

畝方位の異なるダイズ群落下の微気象の違い

Md. Abdul Baten・今 久・松岡延浩・照沼保明
(緑地気象学研究室)

Variability in Micrometeorology below a Soybean Canopy with Two Row Orientations

Md. Abdul Baten, Hisashi Kon, Nobuhiro Matsuoka, Yasuaki Terunuma
(Laboratory of Green Space Meteorology)

Abstract

A field experiment was conducted during the summer of 1996 in the farm of the Faculty of Horticulture, Chiba University to examine spatial variations of some selected micrometeorological factors at the soil below a soybean-row canopy at partial cover. Results of the study indicate that the magnitudes and patterns of micrometeorological factors observed at designated locations between N-S rows were different from the micrometeorology observed between E-W rows. The diurnal patterns of micrometeorological factors at each position were associated with the patterns of soil irradiance, which were the interactions of row-sun geometry. Daily fluctuations of soil irradiance, net radiation and soil heat flux at east, center and west locations between N-S rows were two to three times larger than those measured directly beneath the canopy. On the other hand, daily fluctuations of soil irradiance, net radiation and soil heat flux at center location of E-W rows were three to four times larger as compared to the magnitude observed directly beneath the canopy. Temperature differences between the sunlit and shaded portions of the soil of N-S and E-W rows were 4-6°C. Temperature differences between the sunlit and shaded portions of the soil surface of N-S and E-W rows exceeded 15°C and 20°C, respectively. Air temperature measured at 5cm above each position, was also dependent on the position with respect to the N-S and E-W soybean rows.

1. はじめに

畝方位の違いは、作物畑の微気象に影響を与える[7, 12]. 特にキャノピーの下での微気象要素は、畝の方位、畝と太陽の位置関係、その植物体の生育時期により大きく変化する。畝間がキャノピーにより完全に覆われていない場合、地表面の日陰分布の違いやそれに関連した他の微気象要素の違いが、キャノピー下のエネルギー収支の変化を引き起こす。過去の研究でも、畝作物内の微気象要素がキャノピー下の位置によって異なることが明らかにされている[1, 5, 6, 11, 18].

キャノピー下のエネルギー収支を理解するために、多くの研究者は、まばらな植生について、キャノピーと土

壤のエネルギー収支を分けて、エネルギー収支モデルを発展させてきた[13, 14, 15, 17]. しかし、これらのキャノピーと土壌のエネルギー収支を分けて考えるモデルは、異なった畝方位のキャノピー下における微気象要素の空間分布の予測に対しては、適用しにくい[9]. 著者らは、過去の研究で、秋季のジャガイモのキャノピー下における南北畝と東西畝の方位の違いによる微気象要素の相違を明らかにした[3]. Ham and Kluitenberg[9]は、夏季の南北畝ダイズのキャノピー下での微気象要素の位置による変化を明らかにしたが、東西畝に関しては述べていない。Mutsaers[16]は、東西畝は南北畝に比較して日射の透過がより大きくなると報告した。過去の研究において、夏季における東西畝の地表面付近での微気象要素のキャノピー下の位置による相違は明らかにされていない。

い。

この研究は、南北畝と東西畝において地表面付近の微気象要素がキャノピー下の位置によってどのように違うかを実験的に比較し、評価することを目的としている。本研究では、南北畝と東西畝のダイズ畑において、複数の場所で地表面付近の微気象観測を行い、比較した。

2. 材料及び方法

2.1 実験状況

実験は、千葉大学園芸学部緑地気象学研究室の研究圃場(北緯35度46分, 東経139度54分)で1996年の夏季に行った。ダイズ (*Glycin max* L., 品種, さやむすめ) をそれぞれ東西畝, 南北畝の2区画の圃場で栽培した。それぞれの区画は15m×12mとした。1996年5月4日に株間20cm, 畝間50cmで3粒ずつ播種し, 出芽後に1個体ずつに間引きした。栽植密度は10個体m⁻²であった。ダイズは一般的な栽培手法で管理された。

2.2 実験区の設定及び測定機器

キャノピー下の位置による微気象の違いを測定するために、日射計, 地中熱流板, 深さ5cmに熱電対(地温), 高さ5cmに通風乾湿計を, ダイズキャノピー下の4個所に等間隔に設置した[3]。Fig. 1は南北畝の気象測器の設置状況を示している。南北畝では, 株間の中心線上(以下“キャノピー直下”と呼ぶ)とその位置から東側に12.5cm離れた地点(畝間の西側; 以下“西側”と呼ぶ), 25cm

