

ソルガム群落内外における平均気温の 高度分布と気温変動の測定

米谷俊彦・瀬尾琢郎*・佐橋 謙**

作物群落内外の微細気象は作物とその周囲の大気との間のエネルギーや物質の交換によって支配されていることは良く知られている。群落内外における平均気温の高度分布は植被層中の顕熱の熱源、冷源の分布や作物に対する温度ストレスの程度を示すばかりでなく、群落内外の乱流の発生や消滅とも密接に関係している。そのため古くから種々の作物群落で数多くの研究が行われてきた(たとえば Geiger 1959, 松野ら 1937, 高須・木村 1972 など)。しかし、家畜の飼料用作物として栽培されているソルガム群落の温度環境の特性については未だ十分に解明されていないように思われる。

ソルガムは水稲や小麦などに比較して背が高いために群落内の温度環境や乱流輸送の特徴が顕著に現われると期待される。そこで著者らは作物群落内外の乱流輸送の特性を解明するために1982年に引き続いて1983年8月上旬にソルガム群落内外で気象観測を行った。作物形態要素の測定を行った真木(1979)の結果によればソルガムは背が高い割にテオシントに比較して葉面積密度がほぼ半分の低い値であり、葉面積密度の高度分布が比較的滑かであるという特徴を有している。前報(米谷ら 1984)では1982年の観測資料を整理して昼間の顕熱輸送の特性と群落内外における気温変動の特性について報告した。今回の観測は1982年とほぼ同様の目的をもった観測ではあったが植被層内外の気温の高度分布や気温変動の測定を夜間を含めて詳細に行った点に特徴がある。以下では1983年に行った観測の概要と得られた解析結果について述べる。

本研究の取りまとめに当り有益な御助言を賜った当研究所の木村和義教授に謝意を表したい。また、観測の際に協力戴いた教養部の大滝英治教授ならびに当研究室の平岡直子技官に感謝する。また、観測を実施するに当り、心よく観測場所を提供戴いた岡山大学農学部附属農場の方々に深謝の意を表する。

観 測 方 法

1983年8月上旬に児島湾干拓地の一角にある岡山大学農学部付属八浜農場のソルガム群落(平均草高約150cm)で観測を実施した。観測期間は8月2日の夜間遅くから8月4日の早朝迄の約30時間であった。

昭和61年1月6日受理

* 岡山大学名誉教授

** 岡山大学教育学部

本研究費の費用の一部は文部省科学研究費(一般B56480054)に依った。

群落内外における顕熱輸送を測定するために超音波風速計、超音波風速温度計、熱電対温度計を三高度（240 cm, 150 cm, 85 cm）に設置して風速と気温変動の測定を行った。さらに群落内部の2高度（35 cm, 10 cm）でも気温変動の測定を行った。これらの変動量のアナログ信号は2台のデータレコーダに記録した後、再生し、各チャンネル毎秒10個のサンプリング率でA/D変換を行いデジタル処理した。また、各種統計量は1ラン10分毎に区切って計算を行った。

平均気温の測定は群落上5高度（295 cm, 265 cm, 220 cm, 190 cm, 170 cm）、群落内7高度（150 cm, 120 cm, 90 cm, 60 cm, 40 cm, 20 cm, 5 cm）の12点で行った。気温の測定には直径50 μm または100 μm の銅コンスタンタン線を電気溶接した熱電対温度計を使用した。変動量の測定には50 μm の線径の熱電対を用いた。また、群落上の平均気温を測定するために50 μm の線径の熱電対を日射カバーなしで使用した。一方、植被層内に設置する温度計は植物体と接触しても容易に切断されないように、直径100 μm の素線の熱電対温度計を用い、日射カバーをして測定を行った。50 μm の細線では日射による気温上昇は一般に小さいと考えられているので、その影響は無視して解析を行った。平均値測定用の熱電対温度計からの信号は小型多点/電圧データ集録装置（タケダ理研製、TR2721A型）に接続して、各高度2分毎にデジタル温度としてプリンターに出力した。TR2721A型の集録装置は熱電対の熱起電力を温度換算する際にデジタルリニアライズ方式を採用しており、基準冷接点も内蔵されているので、再現性に優れ、高精度で安定な気温の測定が行えるといわれている。2分毎のデータは後で5個ずつに平均して10分平均値として用いた。

