2 次のクロージャーモデルを用いたソルゴー群落内外の 乱流特性に関する研究

辻 多聞*・早川誠而**・神近牧男***・大槻恭一****・高山 成*

(* 鳥取大学大学院連合農学研究科
** 山口大学農学部
*** 鳥取大学乾燥地研究センター
**** 九州大学演習林)

The Properties of Turbulence in and above a Sorghum Canopy with 2nd Order Closure Model

Tamon TSUJII*, Seiji HAYAKAWA**, Makio KAMICHIKA***, Kyoichi OTSUKI****
and Naru TAKAYAMA*

(* The United Graduate School of Agricultural Science, Tottori University, Tottori, 680-0945 Japan
** Faculty of Agriculture, Yamaguchi University, Yamaguchi, 753-8501 Japan
*** Arid Land Research Center, Tottori University, Tottori, 680-0001 Japan
**** Research Institute of Kyushu University Forests, Fukuoka, 811-2415 Japan)

Abstract

Most meteorologists have reported that higher order closure models are better than the K-theory model for estimation of environment in the canopy, but solving a higher order closure model requires boundary conditions for turbulence, which is measured directly by a sonic anemometer. However, sonic anemometers are expensive so few scientists in agriculture use high order closure models. In the present research, estimation of the wind profile in and above a sorghum canopy was carried out by use of a 2nd order closure model with mean wind velocity at a single height above the canopy. Comparison between the observed and calculated profiles indicated that the former was well represented by the latter in general. This indicates that the present calculation scheme can be used for estimation of wind profiles in the canopy without observation of the turbulence. It revealed that most large scale turbulence was generated at the upper part of a sorghum canopy during the heading stage, and that measuring the plant area density should be a more important canopy meteorological observation than the leaf area index during the heading stage, since the non-leaf portion of plant area is not negligible.

Key words: K-theory model, Plant area density, Turbulence, 2nd order closure model.

キーワード: 拡散係数モデル, 植物体面積密度, 乱流, 2 次のクロージャーモデル

1. はじめに

群落内の風速や温湿度などが作物の生育に直接的に関係するため, 群落内の物理量の輸送に関する研究は, 農業気象学的に非常に重要であり, 一つの大きな研究テーマである。これまでの研究例として, 例えば内嶋と井上

(1970) は, 拡散係数を用いて群落内 CO_2 環境をシミュレートしている。こうした研究にみられるように, 気象要素や物質輸送のシミュレーションを行うときは拡散係数理論を用いるのが一般的である。しかし, 一方で Wilson and Shaw (1977) の緒言に示されるように, 拡散係数理論より高次クロージャーモデルのほうが群落内環境を明らかにするのに優れていることが報告されている。近年コンピュータの性能が飛躍的に進歩し, 家庭

用のパーソナルコンピュータでも十分高次クロージャーモデルによる数値解法が可能になった。しかし、この手法を用いる場合には、境界条件として乱流速度や運動量フラックスなどといった乱流量を代入しなければならない。結果として超音波風速計などのような高価な観測測器による測定が、群落内環境の推定には必要という新たな問題が生じる。今日までの農学分野において、高次クロージャーモデルを用いた研究例が少ないのはそのためと思われる。

そこで本研究では、2次のクロージャーモデルに、これまでに報告されている群落上の乱流特性の測定値を当てはめ、群落上のただ一点の平均風速値から群落内外の風速を推定することを試みた。また高次クロージャーモデルによる最大の利点である乱流解析を行い、出穂後のソルゴー群落内の乱流特性に関する考察も併せて行った。

2. 観測方法

2.1 風速の測定

1999年9月13日(晴天日)、鳥取大学乾燥地研究センター内における砂地上のソルゴー群落(56m×37m, 平均草丈1.6m, 約3.8株/m²)において、高度3.0, 1.3, 1.0, 0.7, 0.4mの風速を測定した。風速の測定には、高度3.0mではYoung社製、それ以外の高度では(株)牧野応用測器研究所製の光電式微風速計を用いた。また、データの収録にはSOLACⅢおよびSOLACⅤ(英弘精機(株)製)を用い、10秒間隔で風速を測定し、その10分間平均値を出力させた。