離れた地点(畝間中央; 以下“中央”と呼ぶ), 37.5cm離れた地点(畝間の東側; 以下“東側”と呼ぶ)の4個所に測器を設置した(Fig. 1)。測器は東西畝でも同様に設置した。東西畝では, 株間の中心線上(以下“キャノピー直下”と呼ぶ)とその位置から北側に12.5cm離れた地点(畝間の南側; 以下“南側”と呼ぶ), 25cm離れた地点(畝間中央; 以下“中央”と呼ぶ), 37.5cm離れた地点(畝間の北側; 以下“北側”と呼ぶ)の4個所に測器を設置した。

キャノピー下の位置を示す指数を*i*とすると, 土壤表面の位置*i*における純放射量は, 以下の式で計算できる[9]。

$$Rn_i = (1 - \alpha) R_{Si} + \epsilon_s (V_{sky,i} \epsilon_{sky} \sigma T_a^4 + (1 - V_{sky,i}) \epsilon_c \sigma T_c^4) - \epsilon_s \sigma T_{s,i}^4 \quad (1)$$

ここで R_{Si} は土壤表面へ到達する日射量(Wm⁻²), α は土壤表面のアルベド, σ はステファンボルツマン定数, ϵ_s , ϵ_c , ϵ_{sky} はそれぞれ土壌, キャノピー, 天空の射出率である。 T_a , T_s , T_c はそれぞれ空気, 土壌表面, キャノピーの温度(K)である。変数 V_{sky} は土壌表面から見た半球状の天空の見える割合であり, 天空から土壌への長波放射の割合を表す[10]。 V_{sky} は以下の式で計算される。

$$V_{sky,i} = 0.5 \left[\frac{Lr - 0.5Lc - y}{[(Lr - 0.5Lc - y)^2 + Zc^2]^{1/2}} + \frac{y - 0.5Lc}{[(y - 0.5Lc)^2 + Zc^2]^{1/2}} \right] \quad (2)$$

ここで Lr は畝幅(m), Lc は, 畝の中心線から最も離れた葉から逆側の最も離れた葉までの距離(以下, キャノピー

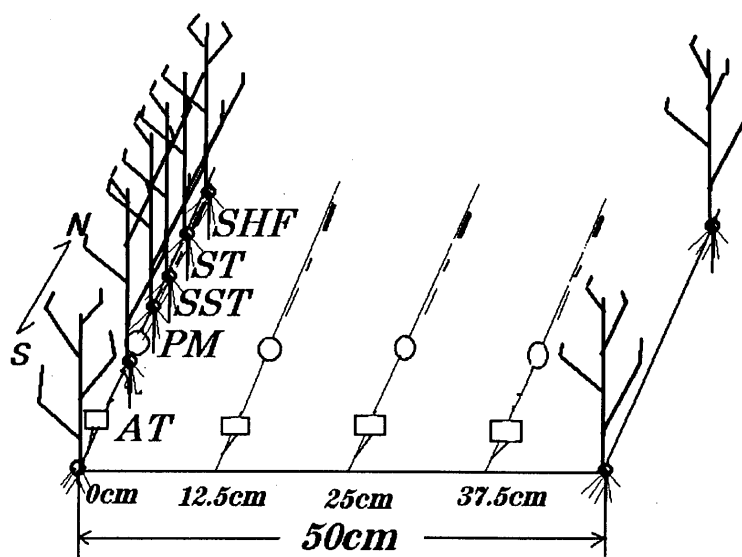


Fig. 1 Diagram of instrumentation between N-S row used to measure the energy balance of the soil at four positions beneath the potato canopy. Depicted are measurements of solar radiation (PM), soil heat flux (SHF), soil temperature (ST), soil surface temperature (SST) and air temperature (AT). Instrumentation between E-W rows and over the canopy is not shown.