8月3日、4日の両日とも西日本は太平洋高気圧におおわれていたため、一日中ほぼ晴天であり、各地で35°Cを超える最高気温が観測され、風速も比較的弱かった。

解析結果と考察

1. 平均気温の高度分布の日変化

Fig. 1 に8月3日の0時から24時迄の1日間の群落内外の気温の等値線を示す。0時から日出前後の6時頃まで群落内外の気温は23°C~26°Cの範囲にあり、23°C以下の低温域が群落内部の高さ70 cm以下の層や群落頂部近くの130 cmの所で短時間現われている。日出後全層が等温に近い状態から急上昇し、8時頃に30°Cを超える領域が現われている。その後も全層にわたって気温の上昇が続いているが特に群落内部の気温の上昇が著しい。11時頃から14時頃迄の期間には120 cm以下の高度で35°Cを超える高温域が生じており、60~70 cmでは36°Cを超える場合も認められた。夕方16時頃から全層にわたってほぼ等温状態になり、20時頃まで急激に気温が低下した。20時過ぎから群落内部の気温の低下が顕著になり、群落頂部近くで26°C以下の層が現われている。

Fig. 2 には Fig. 1 に示したと同じ期間の群落内外における1時間毎の気温の鉛直分布を示す。0時から6時頃まで植被層上部で気温が最低であり、群落上で逆転、植被層下部で順転になっている。日出前後に一旦中立な気温分布になり、日出後は植被層上端部の気温が急上昇し全高度中で最高になり、太陽高度が高くなるにつれて徐々に最高気温を示す気層が群落内に移り、太陽高度の最も高くなる12時頃には最下層の20 cm以下になって

いる。その後再び太陽高度が低くなるにつれて最高気温を示す高度は上部に移動し、夕方17時頃には全層で中層成層の鉛直分布を示している。18時頃の日没後は 植被層上端部で最も冷却が進み、群落上から植被層上部にかけて気温分布は逆転しており、植被層中層から下部では順転になっている。先に述べたようにこの観測期間中は西日本一帯が太平洋高

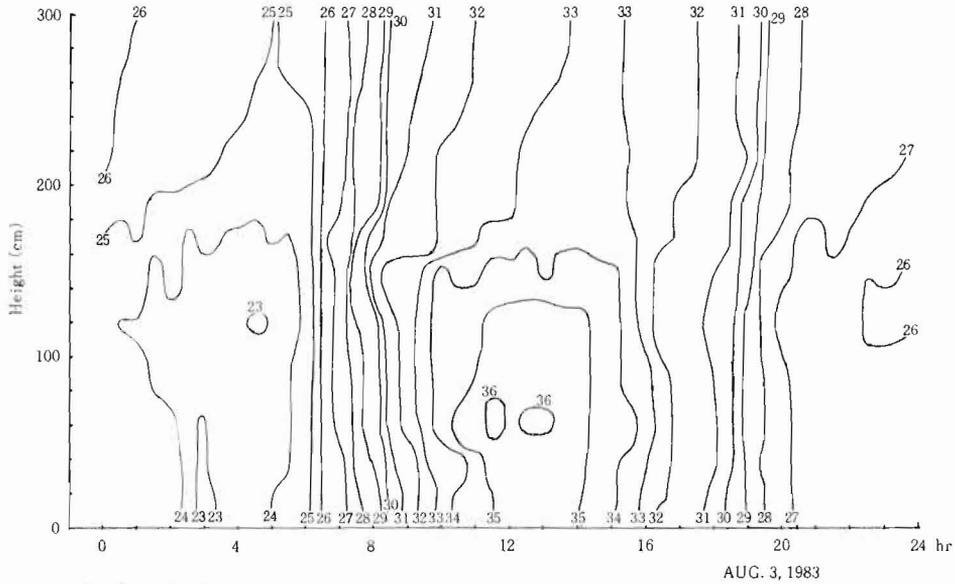


Fig. 1. Air temperature isopleths within and above plant canopies on Aug. 3, 1983.

