トウモロコシ植被内の微気候に関する研究*

内島善兵衛**・小林勝次**・伊藤綾子***

(農業技術研究所** 気象科*** 調査科)

Preliminary Report of Studies on Microclimate within a Corn Canopy

Z. UCHIJIMA, K. KOBAYASHI and A. ITÔ

(Div. of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences, Nishigahara, Tokyo)

1. は し が き

作物群落の蒸発散構造と物質生産に関する研究の展開につれて、植被層内の微気象環境は新しい研究の光を浴びるようになってきた。そして、植被層の微気象に関するわれわれの理解は急速にすすみつつあるが、具体的な実験的知識なかでも、微気象形成の主因である純放射・乱流拡散係数・葉面での積分拡散係数ならびに炭酸ガス濃度分布に関する資料はまだ不足しているように思われる。また、実験に関する技術的資料もまだ不十分である。

われわれは植被層内微気象用の測器（純放射計・通風乾湿計・地中熱流計・CO₂-ガス採取器）を自作し、トウモロコシ植被層内の微細気象観測を行ない、上記の目的に対して若干の接近をすることを試みた。この研究はさらに連続して行なわれているが、測器・観測法ならびに予備的な結果をとりあえず報告する。

2. 観 測 場 所

観測は埼玉県北本町にある農事試験場の畑作部の飼料用トウモロコシ畑で、1964年8月19日から22日にかけて行なわれた。トウモロコシの生育は乳熟初期にあつて、穂状花をふくむ植被の平均高さは270cmで、葉面積指数は5.1であつた。観測の期間は天候に十分めぐまれず、解析に耐える十分な数のデータをうる事が出来なかつた。

3. 測器ならびに観測法

植被層内の微細気象環境は群落との相互作用によって明瞭な垂直構造をもっている。それゆえ、植被内で使用する測器は、周辺の微細気象環境を攪乱しないことが必要である。このために、現在市販の測器はその使用の困難な場合が多い。そこで、著者等は植被層内の観測用に小型の純放射計・通風乾湿計などを製作して使用した。つぎにそれらを説明する。

a: 小型純放射計

純放射量の垂直分布を測定するために、小型のポリエチレン被覆の純放射計を製作した。その平面図・断面図が第1図上半分に示されている。Heat transducer (H.T.) としては 0.1×0.7×6 cm のベークライト板に直径 0.1 mm のコンスタンタン線を約 90 回まいて作成した熱電堆 2 つを直列につないだものを用いた。ベークライト板に巻いたコンスタンタン線の半分をミツロウで絶縁し、酸性浴のなかで約 12 時間銅メッキして熱電対を作成した。メッキ終了後十分に水洗してミツロウを除去し、

Fig. 1. Minute net radiometer (top), A: Plane, B: Longitudinal cross section, C: Cross section, Aspirated psychrometer (bottom), A': Plane, B': Cross section, D.B.: Dry and wet bulbs, A.P.: Aluminum plate.

* 昭和 40 年 3 月 5 日農農関東支部大会にて発表

絶縁ならびに保護す目的で透明ラッカーを塗布した。そのあと、ツヤ消黒エナメルにカーボンブラックの粉末を混じたものを両面に充分塗布して熱線吸収能を高めた。これを 2 コ水平に並べて直列につなぎ、縦断面図にみられるように前後の厚手ベークライト板に中央位置にくるよう細い針金で固定した。ベークライト側板を直径 4mm のアルミパイプで連結して作成したフレームに厚さ 0.02mm のポリエチレンフィルム (P.F.) をかぶせて、transducer に対する外部風速の影響を除いた。柄には直径 12mm のアルミパイプを用い、内部には除湿剤としてシリカゲルを充填した。

ポリエチレン被覆の小型純放射計の出力の較正は次式によつて野外条件下で行なつた。

$$k = \frac{Q}{e_0 - e_s} \quad (1)$$

ただし、 k : 小型純放射計の較正常数 ($\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min/mV}$)、 Q : 直達短波放射量 ($\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$)、 $e_0 - e_s$: 小型純放射計を地上約 1m に固定して、transducer を日陰にしない時と日陰にした時の電気出力 (mV) である。 Q は Eppley 日射計の感部を日陰にしたり、さらしたりして測定した。このような方法で求めた ($e_0 - e_s$) と Q との関係の一例が、第 2 図に示されている。図にみられるように、測点のちらばりは室内の検定箱 (たとえば、FRITCHEN, 1963) でえられたそれに比較して若干大きい、大体放射強度と出力との間には直線関係が認められる。(1) 式で計算した k はつぎのようになり、較正

$$k = 0.313 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min/mV}$$

常数は割合に大きく、植被層内での弱い純放射強度の測定にも使用できることがわかつた。外部風速が増大すると transducer 面の熱伝達に影響を与え較正常数の変化が予想されるが、植被層内の風速は、余り強くないので

Fig. 2. Dependence of out-put of net-radiometer on radiation intensity.