の幅と呼ぶ) (m), Z_c は草丈(m), y は畝の中心線から対象とする点までの距離である[8]。この手法では、キャノピー直下での V_{sky} が0であると仮定している。

キャノピー温度は赤外線放射温度計(TASCO THI-300)で測定した。キャノピーと土壌の射出率はそれぞれ0.97, 0.93であると仮定した[10]。天空の射出率は、気温と相対湿度を使ったBrutsaert[4]の式を用い、計算された。天空からの全長波放射は気温と天空の射出率、水蒸気圧から計算された。

キャノピー上の全日射量を、地上150cmに設置した日射計(英弘精機, MS61)を用いて測定した。純放射計(英弘精機, CN11)を地上200cmに設置し純放射量を測定した。三杯式風速計(牧野応用測器, AF750)を用い、南北畝畑の地表から20cm, 50cm, 100cmの3高度の風速を測定した。また、東西畝畑の20cmでも風速を測定した。地上100cmに熱電対通風乾湿計を設置し、気温を測定した。また、地上100cmに湿度センサー(TDK, CHS-APS)を設置し湿度を測定した。すべての測器のデータはデータロガー(江藤電気, THERMODAC-E, 5001A)を用い1分ごとに記録された。1分ごとのデータからコンピュータで1時間平均を計算した。草丈やキャノピーの幅を播種後30日後(30DAP)から10日毎に測定した。デジタル葉面積計(林電工, AMM-8, NP713.)によって葉面積を測定し、葉面積指数(LAI)を計算した。

3. 結果及び考察

本研究では、一日中快晴であった1996年7月3日のデータセットを用いて解析を行った。この時期の畝間はキャノピーによって部分的に覆われていた。この日の作物上100cmの気温と相対湿度をFig. 2とFig. 3に示した。この日のダイズの草丈は54cm, キャノピーの幅は約35cm, LAIはおおよそ1.8であった。

3.1 土壌面日射量と純放射量と地中熱フラックスの日変化パターン

Fig. 4に、南北畝と東西畝のそれぞれ4個所で測定された、土壌表面へ到達する日射量及び地中熱フラックスおよび(1)式から計算された純放射量を示す。

Fig. 4aに南北畝の4個所の土壌への日射量の日変化パターンを示す。日射の透過によって畝の間では、異なった時刻に“キャノピー直下”以外の位置にピークが現れた。第1のピークは正午前に“西側”に現れた。第2のピークは正午に“中央”で現れた。第3のピークは正午過ぎに“東側”に現れた。南北畝間“中央”の土壌面への日中(6:00~18:00; 以下同じ)の積算日射量は、“キャ

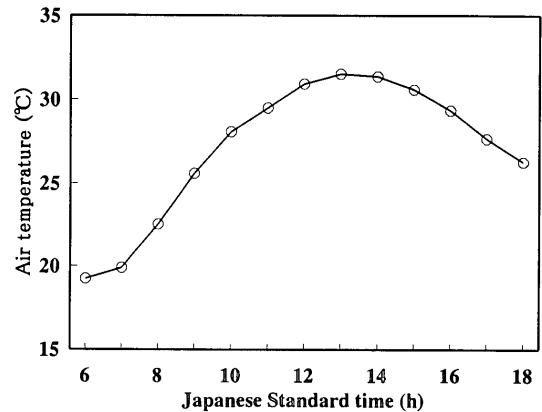


Fig. 2 Air temperature at 1.0m height above the soil surface during observation on July 03, 1996.

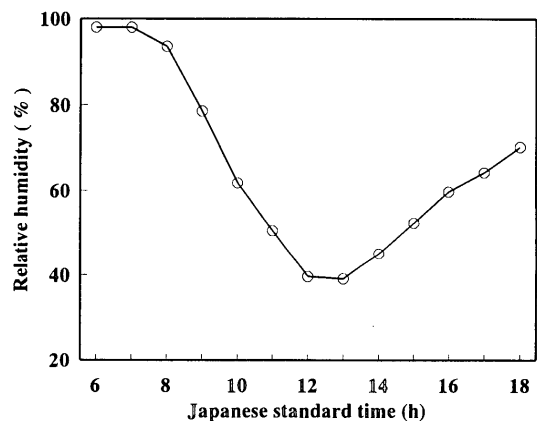


Fig. 3 Relative humidity at 1.0m height above soil surface during observation on July 03, 1996.

Table 1 Daily (6:00h-18:00) accumulated solar radiation and net radiation (MJm^{-2}) at different locations below soybean canopy.