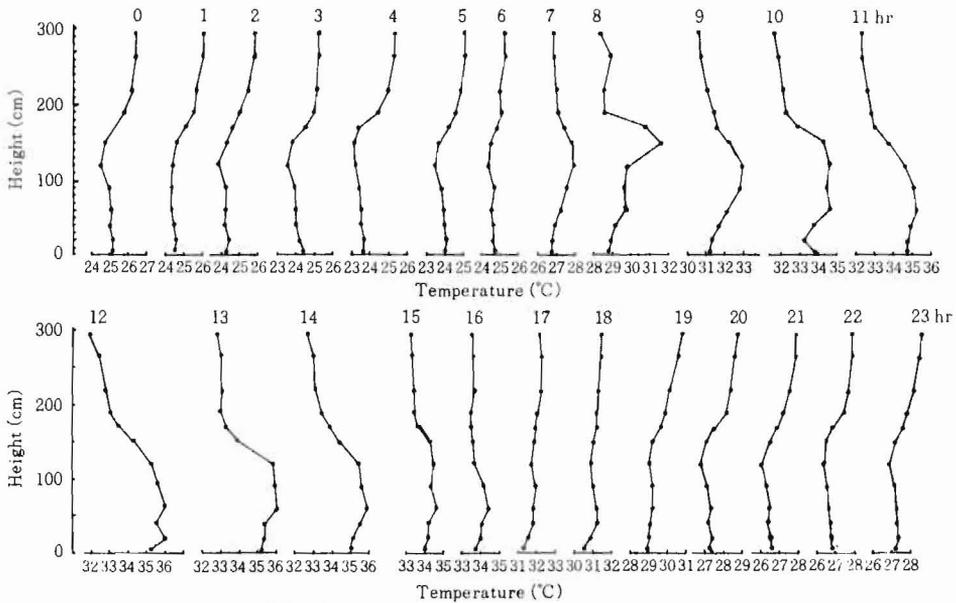


Fig. 2. Mean profiles of air temperature within and above a sorghum field every hour on Aug. 3, 1983.

気圧におおわれていたため、晴天時における気温の鉛直分布の典型的な日変化を示している。

群落内外の12高度における気温の経時変化をFig. 3に示す。また図中には各高度で最低気温と最高気温が出現した時刻を矢印(↓)で示してある。矢印が2本の場合は同じ最低又は最高気温が2度、3本の場合は3度出現したことを表わしている。最低気温は日出前の4時から5時の間に全層ともほぼ同時に観測されるが、詳細にみると上端部近傍で幾分早く生じている。一方、最高気温は全層とも正午前後に出現しており、この日の場合は、植被層下部の40 cmで最も早く起り、そこから上下方向に進むにつれて徐々に遅くなっている。日最高気温と日最低気温の差である日較

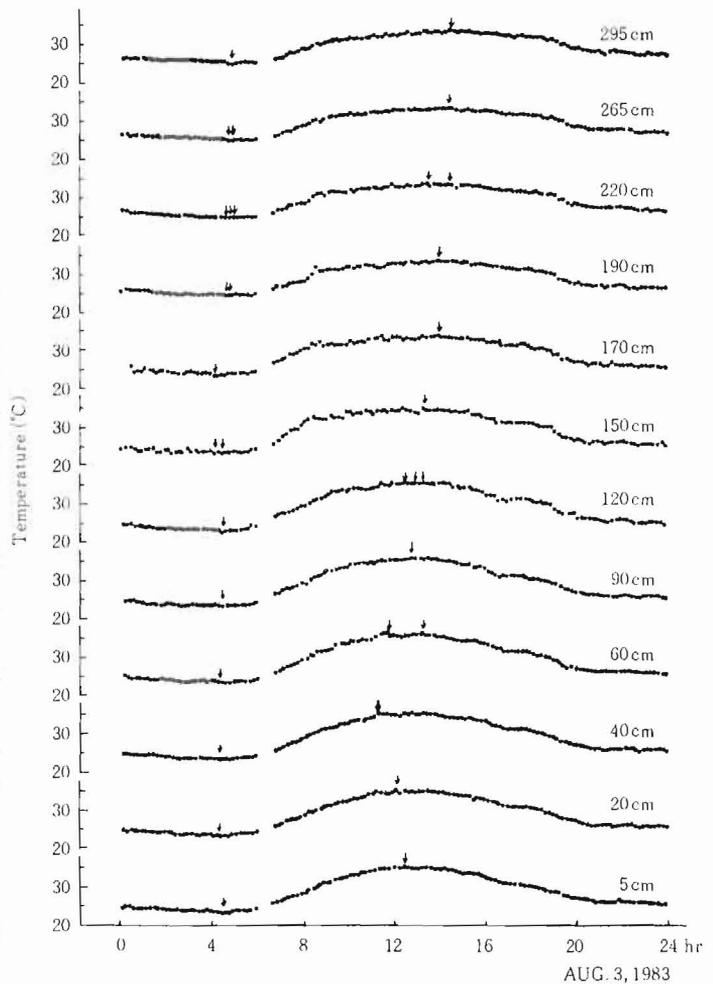


Fig. 3. Diurnal variations of air temperature at twelve heights within and above plant canopies.

