

連載講座「栽培環境における気温の観測技法と利用」

(6) 植物の体温はどのようにして決まるのか

吉本真由美

(農研機構 農業環境変動研究センター)

How is plant canopy temperature determined ?

Mayumi YOSHIMOTO

(Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO)

1. はじめに

作物の環境応答を解析する場合、農耕地等での熱環境を把握することが重要であるが、本連載講座「(3) 農耕地の気温とアメダス (AMeDAS) の気温はどう違うのか」(桑形・福岡, 2019) が示すように、農耕地の気温は、入手しやすい最寄りの気象観測所等での気温と同じとは限らない。そこで本連載講座ではこれまでに、栽培環境における気温を正しく測定するための気温観測の理論の他、測器の作成、設置方法といった実用的なノウハウが紹介されてきた。一方で、作物のストレスの温度応答など、解析対象によっては、気温よりも植物体の温度自体を指標とすることが望ましい場合がある。例えば、イネの開花期高温不稔は、開花時に気温が 34~35℃ を超えると葯の裂開や花粉の溢出が阻害され不稔となる高温障害 (Satake and Yoshida, 1977; Matsui *et al.*, 1997; Matsui *et al.*, 2001) で、その温度応答をみる場合、開花時の穂の温度を指標とすることが理想的である。しかし従来、最寄りの気象観測所の日最高気温等が指標とされることが多く、植物体温 (穂温) とのギャップが解析上の不確実性を増大させている。

そもそも植物に限らず屋外の物体の温度は、日射や上空からの長波放射などの入射エネルギーと、物体表面から大気へと輸送される熱エネルギーとのバランスで決まり、そのプロセスには日射量や物体の近くの気温の他、風速や湿度などの気象条件が関係する。物体が植物の場合は、その他に葉面積や蒸散強度などの植物生理条件も関係する。さらに、植物が鉢植えのように単体で存在しているのではなく、農耕地において「群落」を形成している場合、群落内は、植物の蒸散や地面・水面からの蒸発、茎葉による日射や気流の遮断などにより、群落上とは異なる気象条件 (群落内微気象) を有しており、群落内にある植物体の各部位の温度は、群落上の一般気象よりも群落内微気象の影響を受けている。本稿は、気温だけでなく植物体温についての情報が必要となった場合にどのような方法があるかの指針を示すことを目的とする。まず、農耕地の植物群落にお

いて植物の体温を決定する熱収支構造を簡単に示し、それをモデル化した例として、イネの高温障害リスクを評価するために開発されたイネ穂温推定モデル (IM²PACT, Yoshimoto *et al.*, 2011) を紹介する (2 節)。IM²PACT による解析で、気象条件によって開花時穂温が気温よりも高い場合や低い場合があること、イネの品種の違いによっても穂温が異なることについて紹介する (3 節)。このような植物体温の重要性を踏まえ、それをどう測定したり推定したりするかについて簡単に説明する (4 節)。

2. 植物群落の熱収支

農耕地など植物が群落を形成している場合、植物群落の構造を簡略化して主に葉からなる一つの塊 (バルク) として捉え、その塊の温度を群落温度と呼ぶ。実際の植物群落では、個々の葉の温度の違いや鉛直方向の温度分布等が存在するが、群落温度はそれらを重み付け平均した、上空からみた植物群落表面の温度である。一般に、十分繁茂した農耕地 (例えば、葉で覆われて地面があまり見えない状態) では、このように植物群落を一つの塊とみなしたバルクモデルでも、平均的な葉温を群落温度として精度良く推定することができる。ここでは、バルクモデルを用いて、植物群落の葉温 (= 群落温度) がどのようにして決まるかを簡単に説明する。

2.1 群落熱収支の基本構造

植物群落に入ってくるエネルギーと、植物群落から出ていくエネルギーは、エネルギー保存則に従いバランスしている (図 1)。植物群落に入ってくるエネルギーとしては、日射量 S_d (一部群落表面で反射されて大気に戻る) と大気からの下向き長波放射量 L_d がある。一方、植物群落から出ていくエネルギーとしては、顕熱フラックス H 、潜熱フラックス IE 、群落から大気への上向き長波放射量 L_u 、地中熱流量 G などがあり、式で表すと

$$(1-\alpha)S_d + L_d = H + IE + L_u + G \quad (1)$$

(入ってくるエネルギー) = (出ていくエネルギー)

という熱収支式となる (各項の単位は $W m^{-2}$)。ここで、 α は植物群落表面の日射反射率で 0 から 1 の間の値をとる。

顕熱フラックス H は、高温側から低温側へと熱が運ばれるエネルギー輸送量で、群落上の気温を T_a ($^{\circ}\text{C}$)、群落温度を T_c ($^{\circ}\text{C}$) とすると、 H は温度差 ($T_c - T_a$) ($^{\circ}\text{C}$) に比例する。一方、潜熱フラックス IE は、植物の蒸散・蒸発に伴う気化熱や結露に伴う凝結熱のような、水の相変化に伴う熱の移動であり、群落と大気間の湿度差に比例する。具体的には、湿度を表す物理量として大気圧の中で水蒸気によって占められる圧力を表す「水蒸気圧」を用い、群落上の大気の水蒸気圧 q_a (hPa) と群落表面での水蒸気圧 $q_s(T_c)$ (hPa) との差 ($q_s(T_c) - q_a$) (hPa) に比例する。ただし、群落表面での水蒸気圧 $q_s(T_c)$ は、群落温度 T_c で相対湿度が 100% とした場合の飽和水蒸気圧である。顕熱フラックス H と潜熱フラックス IE は、それぞれ温度差と水蒸気圧差に比例するだけでなく、風速 U にも比例し、同じ温度差・水蒸気圧差であれば、風が強いほど輸送量が大きくなる。これらの比例関係は、それぞれの比例係数を A_h 、 A_e とすると次式で表せる。

$$H = A_h U (T_c - T_a) \quad (2)$$

$$IE = l A_e U \{q_s(T_c) - q_a\} \quad (3)$$

ただし、 l は水を 1 g 蒸発させるのに必要なエネルギー (潜熱量) であり、例えば 25°C のとき 2442 J g^{-1} である。潜熱フラックスの比例係数 A_e は、葉面積や葉の気孔コンダクタンス (気孔の密度や開き具合が関係する葉の蒸散強度) 等により変化する。