Row direction	N-S			
	bc	el	cl	wl
Solar radiation	3.8	7.8	8.8	6.2
Net radiation	3.4	5.5	5.8	3.9

Row direction	E-W			
	bc	nl	cl	sl
Solar radiation	3.7	9.2	13.1	7.8
Net radiation	2.7	7.0	7.1	5.5

(bc, el, cl, wl, nl & sl stand for below canopy, east, center, west, north and south locations, respectively).

ノピー直下”の2.3倍となった (Table 1)。

Fig. 4bは、東西畝の4個所の土壌表面への日射パターンの日変化を示している。東西畝のそれぞれの場所における土壌面への日射パターンは南北畝と全体的に異なっ

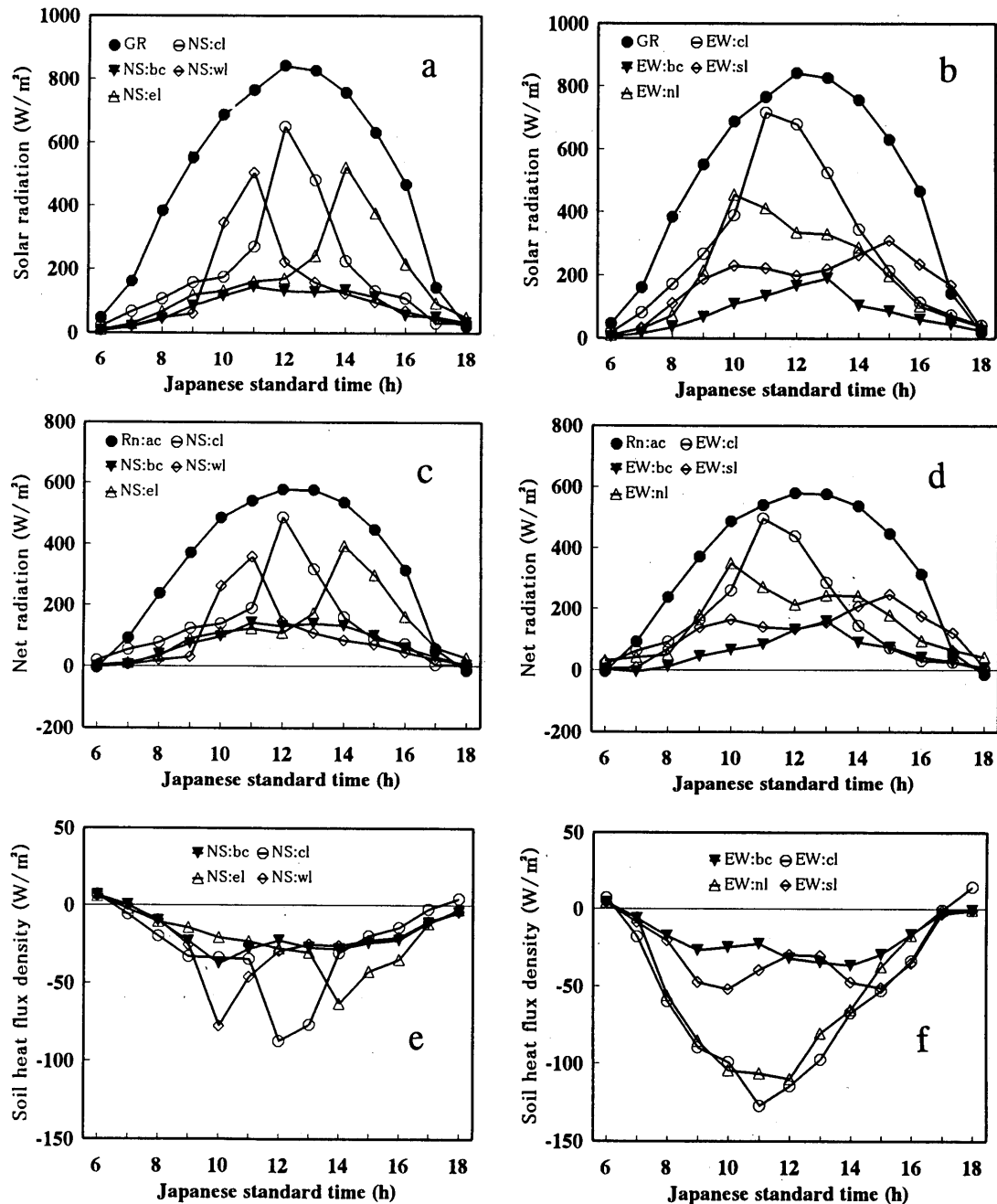


Fig. 4 Solar radiation (a, b), net radiation (c, d) and soil heat flux (e, f) at each measurement position. The arrangement of the measurement positions between two rows is provided in Fig. 1. [NS= N-S rows, EW= E-W rows, GR= Global radiation, Rn= Net radiation. "bc, el, wl, nl, sl, cl and ac" stand for the locations "directly beneath canopy, east, west, north, south, center and above canopy, respectively"].