差は群落上では8°C~10°Cであり、植被層内(60 cm~120 cm)では13°C程度で最大であり、植被層最下部(5 cm~40 cm)では幾分減少して12°C程度であった。これらの結果はいずれの高度もほぼ平行な日変化をしていること、そして植被層内のかなり広い範囲に能動層が広がっており、しかもその高度が時間的に変化することを示している。日較差や最高気温、最低気温の出現時刻などは群落の幾何学的構造、日射の透過の程度、風の強弱、植被層内の熱収支などに関係して複雑な影響を受ける(Hiramatsu et al. 1984)。作物の生育段階毎に種々の気象状態の下でこのような観測を実施して更に研究を進めることが群落内の気温状態を把握する上で必要と思われる。

2. 群落内外の顕熱輸送量の日変化

鉛直風速変動(w)と気温変動(T)を用いて渦相関法によって鉛直方向の顕熱輸送量 $c_p \bar{w} T$ を10分毎に求めた。ここで c_p は空気の定圧比熱、 ρ は空気の密度であり、 $-$ は時間平均を示す。Fig. 4に85 cmと150 cmの2高度における顕熱の鉛直輸送量を示す。ま

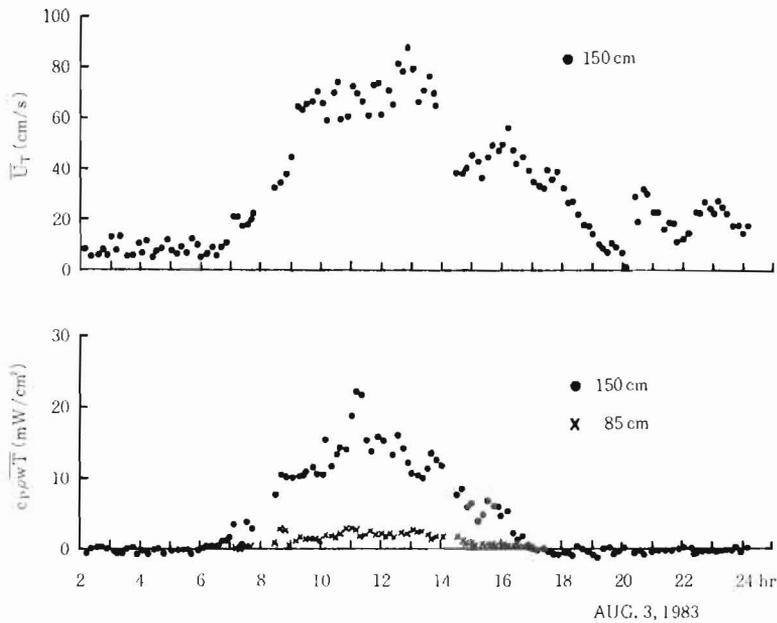


Fig. 4. Diurnal variations of sensible heat fluxes ($c_p \rho w T$) at two heights of 85 cm and 150 cm. The horizontal wind speeds at 150 cm are shown for reference.

た 150 cm における水平方向のスカラ風速の経時変化も参考のために示してある。2時から日出前の5時迄は 20 cm/s 以下の弱風であり、日出と共に風速が増加し、12時過ぎに 100 cm/s 近く迄増加し、その後は次第に減少し、20時過ぎには再び 20 cm/s~30 cm/s の風速を保っている。150 cm における顕熱の鉛直輸送量は正午前に 20 mW/cm² に達し、午後は幾分減少し、17時頃から下向き輸送に転じている。また夜間の輸送量は -0.7 mW/cm² 程度の値であった。これらの輸送量の向きは Fig. 2 に示した気温の1時間毎の鉛直分布中に見られる 150 cm 付近の気温勾配とも良く対応している。一方、植被中層の 85 cm における顕熱輸送量は日中は上向き、夜間は下向きになっており 150 cm における向きとほぼ一致しているが、その値は高度 150 cm の値の 1/10 以下であった。それゆえ、植被層の上部 (85 cm~150 cm) の気層が顕熱の日中における主要な発生源であり、また夜間には吸い込み領域になっていることを示している。この結果は前報(米谷ら 1984)で示した 1982 年夏の日中の結果と幾分