上向き長波放射量 L_u は、植物群落表面から上空への赤外放射量で、絶対温度で表した群落温度 $T_c + 273.15$ (K) の 4 乗に比例する。

$$L_u = \varepsilon \sigma (T_c + 273.15)^4 \quad (4)$$

σ は、ステファン-ボルツマン定数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) で、表面温度とそこからの赤外放射量を結びつける物理定数である。 ε は放射率 (射出率) で、物体の表面からの赤外放射のしやすさを 0~1 で表したものである。物体が鏡面体の場合の放射率は 0、完全黒体の場合は 1 で、閉じた植物群落の場合は 0.98~0.99 程度である。

地中熱流量 G は、植物群落の下の地表面から地中に流れる熱量である。その他、水田のように地表面が湛水状態にある場合には、水体への貯熱量 Q_w を考慮する場合もある。 G や Q_w は十分繁茂した農耕地では他の要素に比べて小さい。

(1) 式において、日射量 S_d や下向き長波放射量 L_d 、地中熱流量 G は比較的容易に測定できる。さらに、 H 、 IE 、 L_u について、(2)~(4) 式の群落上の気温 T_a 、水蒸気圧 q_a 、風速 U の実測値があれば、(2)~(4) 式を (1) 式に代入してできる式は群落温度 T_c のみが未知となり、方程式を解くことで T_c を求められる。これを「熱収支を解く」という。非線形方程式のため、実際には線形近似したり、数値的に繰り返し計算を行ったりして熱収支を解く。植物群落を葉一枚として扱うような簡易なモデルから鉛直構造を考慮する多層モデルまで、目的に応じて様々なスケールの微気象モデルが存在するが、どれもこのような「熱収支を解く」作業がモデルの基本となっている。

2.2 イネ穂温推定モデル IM²PACT

植物群落をバルクとして扱う微気象モデルの例として、イネの高温障害リスクを評価するために開発されたイネ穂温推定モデル (IM²PACT, Yoshimoto *et al.*, 2011) を紹介する。IM²PACT は、群落上の気象データから、群落内にある穂の温度を推定するために、2 段階で熱収支を解く構造となっている (図 2)。まず、群落上の大気と主に葉から

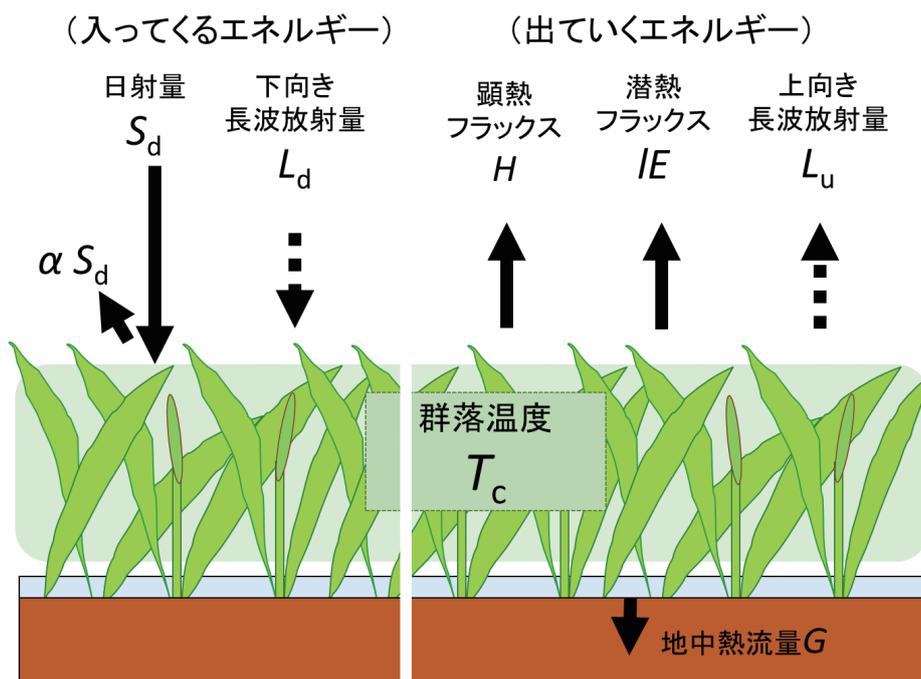


図 1. 群落温度 T_c (canopy temperature) は大気-植物群落間のエネルギーバランスで決まる。

イネ穂温推定モデル (IM²PACT)