ている。東西畝で観測された最大のピークは“中央”に現れた。日中の観測では、東西畝の“中央”の日射量は“キャノピー直下”の3.5倍大きく、南北畝の“中央”への日射量の1.5倍となった(Table 1)。2番目に大きな日射量のピークは“北側”に現れた(Fig. 4b)。“南側”には顕著なピークが現われなかった。これは日中、キャノピーの影によって地表面が影響を受けたためと考えられ

る。

Fig. 4cは、南北畝の地表面での純放射量のピークが、地表面への日射のパターン(Fig. 4a)と同様に、“西側”、“中央”、“東側”の順に現れることを示している。そのため、純放射量の変化は、日射の透過に起因するものであると考えられる。日中では、南北畝の“中央”の純放射量は、“キャノピー直下”の純放射量の1.7倍だっ

た (Table 1)。

Fig. 4dは、東西畝の各場所の純放射量のパターンを示している。フラックスの量や日変化パターンは南北畝の純放射量のパターン (Fig. 4c) と異なっている。東西畝での純放射量のピーク値は“中央”で観測された。2番目の大きなピークは“北側”で観測された。日中 (6:00~18:00) では、“中央”の純放射量は“キャノピー直下”よりも約2.6倍大きくなった (Table 1)。

Fig. 4eは、南北畝において、地中熱フラックスが正午前、正午、正午過ぎに、“西側”、“中央”、“東側”においてそれぞれピークが現われたことを示している。“西側”や“東側”に比べて“中央”でのピークの絶対値が、最大となった。これは正午の南北畝の“中央”への日射の透過によるものである。“中央”でのピークの絶対値は 80 Wm^{-2} であり、“キャノピー直下”のピーク値の3倍近かった。

Fig. 4fは、東西畝の地中熱フラックスのパターンを示している。東西畝のパターンや大きさは南北畝とは異なった (Fig. 4e)。東西畝の“中央”で観測された地中熱フラックスの大きさが最大であり (約 130 Wm^{-2})、“キャノピー直下”のピーク値に比べて4倍近い大きさであった。2番目に大きい地中熱フラックスのピーク値は“北側”に現われた (Fig. 4f)。“南側”の地中熱フラックスはキャノピーの影によって影響を受け、その影響は正午に最大となったと考えられる。

東西畝、南北畝の両方において、地中熱フラックスが空間的にも時間的にも大きな変化を示した。しかし、それらの日変化のパターンやフラックスの総量は、東西畝と南北畝で異なった。

3.2 地表面付近の温度

畝方位の違いによる地表面でのエネルギーフラックスの相違は、地表面近くの温度変化パターンと関連していた (Fig. 5)。一般に、地温や地表面温度、気温のパターンは、南北畝、東西畝の両方とも日射のパターン (Figs. 4a, 4b) に従った。南北畝で観測された温度パターンは東西畝のパターンと異なっていた。

Fig. 5aは、南北畝の深さ5cmで観測された地温の日変化のパターンを示している。それぞれ“西側”、“中央”、“東側”でピークが観測された。“中央”の温度は、最大の値、 33°C を示した。“キャノピー直下”の地温のピーク値は、他の地点に比べ最も低い温度であった。“東側”、“中央”、“西側”と“キャノピー直下”の温度の違いは、約 $4 \sim 6^\circ\text{C}$ であった。

Fig. 5bは、東西畝の深さ5cmで観測された地温の日変化のパターンを示している。南北畝に比べて変化が滑

らかである。“中央”で観測された地温は、他の位置に比べ大きかった。“南側”と“キャノピー直下”で観測された地温は、“中央”と“北側”に比べてかなり小さい値となった。それは日中の影の効果によるものであった。日陰と日向の地温の差は $4 \sim 5^\circ\text{C}$ であった。