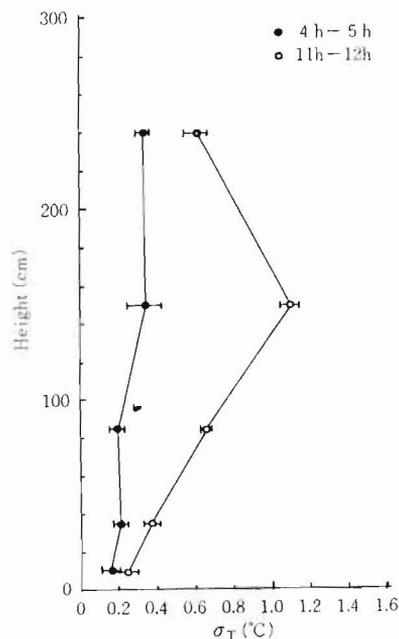


Fig. 5. Height variations of standard deviations (σ_T) of air temperature at night (4hr~5hr) and during the daytime (11hr~12hr).

数値は異なるものの高度変化の傾向はほぼ一致している。

3. 群落内外の気温変動の特性

Fig. 5 に群落内外における日中(11時~12時)と夜間(4時~5時)の気温変動(T)の標準偏差 σ_T ($\equiv \sqrt{T^2}$)の高度分布の比較を示す。白丸(○印)は11時~12時の間の標準偏差 σ_T の平均値、黒丸(●印)は4時~5時の間の平均値を示す。横棒(—)は σ_T の値の1時間当りの標準偏差を示す。 σ_T は日中群落上端部で最大で約 1°C の値であり、群落上方および群落内部に向かって減少している。瞬間的な気温変動の最大値は標準偏差の3倍程度であることが知られているから群落上端部では約 3°C の最大の気温変動が予想される。それゆえ、正午近くでは瞬間的には 40°C に近い気温が生じていたと考えられる。このような

高気温に対する作物の種々の反応については今後の問題として残されている。夜間には σ_T の値は全高度で 0.4°C 以下であり、高度変化も小さい。なおここで示した σ_T の値は10分間における気温の標準偏差であり、10分以下の短周期変動によるものである。

8月3日の早朝に10分以上の長周期の顕著な気温変動が認められたので以下に簡単に記す。Fig. 6 は群落内外の12高度における1時から6時迄の期間の気温の経時変化を示す。3時頃から5時頃の約2時間にわたって15分~20分周期の気温変動が170cm以下の各高度でみられる。この周期変動は150cmのすぐ近傍で振幅が最も大きく、群落上の190cm以上では振幅が小さくなっている。これらの周期変動は気温ばかりでなく、水平