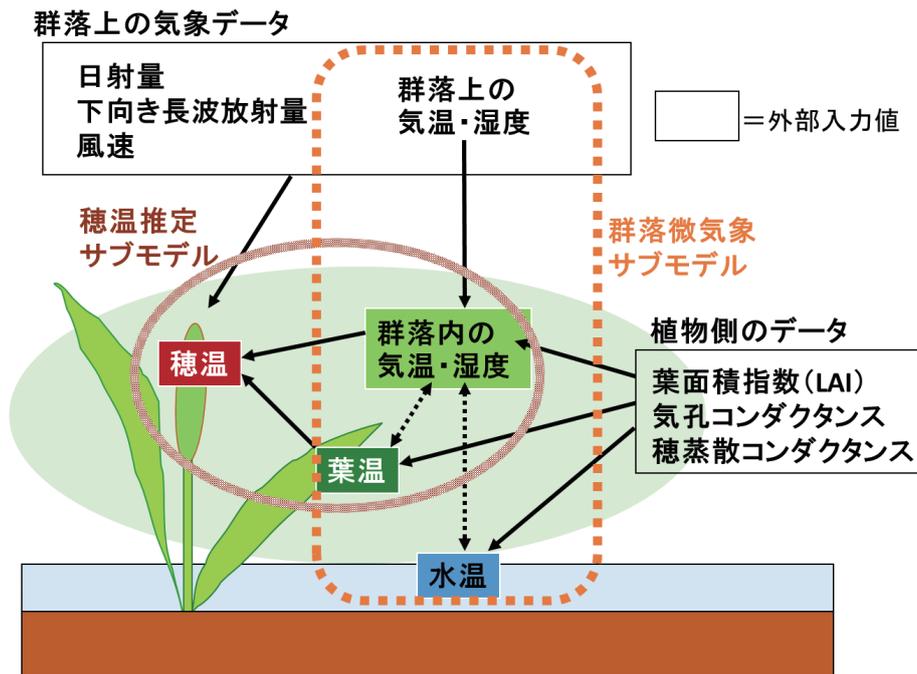


図2. イネ穂温推定モデル (IM²PACT = Integrated Micrometeorology Model for Panicle And Canopy Temperature) の概要.

なる植物群落との間の熱収支を解いて群落温度 T_c や水温を求め (群落微気象サブモデル), それらから群落内の空気温度湿度を推定した上で, さらに群落内の空気と穂との間の熱収支を解いて穂温 T_p を求める (穂温推定サブモデル)。IM²PACT の主な外部入力データは, 日射量 S_d , 下向き長波放射量 L_d , 風速 U , 群落上の気温 T_a と相対湿度等の群落上の気象データであり, その他植物側のデータとして, 葉面積指数, 葉の気孔コンダクタンス, 穂の蒸散コンダクタンス等が必要である。次節では, IM²PACT による解析事例を紹介し, 気象条件やイネの品種の違いによって穂温と群落上気温との関係が異なることを示す。

3. 植物体温は群落上気温と同じとは限らない

3.1 気象条件による違い

3.1.1 オーストラリア, ニューサウスウェールズ州の水田の気象条件

オーストラリアのニューサウスウェールズ州では, 日最高気温がしばしば 40°C を超えるにも関わらず, 開花期高温不稔の深刻な被害は報告されていない。この原因を調べるため, 2006年2月に現地水田で気象観測を実施し (Matsui *et al.*, 2007; 2014), IM²PACT で穂温を推定した (吉本ら, 2007)。イネの開花時間帯である 14 時頃には群落上の気温 T_a は 40°C 近く, 相対湿度は 20%, 風速 U が 3 m s^{-1} 程度で, 非常に乾燥した強風が水田上を吹走していた (図3)。IM²PACT による推定では, 開花時間帯の穂温 T_p は群落上の気温 T_a よりも 6°C 以上低く, $32\sim 33^{\circ}\text{C}$ 程度であった。これは, 極乾燥・強風条件下で, 葉や穂の蒸散が活発に起こり, 植物体から気化熱が奪われることで植物体温が下がったことによる (蒸発冷却)。人間の場合の,

乾燥した風で体表面の汗が蒸発して体表面温度が下がると同じ原理である。

これを熱収支式で表すと次のように説明される。まず, (1)式において, 下向き長波放射量 L_d と上向き長波放射量 L_u とでは一般に L_u の方が大きいものの, 両者はほぼ相殺され, また地中熱流量 G も無視すれば, (1)式は, 次の主な熱収支要素3項のバランスで近似される。

$$(1-\alpha)S_d \sim H + IE \quad (5)$$

葉や穂からの活発な蒸散とは, 熱収支の観点からみると, 群落に入ってくる日射エネルギー $(1-\alpha)S_d$ の多くの部分が, 潜熱フラックス IE として消費されることを意味するが, 極乾燥した強風によって非常に強い蒸散が強制的に起こると, 潜熱フラックス IE が, 日射エネルギー $(1-\alpha)S_d$ よりも大きくなってしまふ場合がある (図4)。この時, (5)式の両辺がバランスするためには, 顕熱フラックス H が負 (大気から群落に向かう流れ) にならなければならない。つまり(2)式において $H = A_h U (T_c - T_a) < 0$, すなわち $T_c < T_a$ となり, 群落温度 T_c が群落上気温 T_a よりも低くなることで, バランスが保たれる。日射エネルギーだけでなく顕熱フラックスをもエネルギー源として, 植物群落からの蒸発散が起こる, という熱収支構造である。この熱収支構造は, 規模は異なるが, 砂漠の乾燥した空気がオアシスの湖の水を盛んに蒸発させることで湖周辺の気温が下がる「オアシス効果」と似ている。オーストラリアのニューサウスウェールズ州の水田で, 気温がしばしば 40°C を超えるにも関わらず, 開花期高温不稔がこれまであまり問題になっていないのは, 極乾燥した気象条件で, 強い蒸発冷却により群落周辺が冷

え、植物体温（穂温）が下がっているためと考えられる。

3.1.2 中国長江流域の水田の気象条件

中国の長江中下流域では、1990年代よりイネの高温不稔の発生頻度が増大している。しかし、中国長江流域では、気温が高温不稔発生の閾値とされる $34\sim 35^\circ\text{C}$ を超えることは少ない。このような気温の温度域にも関わらず高温不稔の発生頻度が増大している原因を調べるため、2006年に中国長江流域の水田で気象観測を実施し (Tian *et al.*, 2010), IM²PACTで穂温を推定した (吉本ら, 2007)。イネの開花時間帯である11時頃には群落上の気温 T_a は $32\sim$

33°C で、相対湿度は80%、風速 U が 1 m s^{-1} 未満であった (図5)。このような多湿で弱風の気象条件では、葉や穂の蒸散が抑えられるため群落の蒸発冷却の効果が小さく、植物体温が上がる。人間の場合でも、高温多湿で弱風といった熱中症リスクが高い気象条件下で、体表面の汗が蒸発せず体表面温度を下げにくくなるのと同じ原理である。