2.2 植物体面積密度の測定

本研究における植物体面積(Plant Area)とは、植物体の総表面面積を0.5倍したものである。本研究では、平均的と思われる草丈の植物個体を1株選出し、生育状態のまま頂部より0.1mずつ刈り取り(穂の部位は高さごとの分解を行わず、全体を刈り取った)、高度ごとに、葉、葉軸、穂の3種類に分別した。葉については、A4サイズの白紙に葉を張り付け、その複写物をスキャナーにより72dpiの解像度で読み取り、2値化処理(白と黒に分類)を施した後、黒のピクセル数を数えることで、その面積を算出した。葉軸に関しては、上端と下端の直径をノギスで測定し、葉軸をその両者の平均直径の円柱とみなして面積を算出し、0.5を乗じた。穂は互いに空間なく密接していた。そこで本研究では、穂の最大直径をノギスで測定し、穂を2つの円錐の底面を重ねた物体とみなして面積を推定し、その面積に0.5を乗じた。

得られた高度ごとの植物体面積に作付け株数を乗じ、さらに作付面積に0.1mを乗じたもので除することで、

Fig. 1. Plant area density profile in the sorghum canopy; model value (solid line), measured value (circles).

高度ごとの植物体面積密度を計算した。こうして得られた値を用いて5次関数で近似を行った群落の植物体面積密度の鉛直モデルをFig. 1に示す。ここで、黒丸は実測値、実線は近似によって得られたモデルを意味する。モデルとして用いた関数式と実測値との相関は余り良くなかった。これは、5次関数で近似を行ったためと考えられる。

3. 2次のクロージャーモデル

3.1 支配方程式

Wilson and Shaw (1977)と同様の座標系、仮定、およびパラメタライズを用いると、平坦場における一様定常場での2次のクロージャーモデルに関する支配方程式は以下ようになる。

$$0 = -\frac{d\bar{u}'w'}{dz} - C_d A \bar{u}^2 \quad (1)$$

$$0 = -\bar{w}'w' \frac{d\bar{u}}{dz} + 2 \frac{d}{dz} \left(q \lambda_1 \frac{d\bar{u}'w'}{dz} \right) - \frac{q}{3 \lambda_2} \bar{u}'w' + C_q^2 \frac{d\bar{u}}{dz} \quad (2)$$

$$0 = -2\bar{u}'w' \frac{d\bar{u}}{dz} + \frac{d}{dz} \left(q \lambda_1 \frac{d\bar{u}'u'}{dz} \right) + 2 C_d A \bar{u}^3 - \frac{q}{3 \lambda_2} \left(\bar{u}'u' - \frac{q^2}{3} \right) - \frac{2}{3} \frac{q^3}{\lambda_3} \quad (3)$$

$$0 = \frac{d}{dz} \left(q \lambda_1 \frac{d\bar{v}'v'}{dz} \right) - \frac{q}{3 \lambda_2} \left(\bar{v}'v' - \frac{q^2}{3} \right) - \frac{2}{3} \frac{q^3}{\lambda_3} \quad (4)$$

$$0 = 3 \frac{d}{dz} \left(q \lambda_1 \frac{d\overline{w'w'}}{dz} \right) - \frac{q}{3\lambda_2} \left(\overline{w'w'} - \frac{q^2}{3} \right) - \frac{2}{3} \frac{q^3}{\lambda_3} \quad (5)$$

ここで, u, v, w : 主風向, 主風向と直交する水平成分および鉛直成分, q : 乱流速度, A : 植物体面積密度を表し, プライムは平均からの偏差, オーバーバーは平均を意味する。また C は経験定数であり, 本研究では 0.077 を用いた。 C_d は抵抗係数を意味する。この係数は物体の形と風速に依存するものである。Wilson and Shaw (1977) はトウモロコシ群落において観測を行い, モデルと観測結果が最も一致する値として 0.2 を用いている。ソルゴーの形態はトウモロコシに酷似していることから, 本研究ではその値を用いた。 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ はそれぞれ長さスケールを表し, 以下の式より求めた。

$$\lambda_1 = \delta_1 l, \lambda_2 = \delta_2 l, \lambda_3 = \delta_3 l \quad (6)$$