(たとえば内島 1963) 無視した。以上のような小型純放射計を 7 コを作成した。

b: 地中熱流計

地面を通つて地中へ伝導する熱量をしるために、熱流計を製作した。0.1×2×8 cm のベークライト板に 0.1 mm 直径のコンスタンタン線を約 130 回まき、上に説明したと同じ方法で銅メッキして熱電対を作成し塗料で絶縁保護して使用した。熱流計の較正は非常に困難なので、便宜的に Beckman & Whitley Inc. の Model ST 201-1 と比較してきめた。なお、熱流計の出力は弱いので、また、平均的 (空間的) な熱流をうる目的で 4 コを 50 cm の間隔で直列につないで、その合計出力を測定した。熱流計は地表下 1 cm の深さに埋設した。

c: 通風乾湿計

接地気層内での気温・空气中湿度の測定には便利な通風乾湿計が考案されているが (例えば谷ほか 1958), 植被層内では風速が弱く十分な通気をするに微気象の垂直構造が破壊されてしまう。最近、BROWN (1964) はトウモロコシ植被内での使用のために著者の一人と協同して小型通風乾湿計を作成している。われわれもほぼこれと同様な通風乾湿計を製作した。作成にあつては、乾湿計への吸入速度が大体 10 cm/sec になるように、またエレメントを洗う空気流は 200 cm/sec 以上で乾湿常数が一定値になるよう留意した。植被下層の空気は大体 10 cm/sec の速度で動いていることが知られているので、これに吸入速度を近似させると乾湿計設置による微気象環境の攪乱をすくなくすることができると判断した。第 1 図下半分に示されているように、二重アルミ円板間を通つて中央にあつめられた空気は中央のアクリル樹脂製の筒を通り、さらにビニールホース (約 25 m) を経て真空掃除器にて圃場外へ排出されてしまう。アクリル筒のなかには 0.3 mm 直径のコンスタンタン線と銅線とで作つた熱電対が固定されていて、一つは乾球として他は脱脂した綿糸をまいて湿球にした。アクリル筒内の風速は大体 270~300 cm/sec となり、所期の目的にかなつた。

以上のような小型通風乾湿計 9 コが作られ、それぞれからの空気は各々 25 m のビニールホースを経て真空掃除器で排気された。また、各乾・湿球からの電気出力は 30 m のコードを経て mV 指示計でよみとられた。

d: CO₂ 測定用空気の採取装置

炭酸ガス濃度測定用のサンプル空気の採取には、通風乾湿計からのビニールホースの途中に三方コックをつけてバイパスを設け、それぞれからの空気を

補助ポンプを用いて直径 30 cm のビーチボールに充填した。一コのボールへの空気の充填には約 50 sec を要し、つぎつぎにコックを切換えて 9 コの乾湿計からの空気が採取された。採取した空気は約 20 分以内に日立-堀場の赤外線ガス分析機にかけて CO_2 濃度を測定した。ビーチボール膜を通してのガス拡散が問題にされているが、ここでは採取後 20 分以内に分析にかけたので、ガス拡散による誤差は小さいと考え無視した。

e: その他の測器

以上の自作測器のほか全短波放射計・反射率計・管形日射計などが所定の位置にセットされ、それらからの出力は電子管式 mV 自記記録計にて記録された。

f: 観測法

上に説明したような各測器の植被層内での配置を模式的に示すと、第 3 図のようになる。通風乾湿計は 260, 240, 225, 200, 170, 130, 80, 10, 5 cm の高さにセットされ、各々は約 25 m のビニールホースを経て真空掃除器に接続された。各熱電対と Reference junctions との間の起電力は高い入力抵抗 ($1.5 \text{ M}\Omega$ 以上) をもつ μV -mV 指示計で測定された。小型純放射計は 260, 205, 145, 90, 45 cm の各高さにセットされた。その出力は 30 m のケーブルを経て μV -mV 指示計で測定された。この他に、0.1 mm の銅・コンスタンタン熱電対を葉の裏面に小さなセロテープで接着し、気温と葉温との差を測定した。葉温の測定高度はつぎの通りである：230, 200, 199, 177, 150, 138, 120, 105, 60, 45 cm。また 0.4 mm の熱電対をトウモロコシの茎に挿入し、茎温の高度分布 (230, 190, 160, 120, 90, 50, 15 cm) が測定された。

以上のような測器配置を用いて、1964 年 8 月 19 日から 22 日にかけて大体朝 5 時から夜 12 時まで 1 時間間隔で 10 分間観測が続けられた。10 分間の間に乾・湿

Fig. 3. Schematic diagram of instrumentation within a corn canopy. N.R.: Net radiometer, A.P.: Aspirated psychrometer, P: Vacuum pump, B: Beach ball, H.P.: Heat plate, I: μV -indicator.

