

早期水稲のポリエチレンフィルムマルチ栽培システムに関する研究 (第2報) サーモグラフィ装置による水田の熱画像解析

永田雅輝*・日吉健二*・岡田芳一*・梅崎輝尚**

タデオ ベルナルド D.*・下田 傑*

Mulching Cultivation System Using Polyethylene Film for Early-Season Culture Rice (Part 2) Thermal Image Analysis of Paddy Field by Thermographic System

Masateru NAGATA*, Kenji HIYOSHI*, Yoshiichi OKADA*,
Teruhisa UMEZAKI**, Bernardo D. TADEO* and Takeshi SHIMODA*

(平成8年9月13日 受理)

The temperature variations on the paddy surface with and without polyethylene film mulch were measured by the thermographic system from 7:00 to 21:00, on 12 April 1996.

1) The temperature of the film surface in mulching plot was higher (31.9°C) than the temperature of the water surface in control plot (21.6°C), a difference of 10.3 °C. This result proved that mulching has a positive effect of preserving heat at night.

2) The highest temperature of the film surface was recorded at the place where there was air under the film. The temperature fluctuation, however, was wider than in any other place. Hence, this place could not guarantee that the heat could be preserved at night.

3) The temperature of the film surface was fluctuating in areas where the film was not smoothly laid flat.

4) If the film could be laid smoothly flat on the paddy field, the surface temperature would be evenly high (fluctuation is minimal) and the heat generated could be kept for the night when atmospheric temperature is low.

Key words: Mulching cultivation system, Early-season culture rice, Thermal image analysis, Thermographic system

緒 言

早期水稲の透明ポリエチレンフィルムによるマルチ栽培システムは、収穫期を安定的に早進化させ、早場米の市場価値の拡大を狙うものである¹⁾。

第1報では、地中の特定された地点でのポイント測定を行ったが²⁾、地中内の温度変化は太陽放射エネル

ギーによる地表面からの熱収支が影響すると思われることから、水田表面の温度分布を把握することが重要であると考えられる。特に、移植時期が早く低温下の環境にある水稲の生育には、マルチ栽培システムによる均一的な地温確保が求められる。

これまで、フィルムによる熱収支が地温に及ぼす影響に関する報告³⁾はあるが、地温の測定方法はポイン

* 農業生産機械学講座

** 附属農場学内農場

ト測定であって、温度分布を面として捉えたものではなかった。

そこで、本研究ではサーモグラフィ装置（赤外線放射温度計）を用いて、熱画像によるマルチ水田表面の温度分布を面として捉えて、その温度解析を行ったので報告する。

サーモグラフィ装置

すべての物体はなにがしかのエネルギーを物体表面から放射している。この熱放射エネルギーは温度と波長の関数であり、物体からの熱放射エネルギーを測定すれば、逆に物体の温度を知ることができる。サーモグラフィ装置を含む放射温度計はこの原理に基づいて開発されたものである⁴⁾。

本研究で用いたサーモグラフィ装置（日本電子：JTG-4200S）は、Fig. 1 に示すような構造を持つものである。本装置の赤外線カメラは、対物面走査方式、赤外線検出器：HgCdTe（液体窒素冷却）、観測波長：8～13 μ m（長波長域）、温度測定範囲：-40～160 $^{\circ}$ C、温度分解能：0.1 $^{\circ}$ C、水平画像分解能：420本、視野角：30 $^{\circ}$ （H） \times 28 $^{\circ}$ （V）、焦点距離：20cm \sim ∞ である⁵⁾。赤外線カメラからの検出信号はデジタル信号に変換されてコントローラ部へ送信され、画像処理部で解析される。

赤外線カメラによる温度計測では、計測する被写体の放射率は重要な要素である。放射率は物質、波長、温度等によって異なるが、一般に植物体、水、土などの放射率は0.95～0.99でほぼ1に近い^{4, 6-8)}。しかし、被写体を斜めから観察する場合は、放射が等方的でないことから問題となるが、法線から60 $^{\circ}$ 以内の入射角であれば計測可能といわれている^{4, 6)}。