熱収支式(5)は、蒸散による潜熱フラックス IE が小さくなるため、群落に入ってくる日射エネルギー $(1-\alpha)S_d$ の多くの部分が顕熱フラックス H として消費される構造となる (図6)。つまり、(2)式において $H = A_h U (T_c - T_a)$ は

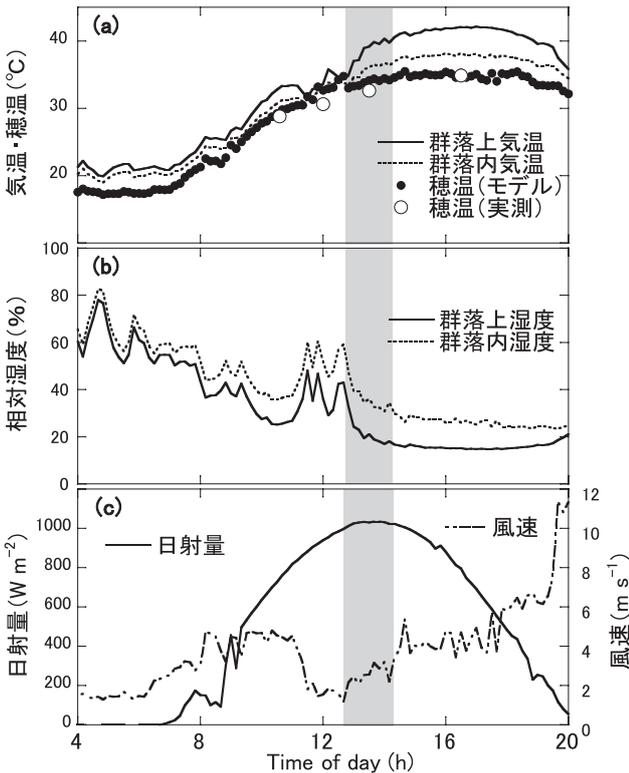


図3. オーストラリアニューサウスウェールズ州の水田の気象条件へのIM²PACTの適用。(a)気温と穂温、(b)相対湿度、(c)日射量と風速。●は穂温のモデル推定値、○は穂温の実測値、網掛け部分は開花時間帯を示す。吉本ら (2007) の第3図を改変。

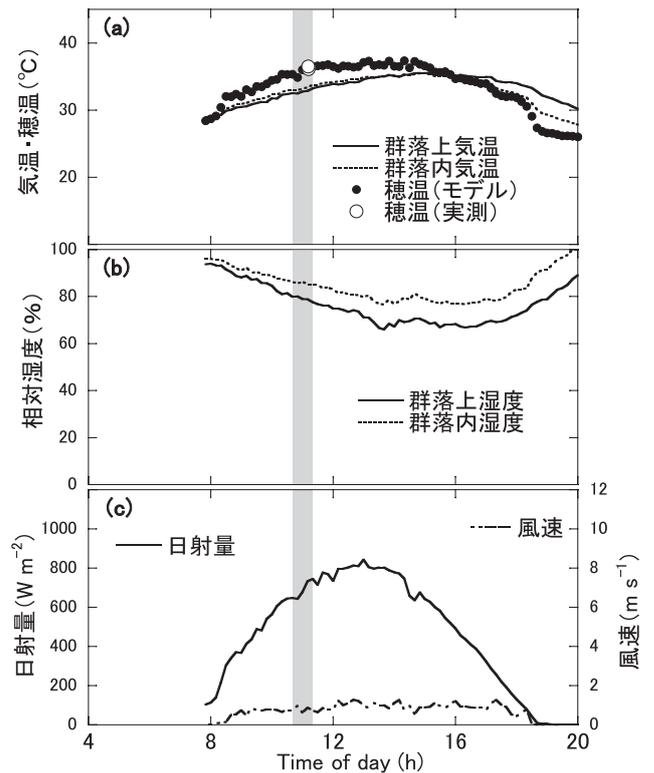


図5. 中国長江中下流域の水田の気象条件へのIM²PACTの適用。表示は図3と同じ。吉本ら (2007) の第2図を改変。

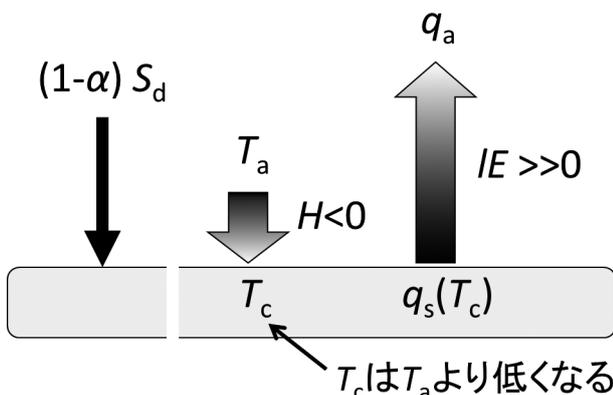


図4. オーストラリアニューサウスウェールズ州の水田での熱収支構造。

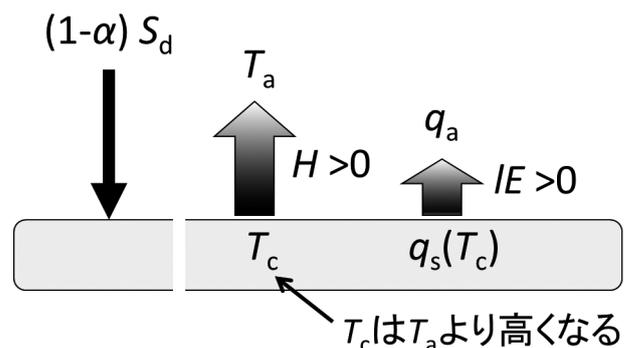


図6. 中国長江中下流域の水田での熱収支構造。

正值となり、群落温度 T_c が群落上気温 T_a よりも高くなる。また、中国長江流域の水田のように風速 U が小さい場合、温度差 ($T_c - T_a$) を大きくしないと、 H と IE の和が $(1-\alpha) S_d$ とバランスしないため、群落温度 T_c はさらに高くなる。IM²PACT による推定では、穂温 T_p は群落上の気温 T_a よりも約 3°C 高く、36°C 程度となった。中国長江中下流域で、気温が高温不稔発生の閾値とされる 34~35°C を超える日が少ないにも関わらず、高温不稔が発生しているのは、植物体温（穂温）を上昇させる多湿で弱風な気象条件が一因であると考えられる。