球温度、純放射量、葉温、茎温が 3 回よみとられ平均された。

気象環境の測定に平行してトウモロコシ植被の葉面積密度 $F(z)$ の測定を行なった。 $F(z)$ の測定には軌跡法を用いた。群落内から任意的に、数本の標本をえらび出し、生育しているままで、各葉ごとに、葉の位置の座標 (高さ、茎からの距離) を求め、つぎに、葉の全長と 10 cm おきの葉の幅を測定する。これらの資料から平均的な葉の分布・形の軌跡を図上にえがき、これを 50 cm ごとに層別して葉面積密度の分布型が求められた。

4. 観測結果

上に説明したように 19 日を除いて観測期間中断的な雨があつて、詳細な解析に与える十分な資料をうることはできなかった。そこで、本報告では観測結果の概略と予備的な解析からえられた二、三の結果を説明するに止めておく。なお、葉温と気温との差に関する資料を用いての植被層内での葉面積密度係数の評価については現在計算中なので、ここではふれないことにする。

a: 植被層内における気温・空中湿度の分布

比較的の天候のよかつた 8 月 19 日から 20 日にかけての植被層内での気温・空中湿度の垂直分布の変化が第 4 図に示されている。上半分にみられるように、植被密度の大きな 200 cm の附近に高温域が形成されていて、熱源として作用していることがよくわかる。植被上の純放射強度が急減した 16 時すぎには殆んど中立的な温度分布

Fig. 4. Vertical profiles for air temperature (top) and water vapor pressure (bottom) within a corn canopy.

が形成されている。夜間には、昼間の高温域よりやや高い層に低温域が形成されている。そして、熱が気層と植被下層からこの低温域に流入していることがわかる。20日7時10分には再び中立的な温度分布にかえっていた。

空中湿度は日中は植被下層ほど高く、水蒸気が下層から上層さらに接地気層内に流れていることがわかる。14時20分に、植被上層に強い空中湿度の傾度が形成されている。このような傾度も純放射が弱まると消失してしまつて、16時以降には逆に植被上層から植被層への水蒸気流を示す垂直傾度が形成されている。夜間には植被中層にむけて上下から水蒸気が流入していて、そこで露が形成されていることがわかる。以上のような気温・空中湿度のプロファイルの特徴は、絶対値の違いはあるが、BROWN (1964) のそれとよく一致している。

b: 純放射の分布

植被内の純放射の決定には日陰で測定した純放射に、植被層内の任意高さでの直達短波放射量を加える方法があるが、ここでは小型純放射計の測定値をそのまま使用した。同じく8月19日から20日にかけての観測結果が第5図に示されている。上半分には垂直分布の時間的変化が葉面積密度分布と一緒に示されている。図からわかるように、純放射の減衰は150 cm以上の植被上層で著しく、それより下層ではゆるやかである。その模様は

Fig. 5. Vertical profile for net radiation (top) and diurnal variation in net radiation (bottom) within a corn canopy.

植被内4高度での純放射量の日変化を示している下半分に明瞭に示されている。日中は植被上面の純放射は1.1 ly/min という高い値であつたが、植被下層では約1/10の値に終始していた。夜間には、下層の純放射は植被の保護のために余り大きな負の値にならず、放射熱損失はわずかである。このように、純放射日変化の振幅は植被内に入るにつれて急減している。この模様はつぎのような指数法則に従うことがわかつた。

$$\Delta S(z) = \Delta S_H e^{-2.7(1-z/H)} \quad z \leq H$$

ここで、 $\Delta S(z)$ と ΔS_H は植被内の高さ z と植被上面 (H) における純放射日変化の振幅である。

c: 炭酸ガス濃度分布

野外条件下にある作物群落の光合成が問題にされるようになってきたが、群落内の炭酸ガス濃度分布がどのような特徴をもっているかは、まだ殆んど明らかにされていない。農技研生理第2科の好意によつてCO₂-Analyserを使用することができたので、トウモロコシ植被内の炭酸ガス濃度分布を測定した。その結果が第6図に示されている。余り良好な天候ではなく小雨に見舞われることが多かつた。

Fig. 6. Vertical profile for CO₂-concentration within a corn canopy.