本報では、これらの条件を満たすような取り扱いをして、水面、フィルム表面、水稻などを含めた水田周囲の各物体を被写体として捉えた。

供試水田

供試水田は宮崎大学農学部附属農場東水田の一区画で、その区形は東西方向が40m、南北方向が21m～36mの台形で、面積は約10アールである。東、南、西の三方は水田に面し、北側のみが高さ10m程度の一部コンクリート被覆の斜面と接している。試験区は西半分をポリエチレンフィルムで被覆したマルチ栽培による

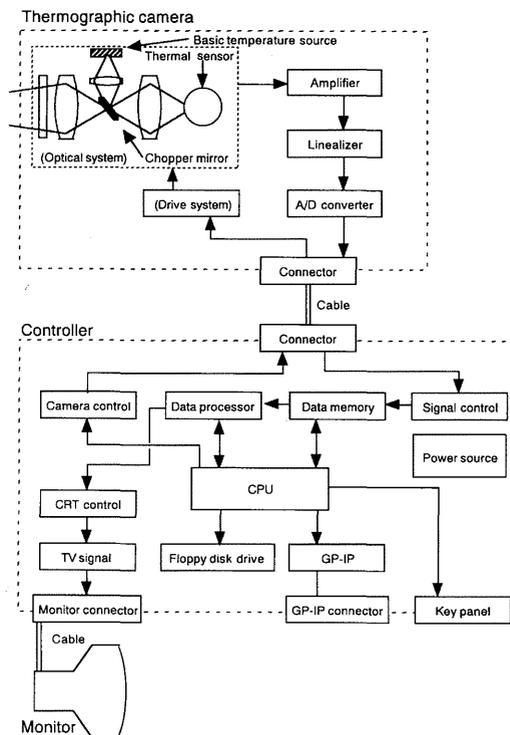


Fig. 1 Structure of the thermographic system (JTG-4200S/4600S).

移植のマルチ区、東半分をマルチ栽培しない慣行移植の対照区として設定した。

供試水田への移植は早期水稻苗として品種コシヒカリを用い、1996年3月18日に行った。フィルム敷設と苗の移植は、フィルムとして幅180cm、厚さ0.02mmの透明ポリエチレンフィルム（みかど化工株）を用いて、試作した4条植え乗用マルチ田植機⁹⁾（ヤンマー農機株RR40）で行った。栽植密度は条間30cm、株間24cmとした。

熱画像解析

1. 温度測定

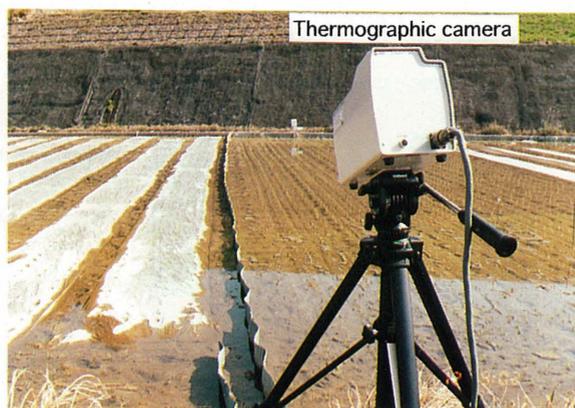
温度測定は、Fig. 2のようにサーモグラフィ装置を現場に持ち込み、移植日から25日経過した1996年4月12日の朝7時から夜21時まで1時間毎に行った。1時間毎の計測画像はコントローラ部内蔵のハードディスクに記録し、終了後に研究室で解析を行った。

測定当日の気象観測データ（宮崎大学農学部附属農場内）は、気温：平均7.8 $^{\circ}$ C、最高12.8 $^{\circ}$ C、最低2.5 $^{\circ}$ C、相対湿度：25.8%、日照時間：9.5時間、全日射量：20.49MJ/m²、平均風速：2.5m/s、降雨量：0mmで、天気は晴れ時々曇り¹⁰⁾であった。

温度測定では、サーモグラフィ装置の赤外線カメラ



Fig. 2 Measuring thermal images using the thermographic system at the test paddy field.



(a) The experimental paddy field and the thermographic camera.