3.1.3 日本の水田の気象条件

オーストラリアと中国を例に、気候によって穂温と群落上気温との関係性が異なることを示したが、日本の気候においても、日々の気象変動や局所的な気象の違いによって関係性が異なる。2007年8月16日に、埼玉県熊谷市と岐阜県多治見市で当時の国内観測史上最高気温 40.9°C を記録した。気温が高温不稔発生の閾値とされる 34~35°C を超え、それまで環境制御温室等の室内実験での知見であった高温不稔が、国内の屋外水田でも発生した可能性が懸念されたことから、関東・東海の水田で高温不稔の緊急調査を行い、同時に IM²PACT を数値気象モデル ANEMOS（日本気象協会）による 1 km メッシュ地上気象データセット（時別値）に適用して現地水田の穂温を推定した (Yoshimoto *et al.*, 2011)。

図 7 に、日最高気温 (a) と開花時間帯 (10~12 時) の穂温推定値 (b) の分布を示す。日最高気温が 40°C 近くとなった関東・東海の内陸部の開花時穂温は、日最高気温よりも低い。これは、開花時間帯が午前中で、開花時の気温が日最高気温よりも低いことが主要因であるが、もう一つの要因として、群落の蒸発冷却が挙げられる。水蒸気量が一定の場合、気温が上がると相対湿度が下がるが、日本の気候では猛暑日には特に乾燥した大気条件となる場合が多い。このため、関東・東海の内陸では、オーストラリアの水田ほど極端ではないものの、乾燥した大気条件下で強い蒸発

冷却が起こり、穂温が群落上の気温よりも低くなっていた。逆に、千葉県や茨城県の東部では、開花時穂温が日最高気温よりも高い。この地域は海岸寄りで内陸よりも水蒸気量が多く、中国の水田のように蒸散が抑えられ穂温が群落上気温よりも高くなったと考えられる。

なお、本緊急調査では、8月16日前後に収穫期を迎えた水田で例年よりやや不稔率が高かったが、日最高気温の高さから懸念されたほどの不稔率の増大は認められなかった (Hasegawa *et al.*, 2011)。このことから、植物の温度応答をみる場合には、群落内外の熱環境のギャップに留意し、一般の日最高気温等よりも、温度応答に直接関わる植物体の温度を参照することが重要であると示唆される。

3.2 植物の生理的条件の違い

同じ気象条件下でも、植物側の生理的要因によって植物体温は異なる。イネの場合、穂温に直接影響する生理的条件の一つが、穂の蒸散コンダクタンス（蒸散のしやすさ）である。イネの穂の穎花の表面には、葉のように能動的に開閉する気孔はないが、受動的に穎花内部の水分が蒸発する多数の細孔が存在し、穂からも蒸散が起こっている。様々な品種について、開花時間帯の穂の蒸散コンダクタンスを定常型ポロメータで測定したところ (Fukuoka *et al.*, 2012)、3つのシリーズ間の平均値で 0.15~0.67 cm s⁻¹ の品種間差が存在した (図 8)。

同じ気象条件下でも、蒸散コンダクタンスが大きい品種は、小さい品種より蒸散が多く、気化熱がより多く奪われることによって穂温が低くなる。IM²PACT で穂温に対する穂蒸散コンダクタンスの感度を調べたところ、穂蒸散コンダクタンスが 0.15 cm s⁻¹ から 0.67 cm s⁻¹ に増大することによる穂温の低下は、乾燥した気象条件下（気温 35°C、相対湿度 30%）では 3.5°C、湿潤な気象条件下（気温 35°C、相対湿度 70%）でも 2.1°C 程度と推定された。開花期高温不稔は、閾値 34~35°C を超えて温度が 1°C 増えるごとに 16% 不稔率が増大するという報告があることから (Kim

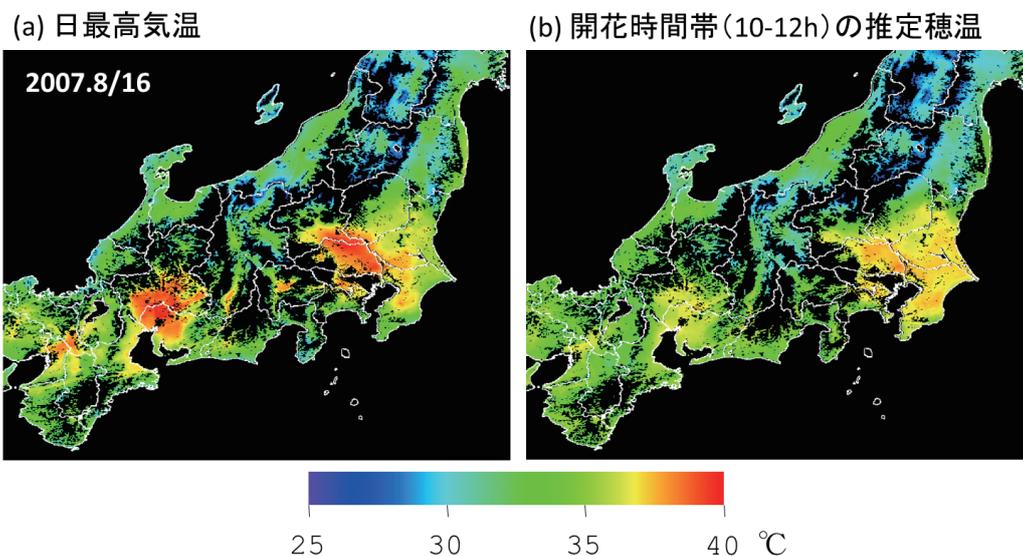


図 7. 2007 年猛暑日 (8 月 16 日) の日最高気温分布 (a) と開花時間帯 (10~12 時) の穂温分布。穂温は ANEMOS データセットに IM²PACT を適用して推定。Yoshimoto *et al.* (2011) の Fig. 7 を改変。