朝6時30分には植被の呼吸作用のための炭酸ガスが蓄積され360 PPM という高い値に、とくに地面近くでは380 PPM 近く達している。日射が強くなつて光合成が旺んになると、植被内の炭酸ガスは急激に消費されて通常の300 PPM 近くに低下する。そして、日中には最低濃度部が200 cmの層附近に形成され、炭酸ガスが接地気層と地面から供給されていることがわかる。夜間1920に植被下層に最低濃度部が形成されて、あたかも炭酸ガスがこの層に流入しているようにみえる。この時は小雨が降つていたので、雨水へのCO₂の吸収、または雨水からの放出などが考えられるが、この特異的な垂直分布の原因を明らかにすることはできなかった。

d: 植被層内における各フラックスの形成

著者の一人がすでに指摘したように、植被層内のフラックスはつぎのように拡散係数と垂直傾度の積として近似することができる：

$$F = -K \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad Q_F = \frac{\partial}{\partial z} \left(-K \frac{\partial \psi}{\partial z} \right),$$

ただし、 F と Q_F は対象としている量のフラックスと湧源強度、 ψ は対象とする量の密度、 K は垂直乱流拡散係数。 K の評価のために熱収支法（内島、1962）が使用された。拡散係数の植被内での減衰は近似的に $K_z = K_H \exp[-m(1-z/H)]$ で近似され、 m の値は 3~4 の間にあることがわかった。これは他の実験結果とよく一致している。

熱収支法で求めた拡散係数と図上で読とつた垂直傾度を用いて評価したフラックスと、湧源強度の分布の一例が第7図に示されている。上半分には顕・潜熱フラックスと Bowen 比の高度分布が示されている。100 cm 以下では両フラックスとも余り変化しないが植被上層で急増し、200 cm 以上の層内に強い湧源のあることがわかる。Bowen 比は下層から上層へと次第に増加して、他の実験結果とよく一致している。下半分には炭酸ガスフラックスとその湧・吸源強度（光合成と呼吸に対応する）の分布が示されている。植被上面から内へ入ると共に下向きの炭酸ガスフラックスは急激に減少し、炭酸ガスが活発に葉に吸収されていることがわかる。190cm 位の高度でフラックスの方向は上向きに変わる。それより下層では上向フラックスは次第に減少している。フラックス分布を図式微分することで光合成・呼吸強度の分布を求めた。植被上層（150~260 cm）では光合成で、それより下層では呼吸になつている。これは大体 150 cm の高さが補償点に相当することを示している。このような結果は群落構造と光合成との関係を明らかにするうえで大切であり、また光合成の半経験的理論の検討に有効である。しかし、観測資料が不十分なために比較検討は今後にゆずる。

5. 要 約

植物群落の蒸発散構造ならびに物質生産を農業気象学的に明らかにするために、まず植被微気象観測用の測器が作成された。そして、トウモロコシ植被内で、観測が

Fig. 7. Vertical profiles for sensible and latent heat fluxes (top) and CO_2 -flux (bottom) within a corn canopy.

なされ、若干の予備的解析がなされた。その結果、上に説明した方法は植被の蒸発散構造などの研究に極めて有効なことがわかった。今後さらに観測を続けて理論的スキームとの比較を進める予定である。本研究を遂行するにあたって色々な指導と便宜を与えられた井上栄一・小沢行雄の両博士ならびに実験にあたって援助を与えられた宇田川・小島・堀部の各枝官に厚く感謝する。

参考文献

- 1) BROWN, K. W. (1964) Cornell University (Thesis).
- 2) FRITCHEN, Leo. J. (1963) Jour. Applied Meteor., 2, 165~172.
- 3) 谷・井上・今井 (1958) 農業気象, 13, 143~146.
- 4) 内島善兵衛 (1962) 農業気象, 18, 1-9.
- 5) UCHIJIMA, Z. (1963) Bull. of NIAS, A, 11, 19~66.
- 6) UCHIJIMA, Z. (1966) Bull. of NIAS, A, 13.

Summary

This paper describes preliminary results on the build-up mechanism of physical quantities within a corn plant canopy. Small polyethylene covered net radiometers were constructed and used to measure the height distribution of net radiation. Miniature aspirated psychrometers were also constructed and used to collect data on the air temperature and water vapor pressure profiles within the canopy. Sample air from nine levels within the canopy was collected into beach balls using a pump system (see Fig. 3). CO_2 concentration in sample air was determined with an infra-red gas analyser. The energy

balance approach was utilized to evaluate the fluxes of sensible heat, latent heat and carbon dioxide by layers within the canopy. The results so obtained are presented in Figs. 4, 5, 6 and 7.