は、Fig. 3 (a) のように水田に向けて設置したので、赤外線カメラで撮影された供試水田の温度測定範囲は、Fig. 3 (b)の枠内の範囲となり、左側がマルチ区、右側が対照区である。両区の境界には地表水の移動を防ぐため、プラスチック製の波板を設けた。図の上面には北側の斜面の陰影が水面に映っているのが見られる。

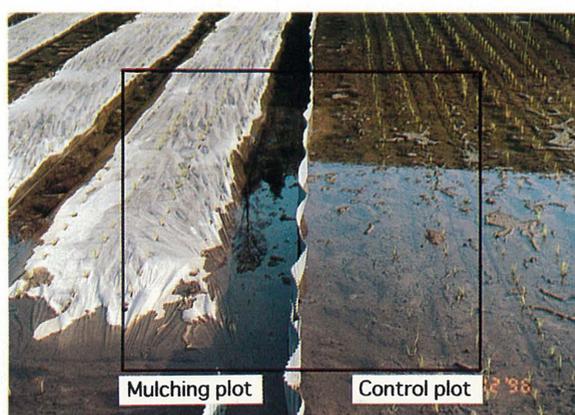
温度測定範囲内の水田表面状態を観察すると、Fig. 3 (c) で示したように、マルチ区には、水稻苗 (A)、水面 (B)、比較的平坦にフィルムが敷設されている地点 (C)、フィルムが水没している地点 (D)、フィルムの下面に空気が入り込んでいる地点 (E)、対照区には、水稻苗 (F)、水面 (G)、地表が露出している地点 (H) などが存在する。これらの地点では表面温度の違いが生じると思われることから、表面温度の解析を行った。

2. 熱画像の解析

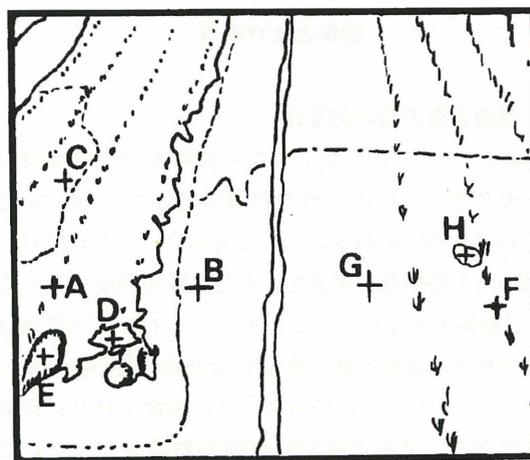
Fig. 4 (午前7時の熱画像) はサーモグラフィ装置のモニタ上に表示された熱画像の一例である。熱画像解析では、モニタに表示した熱画像から、多点機能を用いて前項で述べたA~H地点の温度を読み取り、また、マルチ区と対照区の画像面のカーソル位置における温度波形を熱画像の下端に表示した。本装置での温度測定はカラー表示されたモニタ画像をカラースケールで読み取るが、読み取り精度を高めるためにスケール幅は10℃に設定した。測定時間毎に水田表面温度分布が異なっているので画像を見やすくするために、カラー表示画面に対する温度スケールを変えた。

3. 熱画像による温度解析上の注意

熱画像を解析する際には、次の点に注意した。 Fig.



(b) Plot of thermal image in the experimental paddy field. (Left: Mulching plot, Right: Control plot)



(c) Physical conditions of mulching and control plots.

- A (Plant hill on mulching plot);
- B (Water surrounding the mulching plot);
- C (Film on water surface);
- D (Water on top of film);
- E (Film on the air);
- F (Plant hill on control plot);
- G (Water on control plot);
- H (Exposed soil in control plot).

Fig. 3 Measurement for thermal images analysis of surface paddy field temperature.

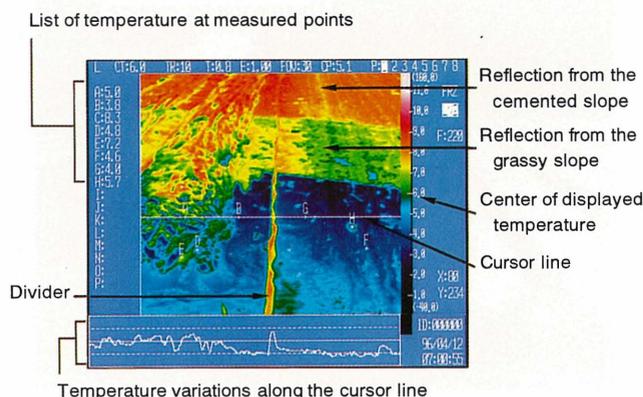


Fig. 4 A display of thermal image.