Fig. 5cは、南北畝の地表面温度の日変化パターンを示している。それぞれ正午前、正午、正午後に“西側”、“中央”、“東側”でピークが現われた。キャノピーによって常に遮られている“キャノピー直下”で最低の地表面温度が観測された。Fig. 5dは、東西畝の地表面温度の日変化パターンを示している。“中央”で観測された地表面温度は他の位置のものに比べ最大の値となった (Fig. 5d)。“キャノピー直下”や“南側”の地表面温度は、キャノピーの影の影響のため最小の値となった (Fig. 5d)。地表面での日陰と日向の温度差は約 20°C であった。

Fig. 5eは、南北畝の地上5cmの気温の日変化パターンを示している。“中央”での最高気温は 36.7°C であり、“東側”では 36.4°C 、“西側”では 36.1°C であった。“キャノピー直下”で観測された最高気温は 34.0°C であった。日向の地表面上の気温は、日陰よりも $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 高くなった。10時前と14時後の気温はどの位置でもほぼ同様であった。

Fig. 5fは、東西畝の地上5cmの気温の日変化パターンを示している。最高気温は、“中央”で現われた。東西畝の最高気温は11時で、“キャノピー直下”、“北側”、“中央”、“南側”でそれぞれ、 34.5°C 、 36.4°C 、 36.8°C 、 34.7°C であった (Fig. 5f)。“キャノピー直下”と“南側”の気温は、影の影響でほとんど同じであった。

Ham and Kluitenberg [9] の夏季の観測によれば、地表面温度の急激な上昇は、直達日射によって照らされた時に起こるとしている。夏季のチリではキャノピー下の日向と日陰の地表面温度差は 30°C で [11]、夏季のダイズでは約 25°C [9] であったと報告されている。われわれの研究では日向と日陰の地表面温度の差は $13 \sim 15^\circ\text{C}$ であった (Fig. 5c)。本実験の地表面温度の差が他の報告よりも低かったのは、観測場所の日射量と気温の違いによると考えられる。

Batenら [3] は、秋季に、東西、南北両畝方位のジャガイモキャノピー下で、地表面微気象の空間的な変動に関する観測を行った。そして、ここで得られた夏季のダイズキャノピー下の日射量、純放射量、地中熱フラックス、地表面温度、地温、気温の変化とは異なる結果を報告している。この違いは、季節による差と作物形態の違いによるものと考えられる。

