熱赤外リモートセンシングによる水稻の群落表面温度の 観測並びに葉温と葉色の関係

脇山 恭行

(中央農業総合研究センター耕地環境部)

Infrared Remote Sensing for Canopy Temperature in Paddy Field and Relationship between Leaf Temperature and Leaf Color

Yasuyuki WAKIYAMA

(National Agricultural Research Center, Tsukuba, 305-8666 Japan)

Abstract

Infrared remote sensing is used for crop monitoring, for example evaluation of water stress, detection of infected crops and estimation of transpiration and photosynthetic rates. This study was conducted to show another application of remote sensing information. The relationship between rice leaf temperature and chlorophyll content in the leaf blade was investigated by using thermography during the ripening period. The canopy of a rice community fertilized by top dressing was cooler than that not fertilized in a 1999 field experiment. In an experiment using thermocouples to measure leaf temperature, a rice leaf with high chlorophyll content was also cooler than that with a low chlorophyll content. Transpiration resistance and transpiration rate were measured with a porometer. Transpiration rate was higher with increasing chlorophyll content in the leaf blade. Stomatal aperture is related to chlorophyll content in the leaf blade. High degree of stomatal aperture is caused by high chlorophyll content in the leaf blade. As degree of stomatal aperture increases, transpiration rate increases. Therefore the rice leaf got cooler with increasing chlorophyll content in leaf blade. Paddy rice communities with different chlorophyll contents were provided with fertilization of different nitrogen levels on basal and top dressing in a 2000 field experiment. Canopy temperature of the rice community with high chlorophyll content was 0.85°C cooler than that of the rice community with low chlorophyll content. Results of this study revealed that infrared remote sensing could detect difference in chlorophyll contents in rice communities and could be used in fertilizer management in paddy fields.

Key words: Canopy temperature, Chlorophyll content, Infrared remote sensing, Paddy rice, Transpiration resistance.

キーワード: クロロフィル濃度, 群落表面温度, 蒸散抵抗, 水稻, 熱赤外リモートセンシング

1. はじめに

作物の生理的な光合成に関する研究については、気孔開度と光合成速度、気孔開度と蒸散速度の関係について数種類の作物を対象に調べられ、いくつかの報告がみられる (たとえば Ishihara *et al.*, 1972)。一般に、気孔開

度が大きいと CO₂ の気孔内への取り込みが進み、光合成速度も大きい。同時に蒸散速度も大きいため、蒸散速度と光合成速度との間には密接な関係がみられる (Inoue, 1987)。一方、葉からの蒸散は潜熱による熱の移動を伴うため葉温にも影響を与える。同じ環境下におかれた葉の温度は蒸散速度が小さいと上昇し、蒸散速度が大きいと低下する。このように、蒸散速度の変化によって、葉温に変化が生じる。この現象を熱赤外リモートセンシングによってとらえ、作物モニタリングへの応

2000 年 8 月 24 日, 全国大会にて発表

2001 年 11 月 16 日, 関東支部例会にて発表

2001 年 12 月 10 日 受付, 2002 年 6 月 28 日 受理

用を試みた報告がみられる。たとえば, Jackson *et al.* (1981) は土壌水分の低下により起こる作物の水分ストレスの程度を, 放射温度計で測定した群落表面温度を用いて指標化した。病害の被害予測については, Pinter *et al.* (1979) は放射温度計を用いて, テンサイ, ワタの土壌伝染病を対象に視覚的に病徴をとらえられない罹病個体を検出できることを, Yamamoto *et al.* (1995) も, サーモグラフィを用いて, 水稻群落内のいもち病の発生箇所を早期に検出できることを報告している。Inoue (1987) は, リモートセンシング手法により推定した蒸散速度と飽差を用いることにより, 光合成速度の算出が可能であることを述べている。Homma *et al.* (1999) は, サーモグラフィで測定した群落表面温度を用いて, 高温・高 CO₂ 環境下におかれた水稻の蒸散速度を推定した。また, Miyashita *et al.* (1999) は放射温度計を用いて, 世界各地で栽培されている大麦の葉温を測定し, 原産地による蒸散特性の差異を報告している。

今回, これらの報告のほかに熱赤外リモートセンシング情報の利用場面を検討するために, 水稻を対象に葉色を変化させた場合の群落表面温度および葉温の観測を行った。その結果, いくつかの知見が得られたので報告する。

2. 材料および方法

2.1 ポットでの栽培実験

水稻の登熟期における葉色の変化を調べるために, ポット実験を行った。品種にはキヌヒカリを用い, 1998年4月25日に播種し, 箱育苗により育苗した。葉齢が3.5に達した苗を5月25日に, 2,000分の1ワグネルポットに, 1株1本とし2株移植した。基肥には, 化成肥料(窒素, リン酸, カリの含有率はいずれも14%)を用い, ポット当たり6.4g施用した。反復は4ポットとし, 追肥は行わなかった。出穂期は8月21日であった。