ここで, $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ は定数であり, 本研究では, $\delta_1 = 0.39$, $\delta_2 = 0.85$, $\delta_3 = 16.6$ をそれぞれ用いた。先の経験定数 C や定数 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ の値は Wilson and Shaw (1977) で用いられたものと同様の値であり, コンスタントストレス層および風速の鉛直傾度が摩擦速度を混合距離で除したものになると仮定して, 後述の上層境界条件より得られた値である。また混合距離を意味する l の算出は以下の式を用いた。

$$l = 0 \quad (\text{高度 } 0.0 \text{ m において}) \quad (7)$$

$$\left| \frac{dl}{dz} \right| \leq k \quad (8)$$

$$l \leq \frac{\alpha}{C_d A} \quad (0.00 \text{ m} \leq z \leq 1.60 \text{ m}) \quad (9)$$

ここで, k はカルマン定数 (=0.4) であり, また α は実験によって決定される定数である。本来 α は群落内の風速の観測結果より算出するものであるが, 本研究では, Wilson and Shaw (1977) が用いたものと同様の 0.06 を与えた。

上記の支配方程式における未知数は $\overline{u}, \overline{u'u'}, \overline{v'v'}, \overline{w'w'}, \overline{u'w'}$ の 5 つである。よって (1)~(5) 式の方程式群に境界条件を与え, 差分近似法により積分すると, 群落内外の各高度における平均風速および各乱流量を算出することが可能である。本研究では刻み幅を 0.05 m としてシミュレーションを行った。

3.2 境界条件

本来, 上記の支配方程式を解くための境界条件としては, $\overline{u'u'}, \overline{v'v'}, \overline{w'w'}, \overline{u'w'}$ といった乱流量を代入しなければならない。この値を得るためには超音波風速計による観測が必要不可欠である。しかしながら, この測器は大変高価なものであり, 誰しものが乱流の観測を行うこと

はできない。そこで, 本研究では, 過去の報告例である Wilson and Shaw (1977) の値をそのまま用いることにした。すなわち用いられた境界条件は以下のとおりである。

- 高度 3.2 m (群落高度の 2 倍) において

$$\overline{u'w'}/u_*^2 = -1$$

$$\overline{u'u'}/u_*^2 = 3.5$$

$$\overline{v'v'}/u_*^2 = \overline{w'w'}/u_*^2 = 1.5$$

- 高度 0.0 m (地表面) において

$$\overline{u}/u_* = 0$$

$$\overline{u'w'}/u_*^2 = - \left[\frac{kU_2/u_*}{\ln(Z_2/z_0)} \right]^2$$

$$\overline{u'u'}/\overline{u'w'} = -3.5$$

$$\overline{v'v'}/\overline{u'w'} = \overline{w'w'}/\overline{u'w'} = -1.5$$

ここで, U_2 は高度 Z_2 (0.05 m) での風速であり, z_0 は砂表面に対する粗度長であり, 本研究では 0.001 m を用いた。上記の通り境界条件は, 群落上における摩擦速度 u_* で無次元化されており, 得られる平均風速および各乱流量の鉛直分布はすべて無次元値となる。

4. 結果および考察

4.1 地面修正量と粗度長

Kimura *et al.* (1999) や Maki (1976) などでも報告されているように, 地面修正量や粗度長は風速に依存するものである。しかし, 風速の変化に伴い, 刻一刻と変化する地面修正量や粗度長を正確に求めることは非常に困難である。仮にこれに関する測定を行うとするならば, 中立時に群落上の数高度において平均風速を測定しなければならない。しかし, 日本のように複雑地形が入り組み, 十分な広さの一様平坦場が得にくいところでは, 群落上における風上吹走距離 (フェッチ) が短いために, その境界層内の平均風速の鉛直分布を測定することが困難となる。さらに, 安定時や不安定時になると, 風速の鉛直分布に関しては, 対数+1 次項分布を考慮しなければならない。結果的に風速の鉛直分布の観測によって地面修正量や粗度長を算出する方法は, 変化に富んだ観測現場において, あまり有効な手段とは考えられない。そこで本研究では, 地面修正量および粗度長は, 前述の条件, すなわち Wilson and Shaw (1977) の境界条件や経験定数, および観測された植物体面積密度の鉛直分布とその植物に関する抵抗係数によって一義的に決定される定数と考えた。

上記に示された 2 次のクロージャーモデルに境界条件および植物体面積密度の鉛直分布を代入すると, 群落を含む各高度の平均風速が得られる。こうして得られた各高度の平均風速のうち, 群落上 (高度 1.6 m より上