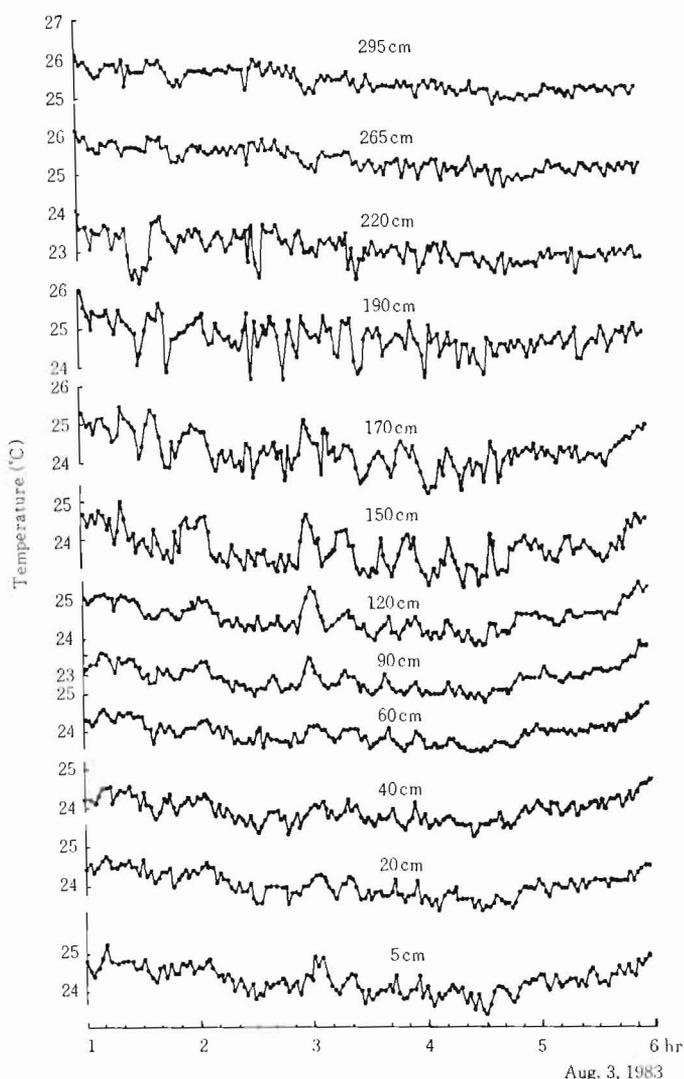


Fig. 6. Time variations of air temperature at night at twelve heights.

風速や鉛直風速の経時変化の記録中でも認められた。

Fig. 7 に 150 cm における 気温変動 (T) と 水平風速 (u) の変動の対数スペクトル $nS_T(n)$ と $nS_u(n)$ を示す。縦軸は各要素のスペクトル密度 $nS_T(n)$ と $nS_u(n)$, 横軸は周波数 n である。0.01 Hz 付近のスペクトルギャップをはさんで 0.001 Hz 近傍と 0.1 Hz 近傍の周波数帯に気温と水平風速のスペクトル密度が大きい領域が存在している。0.001 Hz は約 16 分の周期に対応し、0.1 Hz は 10 秒の周期に対応している。したがって先に示した気温の 15 分～20 分の周期変動は 0.001 Hz の近傍の周波数領域のスペクトルのピークに対応している。また、10 分以下の短周期変動には 0.1 Hz 近傍のスペクトルの山からの寄与が大きいことがわかる。

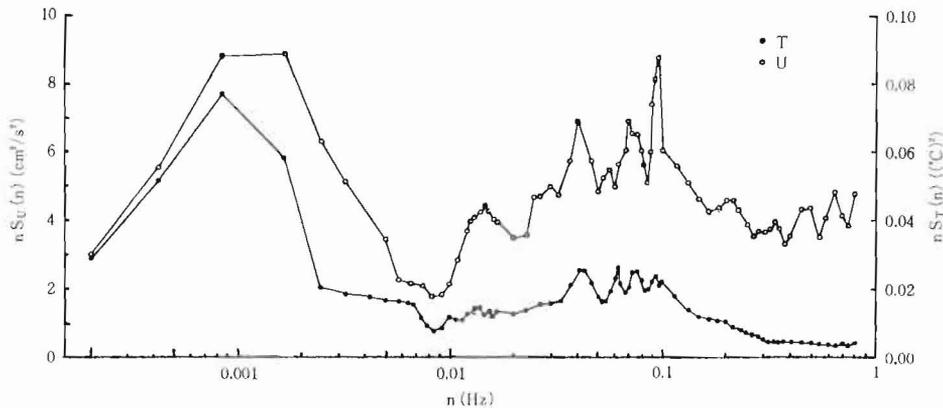


Fig. 7. Logarithmic power spectra of air temperature and horizontal wind velocity at night, where $S_T(n)$ and $S_u(n)$ are spectral densities of air temperature and longitudinal wind velocity, respectively, and n is frequency.

15 分～20 分の長周期の変動は気温ばかりでなく、水平風速や鉛直風速などにも認められた。Maitani et al. (1984) は 1980 年 9 月中旬に同じ八浜において水稲群落上で類似の長周期変動を観測している。おそらくこれらの長周期変動はいずれも夜間の逆転層でしばしば観測される波動現象によるものと考えられる。そして気温勾配の大きい植被層上端部で気流の波動状の変化に伴って気温変動の振幅が特に大きくなったものと思われる。また、この種の波動現象は夜間安定気層中における熱輸送のみならず、作物群落を発生源とする病原菌や孢子、昆虫の出すフェロモンなどの拡散に大きい影響を与えるものと思われる。