葉色の測定は葉緑素計(ミノルタ, SPAD 502)を用いて, 毎回同じ茎の展開した上位3葉を対象に, 出穂1週前から登熟後期まで, 1週毎に3葉の平均SPAD値を求めた。収穫は9月30日に1穂ごとに行い, 穂についた籾をすべて取り籾数と籾の重さを計測し, それぞれ1穂籾数, 1穂籾重とした。

2.2 圃場での栽培実験

サーモグラフィによる群落表面温度および熱電対による葉温を測定するため, 中央農業総合研究センター谷和原水田圃場(茨城県谷和原村)において栽培実験を行った。実験は, 予備的である1999年と2000年の2カ年行った。いずれの年度も, 処理区間の稲体中のクロロフィル濃度に差がでるように施肥量を変え栽培した。1999年は, 供試品種にコシヒカリを用い, 4月26日に播種し, 箱育苗により育苗した。移植には葉齢がおおよそ3.5に達した苗を用い, 5月20日に1株3本とし, 手植えにより行った。栽植密度は株間15cm, 畝間30cm, 各処理区の面積は50m²であった。基肥には化成肥料(窒素, リン酸, カリの含有率はいずれも14%)を用い, 施用量を3段階とし, さらにそれぞれの処理区に追肥区と無追肥区を設けた。追肥にも基肥と同じく化成肥料(窒素, カリの含有率はいずれも17%)を用いた。2000年も1999年と同じ方法で育苗, 移植を行った。ただし, 供試品種には日本晴を用い, 施肥量を1999年に比べて大幅に増やし, 処理区間の生育量, クロロフィル濃度差が明瞭に現れるように栽培した。Table 1に各処理区の施肥量(成分量), Table 2には耕種日程を示した。

2000年圃場実験での生育調査は, 生育初期より登熟期まで, 2週ごとに行った。調査は各処理区より平均的な株を5株掘り上げ, 葉面積, 生体重, 乾物重の項目について調査した。葉面積は, 各区から1株を選び葉面積計(林電工, 面積計AAM-9型)を用い測定した。同時に葉の生体重を計り, 生体重当たりの葉面積を計算し

Table 1. Fertilizer application for field experiment.

Year	Experimental treatment	Basal dressing (kg 10a ⁻¹)			Top dressing (kg 10a ⁻¹)	
		Nitrogen	Phosphorus	Potassium	Nitrogen	Potassium
1999	N4.5-1	4.5	4.5	4.5	2.3	2.3
	N4.5-0	4.5	4.5	4.5	0.0	0.0
	N3-1	3.0	3.0	3.0	1.5	1.5
	N3-0	3.0	3.0	3.0	0.0	0.0
	N1.5-1	1.5	1.5	1.5	0.8	0.8
	N1.5-0	1.5	1.5	1.5	0.0	0.0
2000, 2001	N13	13.0	13.0	13.0	5.6	5.6
	N9	9.0	9.0	9.0	3.9	3.9
	N4	4.0	4.0	4.0	1.7	1.7
	N0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

た。ほかの株は生体重のみ計り、この葉面積と生体重の関係から、葉面積を推定した。各処理区の乾物重、葉面積は5株の値を平均し求めた。クロロフィル濃度の推定には、葉緑素計を用い、各処理区の10株を対象に各株より1本の主稈を選び、展開した上位3葉のSPAD値を測定した。次に、測定した各葉のSPAD値を平均し、後述するSPAD値から葉身中のクロロフィル濃度を推定する検量線を用いて、上位3葉のクロロフィル濃度を推定した。収量調査は、坪刈りによる収量と各処理区より掘り上げた10株について穂数、1穂粒数等の収量構成要素を調査した。

サーモグラフィー（日本アビオニクス、TVS-2000 LW）による群落表面温度の測定は、出穂直後から登熟後期にかけて、1週おきに晴天日の午前中に行った。測定方法は、運搬車に検出器を載せ、実験水田に沿った道路上を移動しながら各処理区を測定した。検出器は、水田面からの高さがおよそ2m、伏角は15°で、群落表面を俯瞰できるように調節した。サーモグラフィーの視野角は垂直方向10°、水平方向15°、射出率は1.00（Inoue, 1986）であった。群落表面温度は、測定した画像から群落表面部分の温度を平均し求めた。

葉温の測定には、直径0.1mmの銅-コンスタンタン熱電対を用いた。熱電対の装着方法は、直達日射が熱電対の感部にあたらないように、向軸面が南を向いている止葉を選び、その背軸面に葉脈をさけて熱電対の感部をあて医療用テープ（不織布）で固定した。葉温測定には、1999年は各処理区から2～5枚の止葉を、2000年は6～10枚の止葉を選んだ。葉温の測定は、1999年は8月21日から9月7日まで、2000年は、8月14日から9月20日まで行った。熱電対を装着した止葉については、1週毎に葉緑素計で葉色を測った。収穫時には、葉温を測った止葉と同じ茎の穂を切り取り、1穂粒数、1穂粒重を求めた。