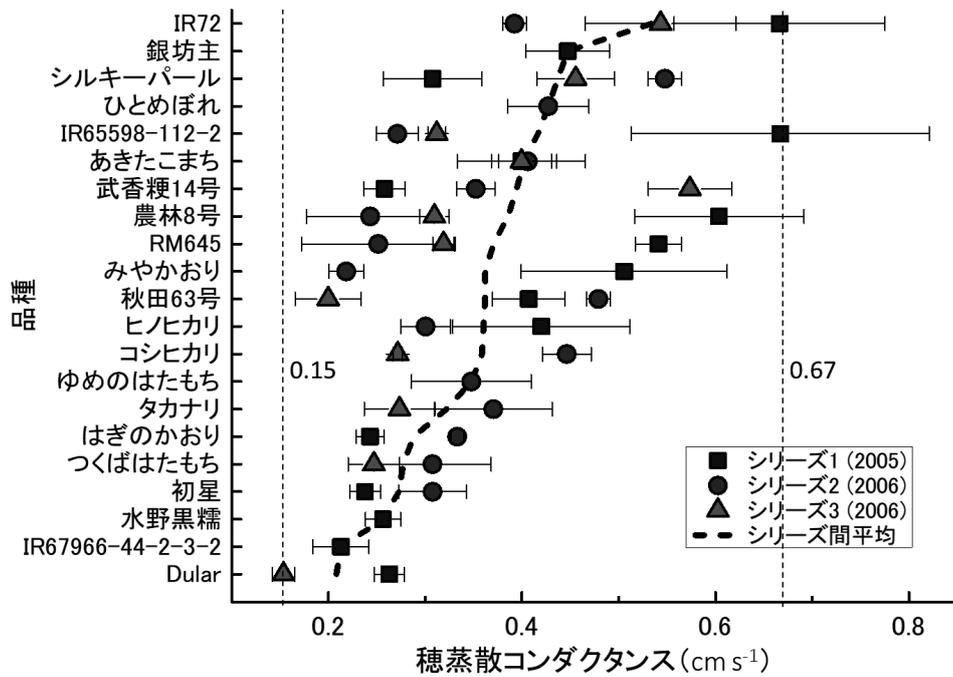


図8. 様々なイネ品種の開花時間帯の穂の蒸散コンダクタンス. Fukuoka *et al.* (2012) の Fig. 3 を改変.

et al., 1996), 穂の蒸散能力を強化することで穂温を下げ、開花期高温不稔を減らす適応戦略は有効であると考えられる。このように、モデルによる穂温の推定は、品種改良の目標設定や適応技術の有効性の定量評価にも役立つ。

4. 植物体温を知るために

イネの穂温を例として、植物体温が決まる熱収支構造を説明し、そのメカニズムから植物体温が群落上の気温等と同じとは限らないこと、植物体温を参照することが農作物の温度応答の解析上の不確実性を低減し、温度ストレスや収量への影響の予測や適応研究にも有用であることを示した。このように植物体温を知ることの重要性を踏まえ、それをどう測定したり推定したりするかについて簡単に紹介する。

4.1 接触型センサによる直接測定

対象とする植物体の表面に熱電対等のセンサを直接付けて測定する方法である。屋外での日射・放射環境がセンサ自体を昇温・冷却させることによる測定誤差を避けるため、極細の熱電対を使用する。線径 0.05~0.10 mm 程度の熱電対を使うことで、素線への貯熱や素線を通じた熱伝導による誤差を最小限にとどめることができるが、細いほど断線しやすくなるため、線径の選択に注意が必要である。また、測温部から素線 1~2 cm を測定対象表面と一緒に固着すると、素線を通しての熱の移動の影響をほぼ無くすることができる。葉などの植物体表面にセンサを密着させる方法としては、セロハンテープの細片や合成ゴム系接着剤等が用いられることが多い。ただし、テープや接着剤で植物体の表面を広く覆ってしまうと、その部分の蒸散が阻害され表面温度が変わってしまうため、できるだけ接着面積を小さくする一方、センサが外れてしまっても意味をなさないので、確実に密着させる必要がある。これらに留意した

上で、熱電対の出力をデータロガー等に入力することで、植物体温の真値の連続測定が可能である。熱電対を植物体表面に付けて測定する方法については、本條 (1983) や岡田 (2010) に詳しい説明がある。一般に屋外では、風による植物体の揺れや日射 (紫外線)・乾燥によるセンサ部の固着劣化のため、極細の熱電対センサをずっと植物体に貼り続けた状態を保つことは難しく、頻繁にセンサの状態を確認する必要がある。また、センサの測定部分は点であり、測定値の代表性を確保するためには、多点での測定が必須である。

4.2 非接触型センサによる間接測定

4.2.1 赤外線熱画像測定装置

物体から放射される赤外線エネルギーを検出して、温度に換算して画像 (熱画像) として表示する装置で、サーモグラフィ等とも呼ばれる。非接触で、視野領域内の温度分布を測定し、視覚的に表示することができる。対象物の温度を直接測定しているのではなく、黒体放射を仮定して、ステファン-ボルツマンの法則 ((4)式) から、対象物からの赤外線エネルギーを温度に換算したものであり、温度の絶対値の精度は、接触型センサによる直接測定と比べて低い。温度精度の問題とその対処については、同じ測定原理である次節の 4.2.2 スポット測定タイプの赤外線放射温度計で述べる。