方)の値だけを抽出する。本研究に用いられた方程式群には浮力に関する項が含まれていない。すなわち計算によって得られる平均風速は中立状態に関するものとなる。よって、群落上の風速分布の計算結果が対数則に従うと仮定して、Trial And Error 法により地面修正量と粗度長を算出した。その結果得られた地面修正量は 0.62 m であり、また粗度長は 0.21 m であった。農業気象用語解説集 (1986 年版) によると、これまでの観測結果より得られている地面修正量および粗度長は、それぞれ群落高度の 0.6~0.8 倍、0.03~0.19 倍とされている。計算結果は粗度長に関してはこの範囲内にあったが、地面修正量に関してはやや小さいものとなった。観測されたソルゴー群落は登熟期であり、群落高の上部約 25% は葉の存在しない群落であったことから、群落上部における平均風速に関しては植物による抵抗の影響を大きく受けなかったと考えられる。結果として、地面修正量が過去の観測例と比較して、やや小さくなったのであろう。

Kimura *et al.* (1999) の報告において、植生の状態を表す指標としては、基本的に草丈と葉面積指数だけしか用いていない。しかし同様の植物であってもその生育状態や発育段階によって、葉軸が太くなりその面積が無視できなったり、構成要素 (出穂など) が異なったりするはずである。また植物の形によって抵抗係数は異なってくる。このことは Kimura *et al.* (1999) がその論文内で示唆している。本研究による地面修正量および粗度長の算出法には、各高度における植物の総表面面積を考慮した植物体面積密度の鉛直分布と抵抗係数が考慮されているので、植生状態の影響を十分考慮したモデルによる計算結果になっていると思われる。

この地面修正量および粗度長の算出に関する方法は、風速の依存性を無視しているものの植生の状態を十分に考慮している。加えて、風速の測定と比較して、植物体面積密度の鉛直分布の測定は容易である。また 2 次のクロージャーモデルの解法は現在の家庭用のコンピューターで十分行うことができる。これらの条件から、この算出法は、非常に現実的かつ簡単であり、農業気象学的有効性は高いものと思われる。

4.2 計算値と実測値の比較

先に求めた地面修正量および粗度長を用いると、群落上における 1 地点の平均風速より群落上の摩擦速度を求めることができる。観測地であるソルゴー群落のフェッチから考えると、群落による境界層は群落上約 30 cm までの高さで形成されると考えられる。これより摩擦速度の算出に用いられる平均風速は、境界層内の値を用いるべきである。高度 2.0 m に設置された測器は起動風速

Fig. 2. Diurnal variation of dimensionless difference between calculated value and observed value at each observed height; bold solid line (1.3 m), bold dashed line (1.0 m), thin solid line (0.7 m) and thin dashed line (0.4 m).

以下となる時間が多くあったため、かなり強引ではあるが、高度 3.0 m で観測された平均風速の値から摩擦速度を算出することにした。解析に用いた平均風速のデータの時間帯としては、風が強くなる正午から日没前の 17 時までを対象とした。17 時以降から日没時までは風がかなり弱くなり (高度 3.0 m での風速の表示値が 0.5 m/s 程度)、用いた測器の測定誤差が大きいと考えられるため解析には用いなかった。

2 次のクロージャーモデルによるシミュレーションから得られる平均風速は、境界条件からわかるように摩擦速度で無次元化された値である。そこで、群落内で観測された平均風速を、高度 3.0 m での平均風速から算出した摩擦速度で除することによって無次元化し、この値を用いて算出された計算値と実測値との対応を調べた。Fig. 2 は、実測値から計算値を引いた値についての各高度ごとの時間変化を示す。ここで、太い実線は 1.3 m、太い点線は 1.0 m、細い実線は 0.7 m、細い点線は 0.4 m についての値を示す。全高度において大きな変動はなく、推定に関して時間帯の影響はそれほど受けていないと思われる。

Table 1 は各高度における観測値から計算値を引いた値に対する信頼係数 95% の信頼区間の推定した結果である。表より高度 1.3 m および 1.0 m では観測値が実測値を 0.5 程度上回る傾向となっている。一方で高度 0.7 m や 0.4 m の群落下層部では無次元値で約 0.2 以下であり、計算値と観測値との間の差が小さい。これは群落

Table 1 The estimated intervals for mean value of difference normalized by friction velocity between observed wind values and calculated for each height by confidential coefficient 95%.