サーモグラフィーによる画像データおよび熱電対による葉温データの解析の際、必要となる気象データを得るために、気象観測を行った。1999年は、8月21日から

9月7日まで、水田上に乾球・湿球温度計（高度1.5m）を設置し、気温と湿度を観測した。観測値は、データロガーに10分間平均値で記録した。全日射量、風向・風速データは、谷和原水田圃場内で観測している気象データを用いた。なお、風向・風速の観測高度は6mであった。2000年は、8月14日から9月20日まで、水田上に乾球・湿球温度計（高度1.5m）、全日射計、風向・風速計（高度2m）を設置し観測を行った。

また、ポロメータ（Li-cor, LI-1600）を用い、蒸散抵抗、蒸散速度の測定を行った。測定は2001年に、出穂2週前より登熟後期にかけ1週おきに、晴天日と曇天日の10:00～13:00に行った。同時に蒸散抵抗、蒸散速度を測定した葉の葉色も葉緑素計で測定した。2001年も供試品種、施肥量など2000年と全く同じ方法で栽培した。施肥量および耕種日程をそれぞれTable 1, Table 2に示した。

葉身中のクロロフィル濃度の測定については、まず各処理区より展開した上位4葉の葉をサンプリングし、葉緑素計で葉色を測定した。次に、測定した葉を切り刻み、80%アセトン20ml中に浸し、冷暗所に48時間安置し、クロロフィルを抽出した。その後、645nm、663nmの波長帯の吸光度を測定し、Arnon法（Arnon, 1949）により抽出液中のクロロフィル濃度を定量した。この作業は、2000年圃場実験時に生育初期から登熟期まで2週ごとにを行い、定量された葉身中のクロロフィル濃度とSPAD値との関係をプロットし、SPAD値から葉身中のクロロフィル濃度を推定するための検量線を得た。

3. 結果および考察

3.1 サーモグラフィーによる追肥区と無追肥区の群落表面温度の測定

1999年圃場実験において、出穂期にサーモグラフィーを用いて測定した群落表面温度をTable 3に示した。測定は、8月9日10:30～10:55に行った。基肥量が同じで追肥を行ったN4.5-1区と追肥を行わなかったN4.5-0区を比べると、N4.5-0区は31.73℃であっ

Table 2. Cultivation practice for field experiment.

Year	Cultivar	Seeding	Transplanting	Fertilization of topdressing	Heading	Harvest
1999	Koshihikari	26 Apr. (116)	20 May (140)	17 Jul. (198)	8 Aug. (220)	20 Sep. (263)
2000	Nihondare	27 Apr. (117)	25 May (145)	20 Jul. (201)	12 Aug. (224)	25 Sep. (268)
2001	Nihondare	25 Apr. (115)	23 May (143)	16 Jul. (197)	18 Aug. (230)	4 Oct. (277)

Figures in parentheses are day of year.

Table 3. Canopy temperature of paddy rice community.

Experimental treatment	Canopy temperature (°C)
N4.5-1	30.91±0.34
N4.5-0	31.73±0.34
N3-1	30.72±0.34
N3-0	31.33±0.43
N1.5-1	30.45±0.39
N1.5-0	30.79±0.34

Measurement was conducted from 10:30 to 10:55 on 9 August in 1999. Meteorological conditions are as follows. Air temperature was 32.5°C. Relative humidity was 55%. Solar radiation was 820 Wm⁻². Wind speed was 3.6 ms⁻¹ (height 6m). Figures are the mean±standard deviation.

たのに対し、N4.5-1 は 30.91°C と、0.82°C N4.5-1 区の表面温度が低かった。N3-1 区と N3-0 区を比べると 0.61°C N3-1 区が低く、N1.5-1 区と N1.5-0 区でも N1.5-1 区が 0.34°C N1.5-0 区に比べ低かった。このようにいずれの処理区でも追肥区は無追肥区に比べて群落表面温度が低かった。肉眼による観察では、追肥区と無追肥区の葉色を比べると、明らかに追肥区で葉色が濃かった。

3.2 葉温と気温の差と SPAD 値、1 穂粒重の関係

次に、1999 年圃場実験の各処理区の止葉に熱電対を装着し葉温を測定した結果を Fig. 1 に示した。葉温データは 8 月 21 日 12:37~12:47、葉緑素計で測った SPAD 値は 8 月 23 日に測定されたものである。葉温と気温の差（以下、葉気温差）と SPAD 値の関係は、SPAD 値が低い、すなわちクロロフィル濃度が低いほど葉気温差はプラスでその差は大きい、SPAD 値が高いほど葉気温差はマイナスで葉温は気温に比べ低かった。相関をみると -0.77 と高い相関係数であった。熱電対による葉温の測定においても、サーモグラフィーを用いた測定と同様に、SPAD 値が高いほど葉温は低いことが確かめられた。また、追肥区と無追肥区から採取した穂について、1 穂粒重と Fig. 1 と同じく 8 月 21 日 12:37~12:47 に測定した葉気温差との関係をみたところ、相関は低い、葉気温差がマイナスで葉温が気温に比べて低いほど、1 穂粒重が大きい傾向がみられた (Fig. 2)。追肥区だけから採取した穂についてみると、1 穂粒重と葉気温差の関係が明瞭に表れた (Fig. 2)。Fig. 3 には、1998 年ポット実験での出穂直前の 8 月 18 日に測定した上位 3 葉の平均 SPAD 値と 1 穂粒数の関係 (Fig. 3A)、SPAD 値と 1 穂粒重との関係 (Fig. 3B)