熱画像から植物体の一部部位 (例えば水稻群落の中にある穂) の温度を抽出するには、専用のソフトウェア等を用いたデータ処理が必要となる。なお、近年は熱画像と同時に可視画像を保存する機能が装備されているが、可視画像と熱画像とで空間分解能が異なり、熱画像の空間分解能は可視画像に比べて低い場合が多いので、データ処理時には注意が必要である。また、熱画像は空間分布の把握には優れているが、日射や風速の変動により時々刻々変化する植

物体温を連続的に測定することは困難である。応答時間や空間分解能、内部回路における処理精度等、性能により様々な価格帯のものがあるが、一般には高価である。

4.2.2 スポット測定タイプの赤外線放射温度計

赤外線熱画像測定装置と同様に、物体から放射される赤外線エネルギーを温度に換算して出力する放射温度計であるが、比較的狭い視野（スポット）で視野内の平均値を出力する。小型で手軽に、非接触で測定でき、赤外線熱画像測定装置に比べて安価である。スポット測定タイプは、センサからの距離が大きくなるにつれて測定視野が広がるため、温度を測ろうとする標的の大きさと測定視野との関係にも注意が必要である。

赤外線熱画像測定装置やスポット測定タイプの赤外線放射温度計は、黒体放射を仮定し、対象物からの赤外線エネルギーを検出して温度に換算し出力するもので、放射温度計が出力する測定温度には、測定原理上不可避な真の温度との差（誤差）が存在する。主な誤差要因とそれを踏まえた放射温度計使用上の注意を以下に示す。

- (1) 一般に測定対象物は黒体ではないため、その放射率 ε は1ではない。本来は、接触型センサ等で同時に測定して対象物の真の温度を求め、それと放射温度計の測定値を比較して、対象物の正しい放射率 ε をあらかじめ算出しておき、測定値を補正する必要がある。真の表面温度を T_0 (°C)、放射温度計の出力温度を T_m (°C) とすると、放射率は次式で算出できる。

$$\varepsilon = \frac{(T_m + 273.15)^4}{(T_0 + 273.15)^4} \quad (6)$$

放射率を設定できるタイプの温度計の場合は、(6)式で算出した ε を設定する。または接触型センサ等で真の温度を同時測定する際に、測定温度が真の温度と同じになるまで ε を少しずつ可変させる機能がある場合もある。放射率を設定できないタイプの温度計の場合や、測定後に放射率による補正をしたい場合は、(6)式で算出した ε を用い、次式で測定値 T_m を補正する。

$$T_0 = \frac{T_m + 273.15}{\varepsilon^{0.25}} - 273.15 \quad (7)$$

測定対象物が植物体の場合、近似的に黒体とみなしたり $\varepsilon = 0.98$ 等と仮定したりするケースが多いが、(7)式から見積もればわかるように、 $\varepsilon = 1$ と $\varepsilon = 0.98$ の違いでも1.5°C程度の温度誤差が生じるので注意が必要である。

- (2) 放射温度計内部では、サーモパイルや半導体等の赤外線検知素子が赤外線エネルギーを受光し、電気信号に変換している。赤外線検知素子は、測定対象物からだけでなく、周囲の環境や装置自体からの赤外線エネルギーも常に受光しており、測定対象物の温度が同じでも、測定結果が同じとは限らない（再現性の問題）。温度ドリフトは再現性の問題の一つで、例えば、放射温度計を保管場所から屋外に持ち出してすぐに測定すると、装置の筐体や内部センサの温度変化により測定

値に温度ドリフトが生じ、測定誤差が生じる。温度ドリフトに伴う測定誤差を低減するためには、屋外では装置に日射除けをし、装置内部まで外気温に馴染ませてから測定を行う等、測定環境の急変を避ける対処が最低限必要である。

- (3) 用途により放射温度計が利用する波長域が異なることに注意して機種を選定する。放射温度計で利用される赤外線の波長域は、一般に、大気の窓と呼ばれる3~5 μm か 8~14 μm となっているが、屋外での常温の測定には8~14 μm の放射温度計を用いる。3~5 μm のものは300~700°Cの高温の測定や施設内での使用を想定しており、屋外では日射の影響を受けるため、正しい測定ができない。
- (4) 近年の用途拡大により様々なタイプの放射温度計が製品化されている。メーカーや機種によって、温度精度を向上させるための技術や信号処理回路の性能に差があり、それがほぼ価格にも反映されている。赤外線放射温度計を選定する際は必ず、メーカーが提示する仕様において、測定波長域、応答時間、精度定格（accuracy）、再現性（repeatability）等を確認し、使用目的に対し許容できるかを見極めることが重要である。

4.3 熱収支モデルによる推定

本稿で紹介してきたような熱収支式を解いて見積もる方法である。入手しやすい一般的な気象データや植物側のパラメータの設定により、植物体温の連続値を推定することができる。物理法則に基づくため温度の決定プロセスが明らかであり、植物体温だけでなく、植物からの蒸散量や地面からの蒸発量など、熱収支に関連した他の情報も得られる利点がある。

ただし、モデルは万能ではなく、一度は実測値による検証が必要である。例えば、日射量や温湿度、風速などの気象条件が変動する数日間、植物体温を実測して、推定値と実測値が合うかを検証する。モデルは厳密にはその検証期間に出現した気象条件の範囲内において有効であり、その範囲外にモデルを適用する場合は、その都度検証を行うことが望ましい。