キャノピー下の各位置における微気象要素の日変化パターンは、土壌面への日射のパターンに関連した変化を示した。南北畝では、“東側”、“中央”、“西側”それぞれ

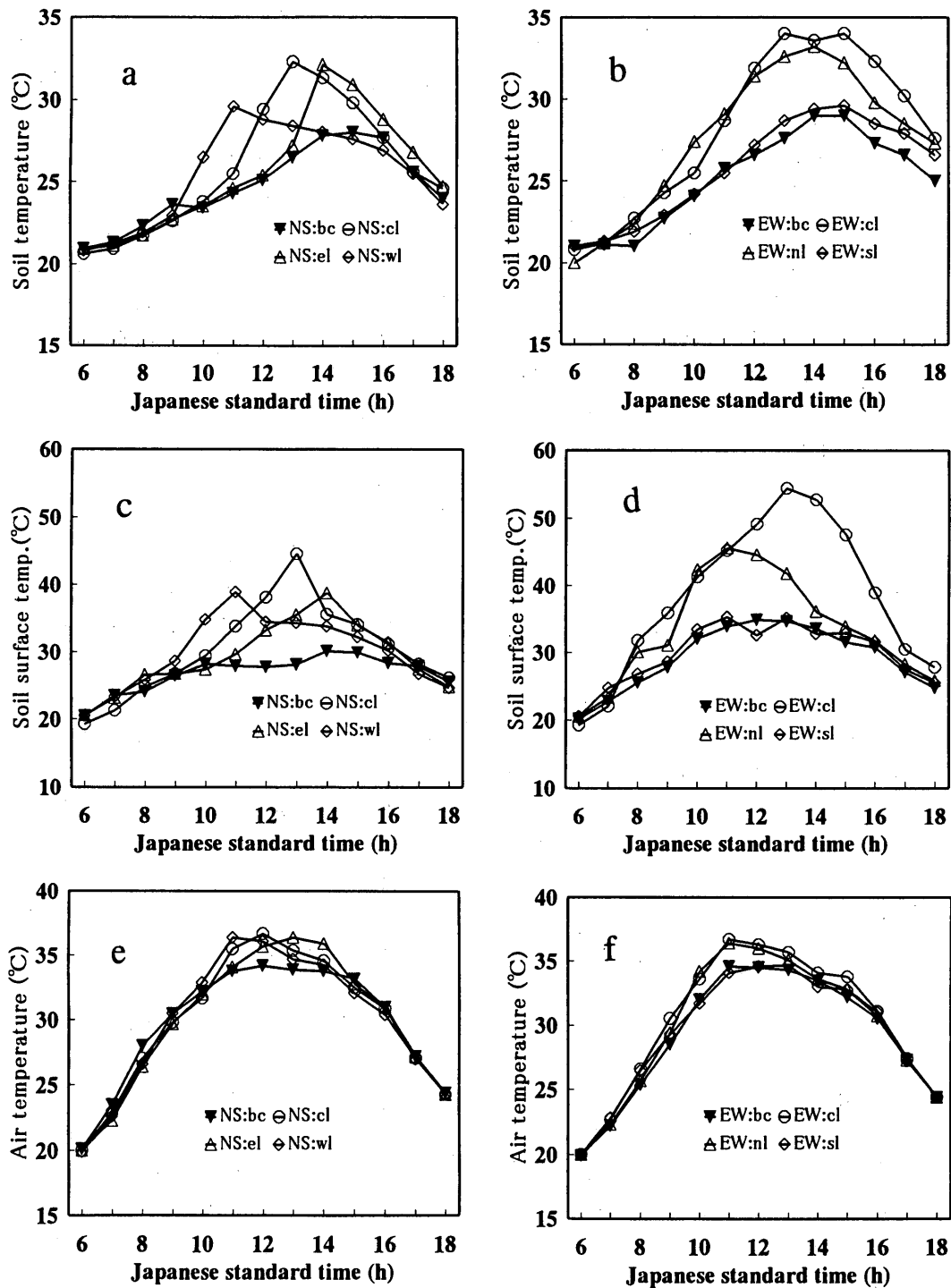


Fig. 5 Soil temperature (a, b), soil surface temperature (c, d) and air temperature (e, f) at each position. The arrangement of the measurement positions between two rows is provided in Fig. 1. All symbols have been defined under Fig. 4.

の日射量, 純放射量, 地中熱フラックスのピーク値が, “キャノピー直下” のそれらよりも2~3倍大きくなった。一方, 東西畝では, “中央”の日射量, 純放射量, 地中熱フラックスのピーク値が, “キャノピー直下”よりも3~4倍大きくなった。また, 日向と日陰の地温の差は, 東西畝, 南北畝とも4~6°Cとなった。南北畝と東西畝に

おける日向と日陰の地表面温度の差は, それぞれ15°C, 20°Cであった。それぞれの位置の5 cm上で観測した気温もまた, 畝方位の違いによる位置の特性に依存する変化を示した。

4. まとめ

本実験より、畝間がまだ閉じていない時期では、キャノピー下の地表面熱収支や気温が、畝方位やキャノピー下の位置に依存することが示された。また、南北畝の地表面熱収支や気温が東西畝とは異なることが示された。このため、地表面付近の微気象要素の変化を解明するためには、畝方位やキャノピー下の位置の違いに対してより詳しく調査する必要がある。また、キャノピー下の異なった位置における純放射量や地中熱フラックスの日変化パターンは、主に両区の日射透過の日変化パターンによって決定された。

摘 要

作物が畝に植えられたとき、畝方位と太陽の位置関係によって畝間の土壌面へ達する日射の強さは異なる。これは畝群落内の微気象に空間的な相違をもたらす。ダイズの畝間がまだ閉じていない時期に、地表におけるいくつかの気象要素の空間分布の違いを調べるために千葉大学園芸学部圃場（北緯35°46′，東経139°54′）で1996年の夏に野外実験を行った。結果は、南北畝間で観測された異なる位置での気象要素の大きさと変化パターンが、東西畝間で観測されたものと大きく異なることを示した。各位置の気象要素の変化パターンは、畝方位と太陽との位置関係で決まる土壌への入射放射のパターンと関連していた。南北畝間の東、中央、西の土壌面入射放射量、純放射量、地中熱フラックスのそれぞれの日変化の大きさは、キャノピー直下で観測されたものより2倍から3倍大きかった。一方、東西畝間の中央の土壌面入射放射量、純放射量、地中熱フラックスのそれぞれの日変化パターンは、キャノピー直下で観測されたものより3倍から4倍大きかった。地表面の日向と日陰の温度差は、南北畝と東西畝でそれぞれ15°C、20°Cを越えた。各位置の高さ5 cmで測定された気温は、東西と南北の畝間の位置に依存した。