Fig. 1. Relationship between Leaf temperature and air temperature difference ($Tl-Ta$) and SPAD value from 12:37 to 12:47 on 21 August in 1999. Meteorological conditions are as follows. Air temperature was 31.0°C. Relative humidity was 51%. Solar radiation was 864 Wm⁻². Wind speed was 2.5 ms⁻¹ (height 2m).

Fig. 2. Relationship between Leaf temperature and air temperature difference ($Tl-Ta$) and rough rice weight per head. Symbols are the same as in Fig. 1.

を示した。1 穂粒数は SPAD 値が高いほど粒数が多く、1 穂粒重は SPAD 値が高いほど粒重が大きかった。Kumura (1956) は、出穂 7 日から 28 日前における葉身中の平均窒素濃度が高いほど、1 穂穎花数が多かったことを報告している。Wada and Matsushima (1962) も同一品種、同一移植期の試験区内では、出穂期の葉身中の窒素濃度と 1 株当たりの粒数との間に高い相関がみられたことを述べている。ポット実験での結果は、これらの報告と一致した。このことから、圃場実験において葉気温差がマイナスで、葉温が気温より低い穂で 1 穂粒重が大きかったのは、葉身中の窒素濃度が高かったために穎花分化数が増加し、1 穂粒数が多くなり 1 穂粒重が大きかったものと考えられた。

Fig. 3. Relationship between SPAD value and the number of grains per head (A), and relationship between SPAD value and rough rice weight per head (B).

3.3 蒸散抵抗, 蒸散速度と SPAD 値の関係

サーモグラフィーによる追肥区, 無追肥区間の群落表面温度差, SPAD 値の異なる止葉間の葉気温差の違いは, 葉面上の気孔密度, 気孔開度の差異によって蒸散速度に差が生じ, 葉温に影響を及ぼしたためと考えられた。そこで, ポロメータを用いて出穂 2 週前の上位展開第 1 葉の蒸散抵抗, 蒸散速度を測定し, その結果を Fig. 4 に示した。測定データは, 2001 年 8 月 3 日 11:20~12:20 に得られたものである。SPAD 値と蒸散抵抗の関係は SPAD 値が高いほど, 蒸散抵抗は小さかった (Fig. 4 A)。SPAD 値と蒸散速度の関係は, SPAD 値が高いほど蒸散速度が大きく, 両者の間には高い相関がみられた (Fig. 4 B)。この結果より, SPAD 値の高い葉ほど葉温が低かったのは, 蒸散が盛んであったため, 潜熱が奪われ葉温が低かったものと考えられた。

Ishihara *et al.* (1978) は, 葉身中の窒素濃度と気孔開度の関係について調べ, 葉身中の窒素濃度が高いほど気孔開度大きいことを報告している。Tsuno *et al.* (1991) も, 葉色板 (富士葉色カラスケール) を用いて葉色示度と気孔開度との関係を調べ, 同様に葉色示度の高い葉 (クロロフィル濃度の高い葉) で気孔開度の大きいことを述べている。今回, 葉身中のクロロフィル濃度と葉面の気孔密度, 気孔開度の関係について調べていないが, 気孔開度に対して, 葉身中のクロロフィル濃度が影響を及ぼしたことも原因の 1 つではないかと考えた。そ

Fig. 4. Relationship between SPAD value and transpiration resistance (A), and relationship between SPAD value and transpiration (B) from 11:20 to 12:20 on 3 August in 2001. Meteorological conditions are as follows. Air temperature was 26.8°C. Solar radiation was 437 Wm⁻². Relative humidity was 94%. Wind speed was 0.7 ms⁻¹ (height 2 m).