4を例に見ると、画像の上部は他の地点に比べて、赤色となって温度が高いことを表わしているが、これは真の水田表面温度を表示しているのではなく、北側のコンクリート斜面の温度が水面に映っているためである。したがって、熱画像から温度の解析を行うときは、このような水面に反射している周囲の物体部分は除外しなければならない。そこで、本報では図の下半分を熱画像解析として採用し、画面の白線（カーソルライン）付近で行うこととした。画像の中央に見られる温度が高い縦線は、マルチ区と対照区の境界に設けた波板である。波板はプラスチック製のために、温度上昇が早いことがわかる。

結果および考察

1. 表面温度の経時的变化

Fig. 5-(1~3)は7時から21時まで1時間毎にサーモグラフィ装置で得た熱画像を示す。(a)の7時における水田の温度について見ると、この時間は日の出から1時間程の経過で、まだ太陽の高度も高くなく、日射量も少なかったが、すでにフィルムで被覆されたマルチ区は対照区（水面）よりも温度が高くなっていた。これは、当日の日射による温度上昇だけが要因ではなく、マルチ区では夜間の熱放射が少ないこと²⁾から、前日の残熱がプラスされて、対照区より高い温度を示したものである。

(c)~(f)の9時以降になると、カーソル位置の温度波形で示されるように、マルチ区と対照区における表面温度の格差は大きくなった。日中の水田表面温度は(g)~(h)の13時~14時で最高に達した。この時のフィルム表面の温度は31.9℃(14時)まで上昇した。この時の気温は11.7℃、対照区の水面温度は

21.6℃であったことから、マルチ区では10.3℃の温度上昇ができたことになる。その後は徐々に低下するが、マルチ区の表面温度は(o)の21時になっても依然として高かった。

2. フィルムの敷設状態と表面温度

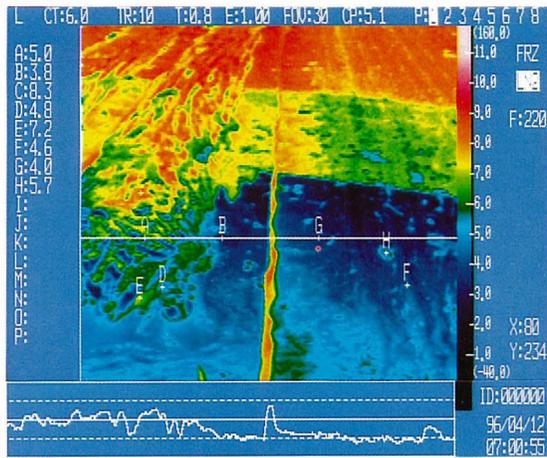
マルチ区での温度分布にはむらが見られたので、Fig. 3(c)に示した水田表面状態が異なる地点(A~H)での温度変異を気温と日射量との関係で見ると、Fig. 6のような傾向を示した。各地点の中で、温度上昇が最も高かったのはフィルム面下に空気が入り込んでいる地点(E)の32.7℃であった。しかし、この地点は午後になってからの温度維持は見られなかった。一方、比較的均一にフィルムが敷設された地点(C)では、表面温度が31.9℃(14時)まで上昇し、温度むらも少なかった。この地点は一日中、他の地点より高い温度を保持し、日没後に夜間気温が低下しても高い温度を維持した。ところが、フィルム面が水没している地点(D)では、温度の上昇は水面温度(B, G)と同程度であった。フィルムにしわが生じてフィルム面が凹凸になっている地点では、表面温度の分布も縞状に表れて、温度むらが発生していることが分かった。苗が植え付けられた地点(A)では、周囲の温度上昇にも関わらず、苗自体の温度上昇は見られなかったことから、適当に葉面蒸発散をしてコントロールしていることが分かった。

以上のように、サーモグラフィ装置による熱画像解析によって、フィルムの敷設状態が水田面の温度分布に強く影響を与えることが分かった。フィルムを均一に敷設すれば、水田面の温度は一律な上昇が期待できることが明らかになった。今後は、水田表面の温度分布をさらに詳細に解析し、マルチ栽培による水田の熱伝達メカニズムを明らかにする必要がある。