新刊紹介

Frostschutz in Pflanzenbau (Bd. I. 1963), FRITZ SCHNELLE, 488 S. BLV-Verlagsgesellschaft, München-Basel-Wien, DM 112,-(11760 円)

この本を編著している F. Schnelle は、ドイツ連邦きつての霜の大家、殊に霜の植物に与える影響についての権威者であり、特に霜害予報及び作物栽培上利用価値の高い気象データを提供するので有名になった西ドイツ農業気象業務の元締である中央気象台の農業気象課長という職責にある。彼がここ八年間、連絡会議や国際会議で講演したもの以外、学問的な論文を発表することなしに、すべての時間とエネルギーを、この本の完成のために費いやしただけあつて、まだ第一巻の基礎理論篇だけしか出版されていないが、分野が霜に限定されたため、狭く深く掘り下げることができ、内容の学問的水準が非常に高くなっている。この本に収録、引用された文献も又非常に多く、30 近い日本人の文献を含めて約 800 にも達している。これは、霜に関することならどんな小さな、部分的問題でも、現時点で最高の学問的水準と最新の知識を導入し、今後古い論文を一々参照する手間をはぶき、この本を典拠とすることが可能なようにという編著者の意図によるものである。

この本が企画された直接の理由は、O. W. KESSLER と W. KAEMPFERT の二人により、ドイツ帝国気象台学術論文として発表された「霜害防止」(“Frostschadenverhütung”, Wissenschaftliche Abh. f. westerdienst 6, No. 2) という非常に実際の役にたつた本の内容が、研究の進歩とその後何度か襲つた大霜害の経験とを通じ、学問的にも又技術的にも古くなつたので、これを補うということであつた。この間の進歩は非常に大きく、専門の細分化もあつたしするので、執筆を H. AICHELE, A. BAUMGARTNER, H. BURCKHARDT, M. SCHNEIDER 及び F. SCHNELLE の五人で分担しているが、各人が、この 20 年間の進歩に、それぞれの分野で大きな業績を残した当事者である所に特長がある。しかも執筆に当つての内容の分担と原稿の通読と討論による重複箇所の削除が理想的に行なわれ、無駄やゆるみのない、一人の著者により書かれたような一貫性のある書物になつてい

第一巻は、第一篇と第二篇に分けられていて、第一篇

では、降霜現象の解析、霜の与える危害、霜害予報の問題を中心とし、第二篇では、霜が植物に与える影響を論述している。

第一篇は七章から成りたつていて、第一章では、中央気象台の SCHNELLE の課で働いている SCHNEIDER が、霜の概念と分類というテーマで、霜の種々の発生原因と発生状態について、明確な定義づけを行つている。第二章を執筆したのは、同じく SCHNELLE の部下で、その後継者と目されている BURCKHARDT で、夜間、霜が降りるための気象上の前提条件を、天気型に分けて詳しく述べている。第三章及び第四章は、霜の理論的物理的問題の中心となるもので、いずれも、気象庁から、ミュンヘン大学附属の、昔ガイガーが所長をしていたバイエルン州立林学確究施設気象学研究所へ戻つた BAUMGARTNER が執筆している。第三章では、土壌及び植被内の熱の移動をエネルギー収支式の各項目別に、物理的に詳しく取扱つてあり、第四章では、冷気の移動に与える地形の影響を実例に従つて解説してある。この両章は、ガイガー流のエネルギー収支の考え方を基盤とし、エネルギーの各形態、放射エネルギー、地中の熱移動、土壌と空気、植物と空気との熱交換、水の状態変化に伴う熱の出入り、植物の生存に伴う熱等について詳しく述べてある。第五章では、再び BURCKHARDT が、前章までに展開された知識や理論を駆使し、小気候の見地から、霜害危険度の推定図を描く方法を述べている。更に、この章に対する特別付録として、巻末にドイツ気象庁の各出先機関のための霜害危険地判定地図作製実施要項は、日本でも相当の利用価値があると思われる。第六章は、BURCKHARDT と SCHNEIDER による一般気象観測データを基にした霜害発生頻度を取扱つている。第七章は、SCHNEIDER による霜の予報を取扱つている。第二篇は三章から成り立っていて、植物に与える霜の影響を、生態学的見地から解明したり、霜害の各種形態を分類したり、霜に対する植物の抵抗力の問題にまで筆をのばしているのが、編著者 SCHNELLE である。この部分は、彼の学問研究の集大成といえよう。(上村賢治)