3D を用いて解析しました．当初は風速と日射の変動が激しい日ほど MAE が大きくなり 6 回の飛行では不十分になると予測していましたが特に傾向は見いだせず，風速と日射の変動だけで UAV の必要な飛行回数が決まる訳では無さそうです．詳細は Agricultural Water Management 誌に投稿した原稿に記載しておりますので，掲載されたらご覧頂けますと幸いです.

本観測活動は休日なしで 2 ヶ月間，朝から夕方まで常にリーフポロメータを持って圃場内を歩き回りながら気孔コンダクタンスを測るとともに，10 分おきに UAV を飛ばすという忙しいものでした．昼食は我慢できても暑さで水を切望しました．15 km 離れた町まで食料を買いに行くのも困難で，数日に一度，測定前の早朝にバイクで町まで買い物に走りましたが，事故を起こしてしまいました．通りかかったレンジャーが止血してくれましたが，医者に Tetanus を最後に打ったのはいつかと何度も聞かれたものの，私の英語力では理解できませんでした．看護士が経歴的に何度も打っているはずだと言ったので，それが「破傷風」だと気付きました．農業試験場の職員や私の観測活動を見に来て雑談して帰る農家の方々は面白い方ばかりで，とても辛くともとても楽しい日々でした．今後も毎年渡豪して研究を続け，Fig. 5 に示したシステムを世界各地に普及したいです.

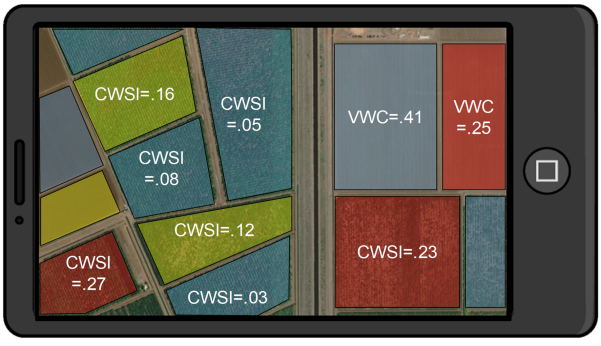



**Fig. 5** 灌漑指数表示システムの完成予想図.