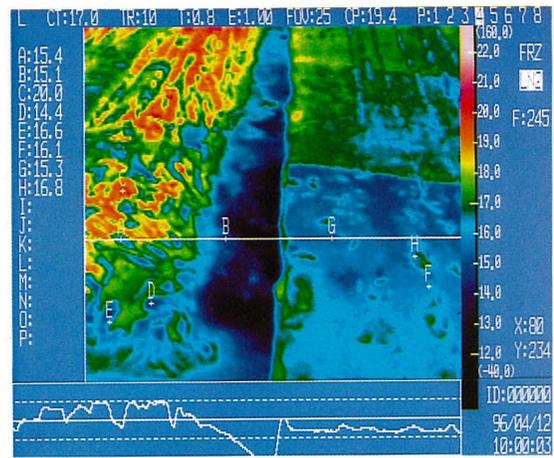
摘 要

サーモグラフィ装置を用いて1996年4月12日にマルチ水田表面の温度分布の熱画像解析を行った。その結果、次のことが明らかになった。

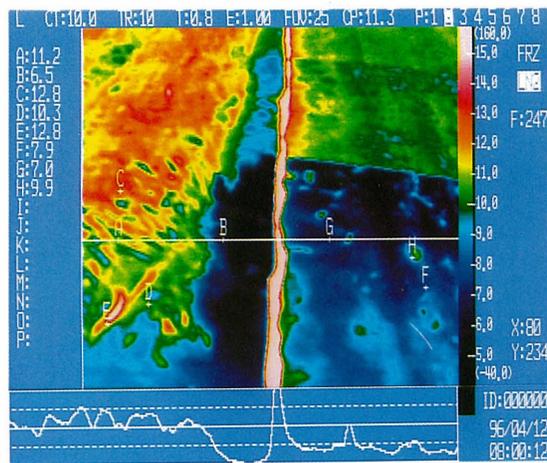
1) 日射を受けた水田では、マルチ区と対照区における表面温度の格差は大きかった。マルチ区では最高31.9℃まで上昇したのに対し、対照区では21.6℃であったことから、マルチ区が10.3℃の温度上昇となった。マルチ区は夜間に気温が低下しても温度の維持ができ