Height (m)	Estimated interval
1.3	0.49~0.62
1.0	0.46~0.57
0.7	0.12~0.22
0.4	-0.12~0.00

Table 2 The estimated 95% confidence intervals for mean value of the difference between observed and calculated wind values for each height.

Height (m)	Estimated interval (m/s)
1.3	0.16~0.23
1.0	0.15~0.21
0.7	0.04~0.08
0.4	-0.04~0

下部での風速が基本的に小さくなるために、計算による誤差が発生しにくいためである。すなわち十分な推定が行えたかという評価は群落上部（本研究では高度 1.3 m と 1.0 m）の推定誤差から判断するほうが妥当と思われる。

高度 3.0 m での平均風速より得られた摩擦速度の信頼係数 95% の信頼区間は 0.33~0.37 m/s であった。この値を Table 1 の各値に乘じ、各高度における観測値と実測値との間の誤差を示したのが Table 2 である。この表より、観測期間中、高度 1.3 m と 1.0 m では 0.2 m/s 程度の推定誤差が現れると考えられる。摩擦速度の算出には群落境界層よりかなり上の高度 3.0 m の平均風速値を用いたが、群落上部においても大きな推定誤差は生じなかった。群落による境界層内の平均風速値を用いて推定を行えば、群落内の平均風速推定精度はさらに向上すると思われる。また本シミュレーションの式、および摩擦速度の算出に用いた式には熱フラックスに関する項を考慮しておらず、これを含んだ式を用いればさらに観測値と実測値は一致するものと思われる。今後、熱的安定性を考慮した推定法を確立することによって、本研究対象とした日中のみならず、一日を通して群落外の平均風速から群落内の平均風速を推定することが可能となるであろう。

Fig. 3 は 13 時での風速の鉛直分布であり、実線は計算値、黒丸は実測値を示している。前述のように、様々

Fig. 3. Mean wind profile in and above the sorghum canopy; calculated value (solid line), observed value (circle).

Fig. 4. Computed profile of dimensionless covariance of axis along direction of mean wind, $\overline{u'u'}$ (solid line), axis perpendicular to mean wind direction, $\overline{v'v'}$ (dashed line), and vertical direction, $\overline{w'w'}$ (chained line).

な仮定や、観測における種々の問題を含んでいるにもかかわらず、図のように計算結果と実測は大体対応しており、2次のクロージャーモデルは群落内外の風環境の推定に対して非常に有効な手法であることがわかる。

4.3 乱流運動エネルギー

Fig. 4 は計算結果より得られた風速の三成分に関する共分散の鉛直分布を示す。ここで、実線は主風向に沿った成分、点線は主風向に対して水平的に直角に交わ

る成分、一点鎖線は鉛直方向に関する成分である。実線を見ると、群落頂部で値は最大となり、群落が乱れを強めていることがわかる。また群落内部に進行するにしたがって、乱れは減少していくこともわかる。本グラフにおいて特徴的な点は、三者ともにその垂直分布の形が似通っていることである。群落頂部から高度約 0.7 m 付近までの間では、乱れの鉛直傾度が高度の上昇に伴って減少し、高度 0.7 m より下部ではそれが増加する傾向にある。これは、高度 0.7 m 付近において乱れの鉛直傾度が最大となることを意味し、この付近では乱れの輸送量が大きくなっていることが予想される。また高度 0.2 m 付近に微妙なふくらみが生じている。

乱流速の 2 乗の局所的時間変化に関する式は、本研究で用いられたパラメタライズを用いて、以下のように表すことができる。

$$\frac{dq}{dt} = \left\{ \frac{d}{dz} \left(q \lambda_1 \frac{dq}{dz} \right) + 2 \frac{d}{dz} \left(q \lambda_1 \frac{dw'w'}{dz} \right) \right\} - 2 \frac{q^3}{\lambda_3} - 2 \bar{u}w' \frac{d\bar{u}}{dz} + 2 C_d A \bar{u}^3 \quad (10)$$