の影響により, 蒸散速度に差が表れたものと推察した。

3.4 窒素施用量の異なる水稻の生育と葉身中のクロロフィル濃度の推移

葉身中のクロロフィル濃度に差をつけるために, 施肥量を大幅に変化させ栽培した 2000 年圃場実験での生育の推移を Fig. 5 に示した。地上部乾物重の推移をみると (Fig. 5 A), N13 区が他の処理区と比較して最も大きく推移した。N13 区の乾物増加速度は, 追肥後 (201 日: 1 月 1 日を起点とした日数) から出穂期 (224 日) にかけて増加速度が大きく, 出穂後増加速度は緩やかになった。ほかの処理区も同様の傾向を示した。葉面積指数 (Fig. 5 B) も N13 区が生育期間中最も大きく推移し, 出穂期に最大で 6.1 に達した。N9 区の最大値は 4.9, N4 区は 3.0, N0 区は 2.4 であった。

Fig. 6 には, 葉身中のクロロフィル濃度の変化を示した。上位展開第 1 葉 (Fig. 6 A) では, すべての処理区で生育初期のクロロフィル濃度が最も高く, 生育が進むにつれて低下した。穎花分化期の追肥により, 濃度が高まったが, 再び濃度は低下する傾向がみられた。第 2 葉 (Fig. 6 B), 第 3 葉 (Fig. 6 C) についても, ほぼ同様の变化を示した。Inada (1994) は, 埼玉県下において水稻の上位展開第 2 葉の葉色変化を葉緑素計 (KI-1) で調

Fig. 5. Changes in top dry weight (A) and LAI (B) for field experiment in 2000.

べた。葉色値は、移植して活着後から高くなり（クロロフィル濃度は高くなる）生育期間中最も高い値を示した後低下すること、しかし穎花分化期の追肥によって葉色値は再び高まり出穂期にピークを示し、出穂1カ月後を境に急激に低下することを報告している。Miyama *et al.* (1984) は、千葉県下において移植後1カ月から出穂期まで、水稻群落の葉色の変化を葉色板で調べた。生育初期葉色示度は高い（クロロフィル濃度は高い）が、生育が進むにつれ低下すること、幼穂形成期の追肥により葉色示度は高まり出穂前にピークに達したのち、低下することを報告している。今回の実験でも、これらの報告とほぼ同様のクロロフィル濃度の変化がみられた。

クロロフィル濃度は当然のことながら施肥量に左右される。上位展開第1葉の各処理区におけるクロロフィル濃度の推移をみると (Fig. 6A), N13区が生育期間中、他の処理区に比べて、最も高く推移する傾向がみられ、次にN9区, N4区, N0区とN0区で最もクロロフィル濃度が低い傾向にあった。第2葉 (Fig. 6B), 第3葉 (Fig. 6C) についても同様の傾向がみられた。

続いて、N13区の上位3葉間のクロロフィル濃度を比較すると、出穂直後までは、上位展開第1葉 (Fig. 6A) が第2葉 (Fig. 6B), 第3葉 (Fig. 6C) に比べて濃度が低かった。これは、展開直後の葉はクロロフィル濃度が低く、活動中心葉になる時期に最も濃度が高くなるためであると考えられた。出穂後、展開する葉はないために、出穂期から2週以降 (240日) は、最も早く展

Fig. 6. Changes in chlorophyll content in the first upper leaf (A), the second upper leaf (B) and the third upper leaf (C) for field experiment in 2000.

開した上位第3葉で老化が進みクロロフィル濃度が低下し、逆に展開の最も遅かった止葉は登熟後期まで第2葉, 第3葉に比べてクロロフィル濃度は高く保たれた。他の処理区でも同じ傾向がみられ、この結果はFuruya (1987) の報告と同様のものであった。

2000年圃場実験では、処理区間のクロロフィル濃度差が生じるように施肥量を大幅に増加させたが、その効果は十分に現れた。

3.5 SPAD値の異なる葉の葉気温差の日変化

SPAD値の異なる葉の葉気温差の日変化をみるために、2000年圃場実験で8月28日に得られたデータを用い解析した。Fig. 7に、測定日の気象条件の推移を示した。測定日の天候は晴天であったが、日射強度 (Fig. 7A) は雲の影響により変動が大きく、日量は17.3 MJm⁻²であった。気温 (Fig. 7B) は、午前中から徐々に上昇し、13:40に最高気温32.4℃を示した。飽差

Fig. 7. Diurnal variations in meteorological conditions, solar radiation (A), air temperature (B), vapor pressure deficit (C), and wind speed (D) on 28 August in 2000.

(Fig. 7C) も午前中から大きくなり、13:40に最大値に達し、5.6 hPaを示した。風速 (Fig. 7D) は9時までは 1 ms^{-1} 以下であったが、以後徐々に大きくなり14:10には最大 3.2 m s^{-1} に達した。風速は、午前中に比べ午後の方が大きく推移した。

Fig. 8 には、SPAD 値の異なる止葉の葉気温差の日変化を示した。SPAD 値は前日の8月27日に測定されたものである。SPAD 値26.1の止葉の葉気温差は、日中の7時から14時までは、ほぼプラスで葉温が気温に

Fig. 8. Diurnal Variations in Leaf temperature and air temperature difference ($T_l - T_a$) for different SPAD value leaf on 28 August in 2000.