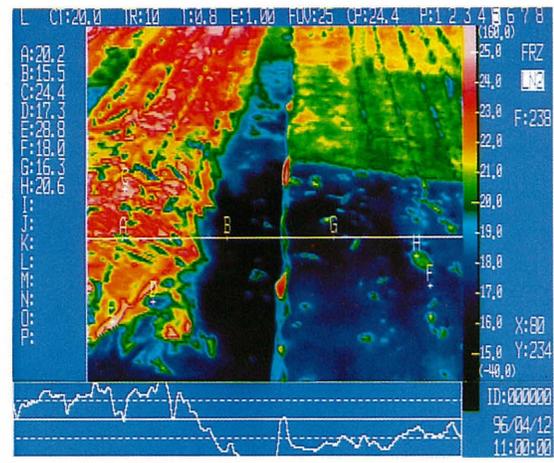
(a) 07:00



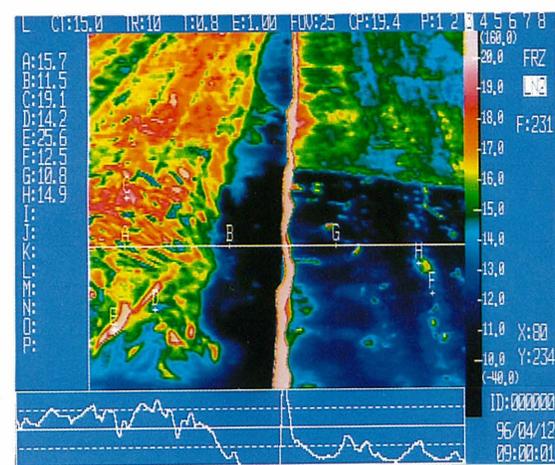
(d) 10:00



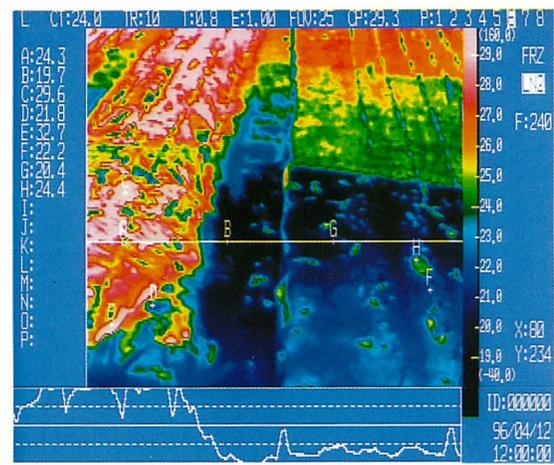
(b) 08:00



(e) 11:00

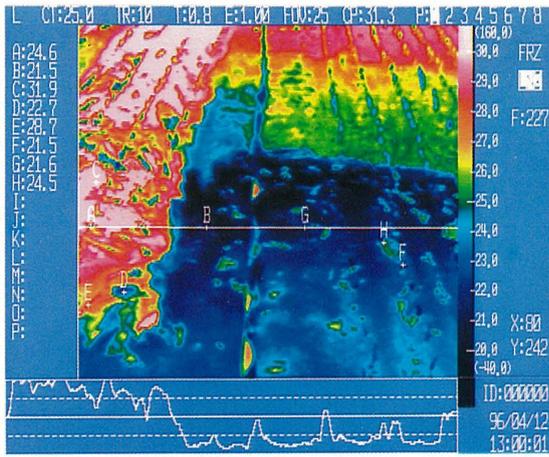


(c) 09:00

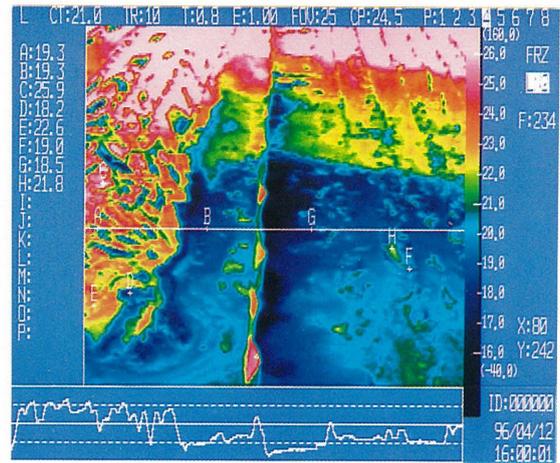


(f) 12:00

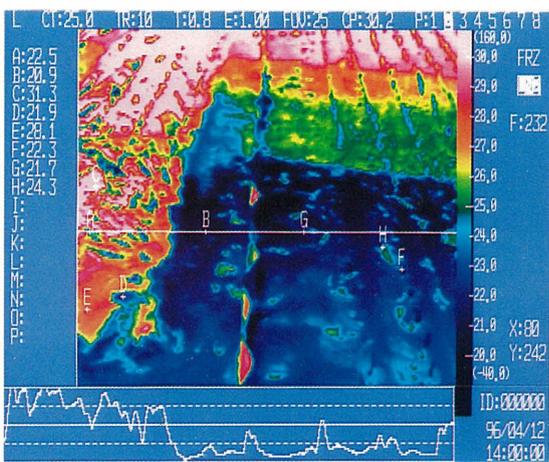
Fig. 5-1 The hourly thermal images, 12 April 1996. (Left: mulching, Right: control plot)