本研究では定常場を仮定しているので、上式の左辺は 0 となる。この式における右辺の各項の寄与を調べることににより、乱流の生成構造に関して理解することが容易となる。Fig. 5 は乱流の生成を構成する要素の鉛直分布を示しており、(a) は乱流輸送 ((10) 式右辺第 1 項)、(b) は粘性消散 ((10) 式右辺第 2 項)、(c) はシャー生成 ((10) 式右辺第 3 項)、(d) はウェイク生成 ((10) 式右辺第 4 項) をそれぞれ表している。群落の頂部付近ではシャー生成やウェイク生成による乱流の生成率が大きく、また輸送量も最大であることから、頂部付近で乱流が最大となることが予想される。群落の中央よりやや上の高度約 1.0 m 付近において乱流輸送は 0 軸と交わり、それより上では負の寄与に、それより下では正の寄与を示している。すなわち群落内の乱流は高度約 1.0 m より上方で生成されていることとなる。この 1.0 m の高度より上方では、穂と軸が主要な面積を占めており、これらの部位によって発生した乱流エネルギーが群落内に輸送されていることがわかる。群落内外の微気象の観測において、群落の植生状態を示す指標として、よく葉面積または葉面積指数が用いられる。しかし本観測例のように、穂や葉軸が無視できない表面積をとるときは、植物体面積が植生状態を示す指標として用いられるべきだと思われる。高度約 0.7 m あたりでは、前述の推測どおり乱流の輸送量が最大となっていることがわかる。これは、高度 0.7 m 付近での乱流損失量が最大となることで引き起こされたと考えられる。高度 0.1 m から 0.3 m にかけてはシャーによる生成はほとんどみられず、輸送お

Fig. 5. Computed profile of dimensionless components of local rate of change of (twice) the turbulence kinetic energy in and above the sorghum canopy: (a) turbulence transport, (b) viscous dissipation, (c) shear production and (d) wake production.

よび消散に関する鉛直変化がほとんどない。一方でウェイクによる生成がややみられる。Fig. 4 にみられた高度 0.2 m 付近の微妙なふくらみはこのウェイクによる乱流の生成に起因するものと考えられる。

4.4 運動量フラックス

無次元化した運動量フラックスにマイナスを乗じた計算結果の鉛直分布を Fig. 6 に示す。運動量フラックスは群落内へ進行するにつれて、だんだん小さくなっていくことがこの図よりわかる。小さくなる傾向は逆 S 字曲線を描き、高度約 0.8 m あたりで鉛直傾度が最大となり、それより上部では鉛直傾度は高度とともに減少し、高度約 0.8 m より下部では、高度とともに増加の傾向をとっている。

さらに運動量フラックスの生成に関する考察を深めるために、乱流運動エネルギーの節と同様、運動量フラックスに関する式の各項の寄与を求めた。Fig. 7 は運動量フラックスの各項の鉛直分布を示し、実線は輸送 ((2) 式右辺第 2 項)、点線はエネルギーの再分配 ((2) 式右辺第 3 および 4 項)、一点鎖線はシャー生成 ((2) 式右辺第 1 項) を表している。群落頂部では、シャー生成およびエネルギーの再分配は極大値を示し、それより下方では、それぞれなだらかに 0 に向かって推移している。群落頂部では無次元運動量フラックスは -1 になるので、群落

Fig. 6. Computed profile of dimensionless momentum flux multiplied by -1 .

Fig. 7. Computed profile of dimensionless components of local rate of change of momentum flux in and above the sorghum canopy; turbulence transport (solid line), pressure-velocity gradient correlation (dashed line), and shear production (chained line).

内部に進行するにつれて運動量フラックスが小さくなるということがわかる。群落頂部付近では輸送の寄与が損失として働いている。すなわち、この付近ではシャー生成による運動量フラックスの生成量が、エネルギー再分配項より上回っており、群落内において唯一の局地的生成が存在する個所である。乱流運動エネルギー同様、葉

が存在しない（葉軸および穂のみの）高度においてのみ運動量フラックスの局地的生成がみられ、葉軸や穂の面積が無視できない群落に対しては植物体面積を測定することが必要と思われる。高度約 1.4 m より下では生成量よりも損失量のほうが多くなり、その損失を補填する形で輸送が寄与する状態に変化する。また、高度約 0.8 m において輸送量が最大の正の寄与となっていることから、ここを境に運動量フラックスの傾度が変わるものと思われる。