比べて高く推移する傾向にあった。10時に葉気温差は最も大きくなり、その差は 1.7°C であった。しかし、14時以降葉温は気温に比べて低くなった。SPAD 値31.9の止葉をみると、午前中葉気温差はプラスで推移し、SPAD 値26.1の止葉に比べてその差は小さい傾向がみられた。午後、葉気温差はマイナス、すなわち葉温は気温に比べて低くなり、夕刻に近づくにつれ葉温は気温に比べて徐々に低くなった。SPAD 値36.1の止葉は、日中葉気温差はほとんどマイナスで推移し、13:10に葉温は気温に比べて最も低くなり、葉気温差は -2.3°C であった。以上3葉の日中の葉温を比べると、ほぼ SPAD 値 $26.1 > 31.9 > 36.1$ の順に高かった。

一般に気孔抵抗に影響を及ぼす要因として、日射、湿度、二酸化炭素濃度、作物体内の水分状態があげられる。しかし、水稻の場合、通常の圃場環境下では主に日射、湿度による影響が大きい (Ishihara *et al.*, 1971; Inoue *et al.*, 1984)。また、葉面からの蒸散については、気孔抵抗、葉面境界層の抵抗、日射、湿度、葉温、気温、風速が関与する。葉温は葉へ入射するエネルギーが、上記の蒸散すなわち潜熱、顕熱、葉からの赤外放射に分配されることにより成立する。葉温の成立に対しては、上記の要因が関わっているが、今回はこれら複数の要因が複雑に絡んでいるため、特に個々の要因と葉温の関係について解析は行わなかった。ただし、SPAD 値と蒸散抵抗、蒸散速度の関係を3.3で述べたように、気孔開度に影響を及ぼす葉身中のクロロフィル濃度が、大きい要因の1つと考えられた。

Table 4 には2000年8月28日における各時刻の葉気温差と SPAD 値の単相関係数を示した。午前中は $-0.45 \sim -0.52$ と中位の相関係数であったが、午後両者の相関は高まり、13時では -0.49 、14時では -0.62 、15時では -0.80 、と15時に最も高い相関を示した。しか

Table 4. Coefficients of correlation between leaf temperature and air temperature difference ($T_l - T_a$) and SPAD value at different times on 28 August in 2000.

Time	Coefficient of correlation
9:00~9:10	-0.52
10:00~10:10	-0.45
11:00~11:10	-0.48
12:00~12:10	-0.47
13:00~13:10	-0.49
14:00~14:10	-0.62
15:00~15:10	-0.80
16:00~16:10	-0.73
17:00~17:10	-0.64

し夕刻に近づくにつれ再び相関係数は低下し、16時では-0.73、17時では、-0.64であった。SPAD値による葉温の変動範囲を推定するために、それぞれの時刻における葉温の最大値と最小値の差をSPAD値と葉气温差の回帰式により求めたところ、9:00では0.83℃、12:00では1.36℃、15:00では1.80℃に達した。このようにSPAD値により0.83~1.80℃の最高葉温と最低葉温の差がみられた。Fig. 9には8時40分から17時40分までの葉气温差の平均値とSPAD値の関係を示した。両者の相関係数は、-0.72と日中の決まった時刻だけでなく、日中の平均葉气温差においてもSPAD値と高い相関を示すことが確かめられた。

3.6 群落表面温度と気温の差とクロロフィル濃度の関係

Table 5には、サーモグラフィーを用いて、2000年8月29日11:43~11:49に測定した各処理区の群落表面温度と気温の差を示した。展開した上位3葉の葉身中クロロフィル濃度は、3.4で述べたように、施肥量の多いN13区で最も高く、次にN9区、N4区、N0区とN0区は最も低かった。群落表面温度と気温の差は、N13区で0.01℃、N9区で0.37℃、N4区で0.50℃、N0区で0.86℃とクロロフィル濃度の高い処理区ほど、群落表面温度と気温の差は小さく、逆にクロロフィル濃度の低い処理区で両者の差は大きかった。N0区とN13区の群落表面温度の差は0.85℃であった。この結果より、熱赤外リモートセンシングは、クロロフィル濃度の異なる群落間の群落表面温度差を検出できるものと考えられた。さらに、圃場内における相対的なクロロフィル濃度差の検出の可能性が示唆されることから、熱赤外リモートセンシング情報は、圃場での窒素肥料の施用むらの検出など、肥培管理に利用できるのではないかと考えられた。

ただし、今回の実験では施肥量を大幅に増加させ、各

Fig. 9. Relationship between SPAD value and diurnal mean difference between Leaf temperature and air temperature ($T_l - T_a$) on 28 August in 2000.

Table 5. Difference between Canopy temperature of paddy rice community and air temperature.

Experimental treatment	Canopy temp. - Air temp. (°C)
N13	0.01 ± 0.46
N9	0.37 ± 0.39
N4	0.50 ± 0.41
N0	0.86 ± 0.59

Measurement was conducted from 11:43 to 11:49 on 29 August in 2000. Meteorological conditions are as follows. Air temperature was 30.3℃. Relative humidity was 61%. Solar radiation was 651 Wm⁻². Wind speed was 1.1 ms⁻¹ (height 2 m). Figures are the mean ± standard deviation.