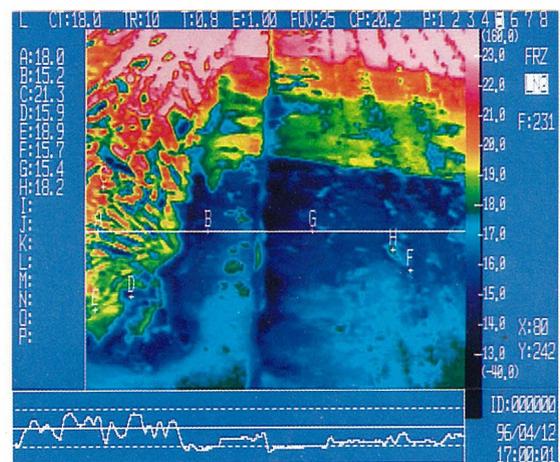
(g) 13:00



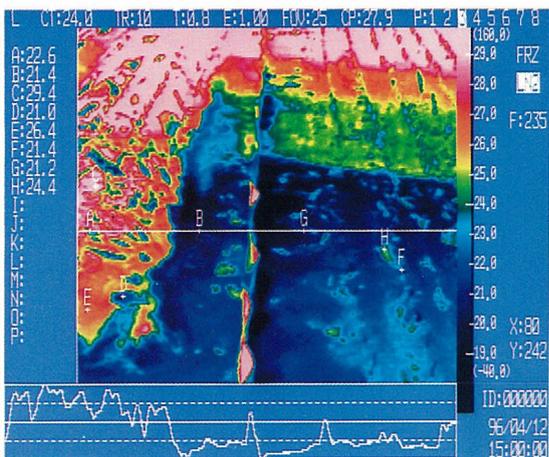
(j) 16:00



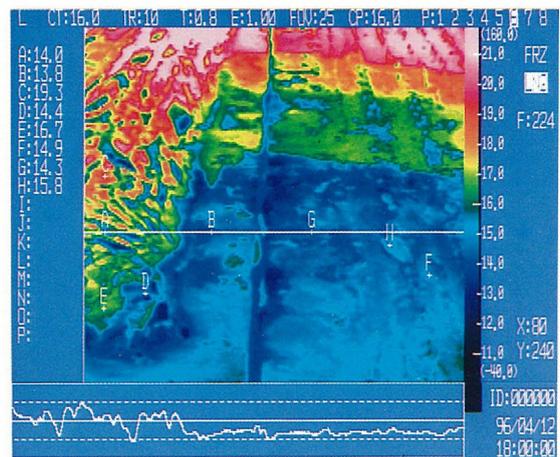
(h) 14:00



(k) 17:00

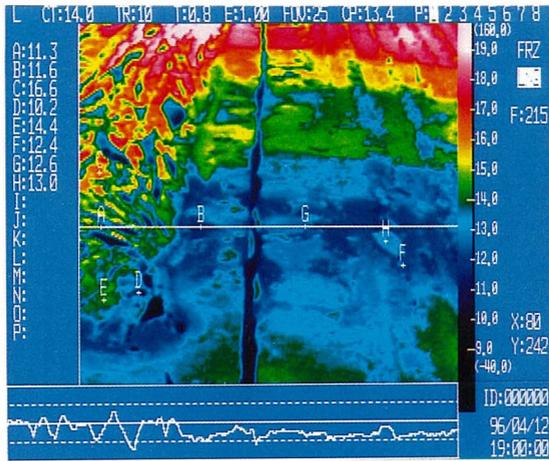


(i) 15:00

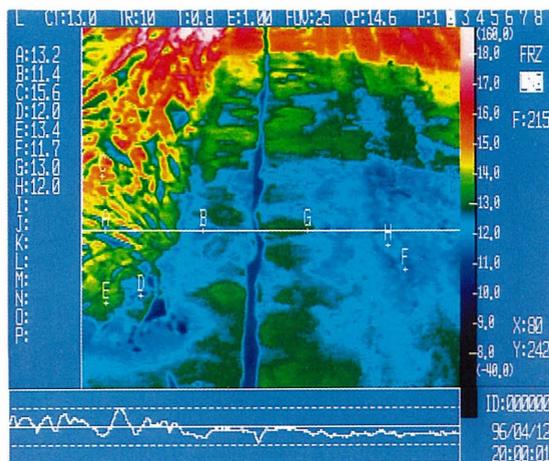


(l) 18:00

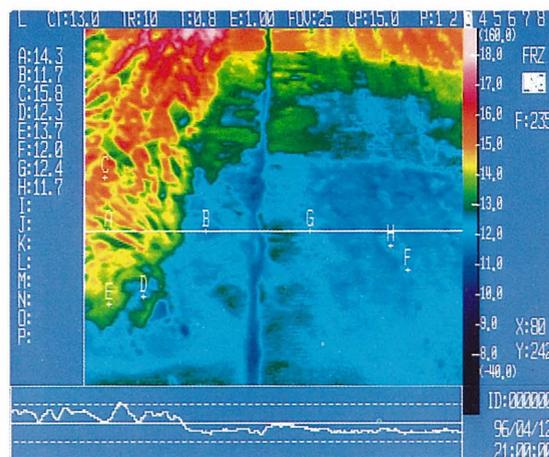
Fig. 5-2 The hourly thermal images, 12 April 1996. (Left: mulching, Right: control plot)