謝 辞

文部省国費留学生として来日した第一著者が中心になってこの研究を行った。財政上の支援をして頂いた、文部省に感謝します。また、実験に関して有益な御助言を頂いた千葉大学中山敬一教授に感謝いたします。

引用文献

- [1] Baldocchi, D. D., Verma, S. B. and Rosenberg, N. J. (1983): Characteristics of air flow above and within soybean canopies. *Boundary-Layer Meteorol.*, **25**, 43-54.
- [2] Baten, M. A. and Kon, H. (1997): Comparisons of solar radiation interception, albedo and net radiation as influenced by row orientations of crops. *J. Agric. Meteorol.*, **53** (1), 29-39.
- [3] Baten, M. A., Kon, H. and Matsuoka, N. (1996): Spatial variability in micrometeorology at soil surface below a potato canopy with two row orientations. *J. Agric. Meteorol.*, **52** (4), 301-310.
- [4] Brutsaert, W. (1975): On a derivable formula for long-wave radiation from clear sky. *Water Resour. Res.*, **11**, 742-744.
- [5] Denmead, O. T., Fritschen, L. J. and Shaw, R. H. (1962): Spatial distribution of net radiation in a corn field. *Agron. J.*, **54**, 505-510.
- [6] Graser, E. A., Verma, S. B. and Rosenberg, N. J. (1987): Within-canopy-temperature patterns of sorghum at two row spacings. *Agric. For. Meteorol.*, **41**, 187-205.
- [7] Grewal, D. S. (1987): Microenvironmental parameters in wheat field as influenced by geometric pattern and nitrogen fertility. *Indian J. Ecol.*, **14** (1), 72-77.
- [8] Ham, J. M. (1990): Soil water evaporation and transpiration from a row crop at partial cover. Ph. D. diss. Texas A&M Univ. College Station, TX (Diss Abstr. 90-27217).
- [9] Ham, J. M. and Kluitenberg, G. J. (1993): Positional variation in the soil energy balance beneath a row-crop canopy. *Agric. For. Meteorol.*, **63**, 73-92.
- [10] Ham, J. M., Heilman, J. L. and Lascano, R. J. (1991): Soil and canopy energy balances of a row crop at partial cover. *Agron. J.*, **83**, 744-753.
- [11] Horton, R., Aguirre-Luna, O. and Wierenga, P. J. (1984): Soil temperature in a row crop with incomplete surface cover. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **48**, 1225-1232.
- [12] Kler, D. S., Kaur, H. and Singh, S. (1992): Effect of bidirectional sowing and nitrogen on microclimate and yield of Indian rape *Brassica campestris*

- L. variety Tori. *Environment and Ecology*, **10** (2), 282-291.
- [13] Kustas, W. P. (1990): Estimates of evapo-transpiration with a one-and two-layer model of heat transfer over partial canopy cover. *J. Appl. Meteorol.*, **29**, 704-715.
- [14] Lascano, R. J., van Bavel, C. H. M., Hatfield, J. L. and Upchurch, D. R. (1987): Energy and water balance of a sparse crop: Simulated and measured soil and crop evaporation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **51**, 1113-1121.
- [15] Massman, W. J. (1992): A surface energy balance method for partitioning evaporation data into plant and soil components for a surface with partial canopy cover. *Water Resour. Res.*, **28**, 1723-1732.
- [16] Mutsaers, H. J. W. (1980): The effect of row orientation, date and latitude on light absorption by row crops., *J. Agric. Sci. Camb.*, **95**, 211-225.
- [17] Shuttleworth, J. W., and Wallace, J. S. (1985): Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Q. J. Met. Soc.*, **111**, 839-855.
- [18] Walker, G. K. (1983): Measurement of evaporation from soil beneath crop canopies. *Can. J. Soil Sci.*, **63**, 137-141