処理区間での群落表面温度差およびSPAD値の異なる止葉間の葉温差を検出したこと、また群落内でのクロロフィル濃度の分布と群落表面温度との関係については検討しなかった。これらの点については、窒素施用量を実際に行われている農家の施用量と同量に設定した圃場内で、クロロフィル濃度の分布と群落表面温度との関係を調べる必要がある。このほかに、Table 4に示したように、SPAD値と葉气温差の相関係数が測定時刻によって異なることから、圃場内において相対的なクロロフィル濃度分布を検出するために、最も適した気象条件を知る必要がある。今回、葉身中のクロロフィル濃度が気孔開度に影響を及ぼしていると考えられたので、この関係を含めて水稻群落表面温度および葉温の成立について検討する必要があると考えられた。

3.7 群落表面温度と気温の差と1穂粒数、収量との関係

ところで、1998年ポット実験では上位3葉の平均SPAD値の高い穂で、1999年圃場実験では止葉の葉温

の低い穂で1穂粒数および1穂粒重が大きかった。このことから、群落表面温度および葉温情報が収量構成要素および収量の推定に利用できるのではないかと考えた。2000年圃場実験の各処理区の収量をみると、N13区が 803 gm^{-2} 、N9区は 716 gm^{-2} 、N4区は 551 gm^{-2} 、N0区は 458 gm^{-2} と $\text{N13} > \text{N9} > \text{N4} > \text{N0}$ の順に高かった。各処理区の収量構成要素をみると、1穂粒数はN13区が72粒、N9区が74粒、N4区が80粒、N0区が72粒と、1穂粒数に及ぼす窒素施用量の影響はみられなかった。1平方メートル当たりの穂数は、N13区が462本、N9区が370本、N4区が299本、N0区が250本と $\text{N13} > \text{N9} > \text{N4} > \text{N0}$ の順に多く、収量が窒素施用量の多い処理区で大きかったのは、穂数が多かったためであった。1998年ポット実験および1999年圃場実験で得られた、葉身中のクロロフィル濃度の高い穂で粒数が多い、という同様の結果は得られなかった。この原因は、追肥を行わなかった1998年ポット実験でSPAD値と1穂粒数の相関が高かったこと、1999年圃場実験の無追肥区においてもSPAD値と1穂粒重の相関が高かったことから、追肥の時期が適切ではなかったためと考えられた。一般に、幼穂分化期から穎花分化期中期（およそ出穂19～32日前）にかけての追肥は、1穂粒数の増加につながるということが知られている。1999年圃場実験では出穂22日前、2000年圃場実験では出穂23日前に追肥を行った。1穂粒数の増加につながる時期の施肥であったが、やや遅かったため追肥の効果が十分に現れなかったのではないかと考えられた。

4. ま と め

水稻群落の葉色と群落表面温度および葉温との関係を調べるために、1998年はポット実験、1999年、2000年は圃場において窒素施用量を変え栽培し、サーモグラフィーを用いた群落表面温度、熱電対を用いた葉温の測定を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 1999年圃場実験で、サーモグラフィーを用い登熟期の群落表面温度を測定したところ、追肥区は無追肥区に比べ群落表面温度が低かった。

(2) 続いて熱電対を用いて、測定した葉気温差と葉緑素計によるSPAD値の関係を調べた。その結果、両者の間に高い負の相関がみられ、SPAD値の高い葉で葉温が低く、SPAD値の低い葉で葉温が高かった。また、1998年ポット実験では1穂粒数と出穂直前の上位3葉の平均SPAD値との間に高い正の相関がみられ、1穂粒重もSPAD値の高い穂で大きかった。1999年圃場実験でも、葉温の低いすなわちSPAD値の高い止葉の1穂粒重は大きかった。

(3) 2001年のポロメータによる蒸散抵抗、蒸散速度の測定では、SPAD値の高い葉ほど蒸散抵抗が小さく、蒸散速度は大きかった。蒸散抵抗とSPAD値および蒸散速度とSPAD値の関係は、いずれも高い相関を示した。このことから、SPAD値の高い葉は、蒸散速度が大きかったために、潜熱が奪われ、葉温が低かったものと考えられた。

(4) 2000年圃場実験は、処理区間の葉身中のクロロフィル濃度に差をつけるために、窒素施用量を大幅に増加させ行った。サーモグラフィーを用いた群落表面温度および熱電対による葉温測定を行ったところ、1999年圃場実験と同様に葉身中のクロロフィル濃度の高い処理区ほど群落表面温度は低く、SPAD値の高い止葉で葉温の低い結果が得られた。1998年ポット実験および1999年圃場実験で、1穂粒数の推定に熱赤外リモートセンシング情報が利用できるのではないかと考えられたが、2000年圃場実験では、クロロフィル濃度の高い処理区で1穂粒数が多いという結果は得られなかった。