(m) 19:00



(n) 20:00



(o) 21:00

Fig. 5-3 The hourly thermal images, 12 April 1996. (Left: mulching, Right: control plot)

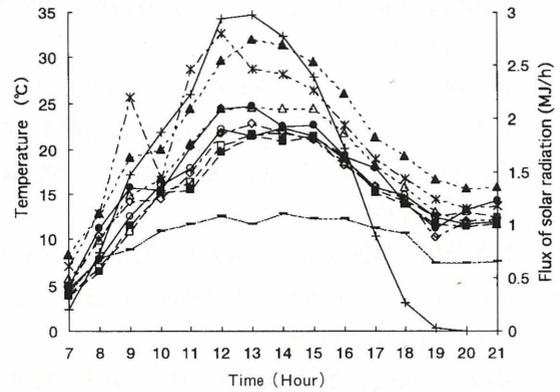


Fig. 6 Hourly transition of surface temperature measured by the thermographic system, 12 April, 1996.

- : A (Plant hill on mulching plot);
- : B (Water surrounding the mulching plot);
- ▲ : C (Film on water surface);
- ◇ : D (Water on top of film);
- * : E (Film on the air);
- : F (Plant hill on control plot);
- : G (Water on control plot);
- △ : H (Exposed soil in control plot);
- : Atmospheric temperature;
- + : Flux of solar radiation.

た。

2) 表面温度が最も上昇した地点は、フィルム面下に空気が入り込んでいる地点であったが、午後になってからの温度維持は見られなかった。

3) フィルム面が凹凸になっている地点では、表面温度にむらが発生していることが分かった。

4) フィルムを均一に敷設すれば、マルチされた水田の表面温度は一様に上昇し、夜間に気温が低下しても温度の維持ができた。

謝 辞

本研究の遂行にあたっては、平成5～7年度文部省科学研究費補助金試験研究(B)(2)の補助を受けた。また、ヤンマー農機株式会社中央技術研究所、みかど化工株式会社および宮崎大学農学部山村善洋講師の御協力を得た。ここに記して感謝申し上げる。

キーワード : マルチ栽培, 早期水稲, サーモグラフィ装置, 熱画像解析

引用文献

- 1) 永田雅輝 : 早期水稲へのマルチ栽培の導入とその機械化に関する研究, 平成5年～7年度科学研究

- 費補助金試験研究 (B) (2) 研究報告書, 宮崎大学農学部, (1996)
- 2) 永田雅輝・日吉健二・梅崎輝尚: 早期水稻のポリエチレンフィルムマルチ栽培システムに関する研究, (第1報) ポット水田の地温測定, 宮大農報41(2)57-64(1994)
- 3) 鈴木晴雄・神近牧男・松田昭美・宮本硬一: 砂丘地におけるフィルムマルチの地温への影響, 農業気象41(3)207-216(1985)
- 4) 計測自動制御学会: 植物生産における計測・制御・情報, 125, 129, 計測自動制御学会, 東京(1989)
- 5) 日本電子株式会社: JTG-4200S/4600Sサーモピュア取扱説明書, (1992)
- 6) 日本電子株式会社: サーモグラフィ装置 “サーモピュア” の原理とその手法, 22, 5(1992)
- 7) M. Fuchs and C. B. Tanner: Infrared thermoetry of Vegetation, Agronomy Journal, 58, 587-601(1966)
- 8) 大政謙次・近藤矩朗・井上頼直: 植物の計測と診断, 朝倉書店, 東京, 173(1990)
- 9) 永田雅輝・日吉健二・木下 統・王 紅永: 早期水稻におけるマルチ栽培システムの開発研究—開発したポリエチレンマルチ田植機による圃場実験—, 第55回農業機械学会年次大会講演要旨, 153-154(1996)
- 10) 宮崎地方気象台: 宮崎県農業気象月報, 平成8年4月, 11(1996)