また、他の作目や異なる群落構造に適用する場合は、パラメータやモデルの構造自体を変更する必要がある。例えばIM²PACTは主に稲・開花期のイネ群落を対象としており、穂が十分繁茂した葉層の中にあり、穂は葉の量よりも少ないという群落構造を想定している。コムギのように穂がすべて葉層の上に出ている場合や、同じイネでも葉層において穂が葉の量に匹敵するほど多い場合などには、モデルの構造を再考する必要がある。

一方、熱収支モデルを自作せずとも、試験研究機関や大学等で主に研究目的で運用されている、気象データの閲覧や入手が可能なウェブサイトで、気象データを使って推定された農作物の生育や耕地微気象のデータを掲載している場合がある。例えば、農研機構で運用しているモデル結合型作物気象データベースMeteoCrop DB (Kuwagata *et al.*, 2011)は、全国のアメダス地点と気象官署地点の作物気象データを提供しており、イネの生育状況や水田水温の他、IM²PACTによる出穂開花期以降の穂温の推定値も掲載し

ている。詳細は <https://meteocrop.dc.affrc.go.jp/real/> を参照されたい。

植物体温を知る方法として、熱電対等の接触型センサによる直接測定、放射温度計等の非接触型センサによる間接測定、熱収支モデルによる推定を紹介したが、それぞれに長所・短所があるため相互に補うとよい。上記の中では、非接触型センサ、特にスポットタイプの放射温度計が誰にでも扱える最も手軽な方法であるが、出力値は真値ではなく、測定原理上必ず誤差を含んでいることに注意し、上記事項に十分注意してできるだけ誤差を減らす必要がある。また、出力値を鵜呑みにせず、適宜接触型センサによる直接測定との比較や、物理的な考察（同じ気象条件下で測定して植物体温の出力値に再現性や規則性があるかどうかなど）により、不自然な値でないかを確認できれば理想的である。

熱収支モデルは、実測値による検証が必要であるが、一度モデルのパラメータが決まれば、植物体温の非測定期間を補間したり、実測値のクオリティーチェックに援用したりできる。そのためには、基本的な気象要素の把握が必要である。特に、強制通風で正しく測定された気温、湿度の他、風速・日射量があれば、簡単な熱収支解析が可能となる場合があるので、これらの基本的な気象要素を押さえておくるとよい。

引用文献

- Fukuoka M, Yoshimoto M, Hasegawa T, 2012: Varietal range in transpiration conductance of flowering rice panicle and its impact on panicle temperature. *Plant Production Science* **15**, 258–264. DOI <https://doi.org/10.1626/pp.s.15.258>
- Hasegawa T, Ishimaru T, Kondo M, Kuwagata T, Yoshimoto M, Fukuoka M, 2011: Spikelet sterility of rice observed in the record hot summer of 2007 and the factors associated with its variation. *Journal of Agricultural Meteorology* **67**, 225–232.
- 本條 均, 1983: 表面温度の測定. *農業気象* **39**, 125–127.
- Kim HY, Horie T, Nakagawa H, Wada K, 1996: Effect of elevated CO₂ and high temperature on growth and yield of rice. II. The effect on yield and its components of Akihikari rice. *Japanese Journal of Crop Science* **65**, 644–651.
- 桑形恒男・福岡峰彦, 2019: 連載講座「栽培環境における気温の観測技法と利用」(3)農耕地の気温はアメダスの気温とどう違うのか. *生物と気象* **19**, 10–14.
- Kuwagata T, Yoshimoto M, Ishigooka Y, Hasegawa T, Utsumi M, Nishimori M, Masaki Y, Saito O, 2011: MeteoCrop DB: an agro-meteorological database coupled with crop models for studying climate change impacts on rice in Japan. *Journal of Agricultural Meteorology* **67**, 297–306.
- Matsui T, Kobayasi K, Nakagawa H, Yoshimoto M, Hasegawa T, Reinke R, Angus J, 2014: Lower-than-expected floret sterility of rice under extremely hot conditions in a flood-irrigated field in New South Wales, Australia. *Plant Production Science* **17**, 245–252.
- Matsui T, Kobayasi K, Yoshimoto M, Hasegawa T, 2007: Stability of rice pollination in the field under hot and dry conditions in the Riverina region of New South Wales, Australia. *Plant Production Science* **10**, 57–63.
- Matsui T, Omasa K, Horie T, 1997: High temperature-induced spikelet sterility of japonica rice at flowering in relation to air temperature, humidity and wind velocity. *Japanese Journal of Crop Science* **66**, 449–455.
- Matsui T, Omasa K, Horie T, 2001: The difference in sterility due to high temperatures during the flowering period among japonica-rice varieties. *Plant Production Science* **4**, 90–93.
- 岡田益己, 2010: 温度の正しい測り方(3)熱電対の作り方・使い方. *生物と気象* **10**: A-4. <http://www.agrmet.jp/sk/2010/A-4.pdf>
- Satake T, Yoshida S, 1977: High temperature-induced sterility I indica rices at flowering. *Japanese Journal of Crop Science* **47**, 6–17.
- Tian XH, Matsui T, Li SH, Yoshimoto M, Kobayasi K, Hasegawa T, 2010: Heat-induced floret sterility of hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars under humid and low wind conditions in the field of Jiangnan basin, China. *Plant Production Science* **13**, 243–251.
- Yoshimoto M, Fukuoka M, Hasegawa T, Utsumi M, Ishigooka Y, Kuwagata T, 2011: Integrated micrometeorology model for panicle and canopy temperature (IM²PACT) for rice heat stress studies under climate change. *Journal of Agricultural Meteorology* **67**, 233–247. <https://doi.org/10.2480/agrmet.67.4.8>
- 吉本真由美・松井 勤・小林和広・中川博視・福岡峰彦・長谷川利拓, 2007: 穂温推定モデルによる水稻の高温不稔の気象的要因の解明. 第224回日本作物学会講演会要旨集, 162–163. DOI <https://doi.org/10.14829/jcsproc.224.0.162.0>