5. 結 論

1999年9月13日鳥取大学乾燥地研究センター内のソルゴー群落において、高度 $3.0, 1.3, 1.0, 0.7, 0.4\text{ m}$ において10分ごとの平均風速、およびソルゴー群落の植物体面積密度の鉛直分布を観測した。

植物体面積密度の観測結果およびこれまでに報告されている群落上の乱流特性の測定値を当てはめ、2次のクロージャーモデルを用いて群落内外の平均風速の鉛直分布を求めた。計算結果の内、群落上の値だけを抽出し、ここでの風速が対数則であると仮定して、地面修正量および粗度長を求めたところ、地面修正量は 0.62 m であり、また粗度長は 0.21 m となった。これらの値は、植生の状態から判断して、過去の観測例から大きく逸脱していないものと思われる。地面修正量や粗度長は風速と植生の状態に依存するものであり、この結果は植生の状態を考慮しているが、風速の変化に対しては無視した定数となっている。しかし、本研究による算出法は簡便であり、日本のような複雑地形の多い現場への適応性は高いと思われる。

推定した平均風速と観測結果を比較したところ、大体よい対応が得られ、2次のクロージャーモデルは群落内外の風環境の推定に対して非常に有効な手法と思われる。

乱流運動エネルギーは群落頂部で最大となり、群落内へ進行するにつれて小さくなることがわかった。また高度 0.7 m 付近でその鉛直傾度は最大となり、高度約 0.2 m 付近に乱流運動エネルギーの鉛直分布は微妙なふくらみを示すこともわかった。運動量フラックスの鉛直分布は群落内において逆S字曲線を描くように減少し、鉛直傾度の最大値は高度 0.8 m 付近に現れた。群落内外の乱流解析より、乱流運動エネルギーおよび運動量フラックスの局所的生成は葉面積の占有率が非常に低い群落頂部で起こることがわかった。これより、出穂後のソルゴーのように穂や葉軸の表面積が無視できない群落において、植生の状態を示す指標として葉面積指数だけを用いるのは不十分であることが示唆された。

2次のクロージャーモデルを用いると、植物体面積密度の鉛直分布と群落上のただ1点の高度の平均風速を観測するだけで、群落内外の風速を定量的に推定することが可能であることが示唆された。またこのモデルによって群落内の乱流解析も可能であり、2次のクロージャーモデルは、今後の農業気象の発展に大きく貢献するものとなると思われる。

謝 辞

高次クロージャーモデルに関して様々な御講義を下さったUCDavisのProf. Roger H. Shaw氏とProf. Kyaw Tha Paw U氏、2次のクロージャーモデルのプログラム制作に関して様々な助言を頂いた九州大学理学部助教授 守田 治氏、観測の補助をして下さった山口大学農学部助手 鈴木賢士氏や鳥取大学乾燥地研究センター神近研究室の皆様に深く感謝いたします。

引 用 文 献

- Kimura, R., Otsuki, K. and Kamichika, M., 1999: Relationships between the zero-plane displacement and the roughness length over sorghum and alfalfa canopies. *J. Agric. Meteorol.*, **55**, 15-24.
Maki, T., 1976: Aerodynamic characteristics of

wind within and above a plant—Interrelationship between aerodynamic parameters and plant canopy height—. *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci.*, **23**, 1-67.

- Mellor, G. L., 1973: Analytic prediction of the properties of stratified planetary surface layer. *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1061-1069.

- Raupach, M. R. and Shaw, R. H., 1981: Averaging procedures for flow within vegetation canopies. *Bound.-Layer Meteorol.*, **22**, 79-90.

- Stull, R. B., 1988: *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 670 pp.

- The Editorial Committee of Technical Words for Agricultural Meteorology (農業気象用語編集委員会), 1986: *The explanation of technical words for agricultural meteorology* (農業気象用語解説集). The society of agricultural meteorology of Japan, 327 pp.

- Uchijima, Z. and Inoue, K., 1970: Studies of energy and gas exchange within crop canopies (9)—Simulation of CO₂ environment within a canopy—. *J. Agric. Meteorol.*, **26**, 5-18.

- Wilson, N. R. and Shaw, R. H., 1977: A high order closure model for canopy flow. *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 1197-1205.