摘 要

1983 年 8 月上旬にソルガム群落 (平均草高 150 cm) で平均気温の鉛直分布と気温変動の観測を行った。結果は以下のようにまとめられる。

1) 群落内外の気温の鉛直分布は著しい日変化を示した。日中では気温の高度分布の最高値は群落内部で観測された。最高気温を示す気層は太陽高度が高くなるにつれて頂部が

ら深部に移り、午後太陽高度が低くなるにつれて再び植被層上部に移動した。気温勾配は日中は植被層下部で逆転、上部から群落上では順転になっていた。夜間には状況は全く逆になった。

2) 85 cm と 150 cm における顕熱のフラックスは日中は上向き、夜間は下向きであった。日中の 85 cm におけるフラックスは 150 cm の値の 1/10 以下であった。気温の鉛直分布や二高度における顕熱フラックスの差異は群落上部が能動層であることを示している。

3) 10分毎に計算された気温の標準偏差 (σ_T) は日中には群落上で約 1.0°C の最大値を持っており、高度差は顕著であった。夜間には σ_T の値は全高度で 0.4°C より小さかった。

4) 15分~20分の周期をもつ気温変動が日出前の3時から5時の間に観測された。この周期的な気温変動は植被の上端部近くで最も顕著であった。また、この長周期変動は 150 cm における風速と気温変動のスペクトル解析によって 0.001 Hz 付近の顕著なスペクトルのピークとして確認された。

文 献

- Geiger, R. 1959. The climate near the ground. p. 499. (English transl. from the German by Harvard Univ. Press, Cambridge, Massachusetts).
- Hiramatsu, Y., Seo, T. and Maitani, T. 1984. Goudriaan's model of crop micro-meteorology applied to the rice crop. Ber. Ohara Inst. landw. Biol. Okayama Univ. Bd. 18: 183-209.
- Maitani, T. and Seo, T. 1984. Wave-like wind fluctuations observed in the stable surface layer over a plant canopy. Boundary-Layer Meteor. 29: 273-283.
- 米谷俊彦・瀬尾琢郎・大滝英治. 1984. ソルガム群落内外における顕熱の鉛直輸送の測定. 農業気象 40: 243-250.
- 真木太一. 1979. テオシントおよびソルゴ群落下における風の乱れの分布. 農業気象 35: 133-143.
- 松野満壽己・畠山伊佐男・高須謙一・山田忠男・久世源太郎. 1937. 稲田に於ける微細気候 [I]. 農業及び園芸 12巻10号: 2562-2572.
- 高須謙一・木村和義. 1972. 圃場の微細気象 [4]. 露場, 甘藷畑, 大豆畑, 稲田の微気象の比較. 農学研究 54: 121-124.

Measurement of Vertical Profiles and Fluctuations of Air Temperature within and above a Sorghum Canopy

Toshihiko MAITANI, Takuro SEO and Ken SAHASHI

Summary

Vertical profiles of mean air temperature and temperature fluctuations were observed within and above a sorghum canopy with a mean plant height of 150 cm at the beginning of August in 1983.

1) Temperature profiles within and above plant canopy exhibited remarkable diurnal variations. In the daytime, a temperature maximum was observed within the plant canopy. The air layer having the maximum temperature moved from the top to the lower part as the sun rose in the morning and moved upward with as the sun fell in the afternoon. The temperature gradient was positive in the lowest layer of the plant canopy and negative at the air layer from the upper part of plant canopy to the atmosphere over plant canopy. The situation was reversed at night.

2) Sensible heat fluxes at 85 cm and 150 cm were upward in the daytime and downward or negligibly small at night. In the daytime, the sensible heat fluxes at 85 cm was smaller than one tenth of that at 150 cm. The vertical profiles of mean air temperature and the difference of sensible heat fluxes at 85 cm and 150 cm indicate that the upper part of the canopy is the active layer for heat exchange.

3) In the daytime, the standard deviations of air temperature was maximum (about 1.0 °C) at the top of the plant canopy, and had pronounced height distributions. At night, the values of σ_T at all heights were smaller than 0.4 °C.

4) The temperature fluctuations with a period of 15~20 min was observed for about 2 hours from 3hr to 5hr before sunset. The periodic temperature fluctuations were most manifest near the top of the plant canopy. The long period fluctuations were confirmed as significant spectral peaks in a frequency range near 0.001 Hz, from the spectral analysis of wind and temperature fluctuations at 150 cm.