(5) 以上のことから、熱赤外リモートセンシング情報を用いて水稻群落間の相対的なクロロフィル濃度差の検出が可能であることが確認できた。熱赤外リモートセンシング情報は、圃場における肥料むらの検出など肥培管理に利用できるのではないかと考えられた。

謝 辞

本研究での生育調査、収量調査等では、中央農業総合研究センター業務第1科富坂美明氏をはじめ業務科職員の方々には、ご協力を得ました。また、研究の遂行では当センター井上君夫気象立地研究室室長並びに中園江研究員にはご配慮を頂きました。ここに記して各氏に謝意を表します。

References

- Arnon, D. I., 1949: Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiol.*, **24**, 1-15.
- Furuya, S., 1987: Growth diagnosis of rice plants by means of leaf color. *JARQ*, **20**, 147-153.
- Homma, K., Nakagawa, H., Horie, T., Ohnishi, H., Kim, H. Y. and Ohnishi, M., 1999: Energy budget and transpiration characteristics of rice grown under elevated CO_2 and high temperature conditions as determined by remotely sensed canopy temperatures. *Jpn. J. Crop Sci.*, **68**, 137-145.
- Inada, K., 1994: Measurement of leaf color on crop. 7. Measurement of leaf color and application to management of crop growth and nutrition. *Agr. Hort.*, **69**, 389-394 (稲田勝美, 1994: 緑を測る. 7).

- 葉色の測定とその栄養・生育診断への利用. 農業および園芸, **69**, 389-394).
- Inoue, K., Sakuratani, T. and Uchijima, Z., 1984: Stomatal resistance of rice leaves as influenced by radiation intensity and air humidity. *J. Agric. Meteorol.*, **40**, 235-242.
- Inoue, Y., 1986: Remote-monitoring of function and State of crop community. I. Analysis of thermal image of crop canopy. *Jpn. J. Crop Sci.*, **55**, 261-268.
- Inoue, Y., 1987: Remote-monitoring of the physiological-ecological status of crops. IV. Quantitative relationship between photosynthetic rate and transpiration rate per vapor pressure deficit for corn and soybean under field conditions. *Jpn. J. Crop Sci.*, **56**, 474-481.
- Ishihara, K., Ishida, Y. and Ogura, T., 1971: The relationship between environmental factors and behaviour of stomata in the rice plant. 2. On the diurnal movement of the stomata. *Jpn. J. Crop Sci.*, **40**, 497-504.
- Ishihara, K., Ebara, H., Hirasawa, T. and Ogura, T., 1978: The relationship between environmental factors and behaviour of stomata in the rice plants. VII. The relation between nitrogen content in leaf blades and stomatal aperture. *Jpn. J. Crop Sci.*, **47**, 664-673.
- Ishihara, K., Sago, R., Ogura, T., Ushijima, T. and Tazaki, T., 1972: The relationship between environmental factors and behaviour of stomata in the rice plant. 4. The relation between stomatal aperture and photosynthetic rate. *Jpn. J. Crop Sci.*, **41**, 93-101.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J. and Pinter, P.J. Jr., 1981: Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.*, **17**, 1133-1138.
- Kumura, A., 1956: Studies on the effect of internal nitrogen concentration of rice plant on the constitutional factor of yield. *Jpn. J. Crop Sci.*, **24**, 177-180.
- Miyama, M., Katsukida, H. and Saito, K., 1984: Growth diagnosis of rice plants based on leaf green scores by color scale. *Agr. Hort.*, **59**, 775-781 (深山政治・勝木田博人・斉藤研二, 1984: 葉色票による水稻の生育診断, 農業および園芸, **59**, 775-781).
- Miyashita, K., Maitani, T. and Takeda, K., 1999: Comparison of surface temperatures of barley varieties under high temperature conditions. *J. Agric. Meteorol.*, **55**, 323-328.
- Pinter, P.J. Jr., Stanghellini, M.E., Reginato, R.J., Idso, S.B., Jenkins, A.D. and Jackson, R.D., 1979: Remote detection of biological stresses in plants with infrared thermometry. *Science*, **205**, 585-587.
- Tsuno, Y., Yamaguchi, T., Omoji, O. and Kai, K., 1991: Relation between the leaf color of rice and the stomatal aperture shown by the infiltration method with special reference to the climatic conditions. *Jpn. J. Crop Sci.*, **60**, 475-483.
- Wada, G. and Matushima, S., 1962: Analysis of yield-determining process and its application to yield prediction and culture improvement of low-land rice. L XIII. On the mechanism of determining the number of spikelets. *Jpn. J. Crop Sci.*, **31**, 23-26.
- Yamamoto, H., Suzuki, Y., Iwano, M. and Hayakawa, S., 1995: Remote sensing of occurrence place of rice blast disease by infrared thermal image. *Jpn. J. Crop Sci.*, **64**, 467-474.