

1 はじめに

中国長武黄土高原において大気境界層観測が実施されるが、本研究では、黄土高原に適用する鉛直 1 次元熱・水・CO₂ 交換モデルを構築する。特に土壌中の液状水、水蒸気、CO₂ ガス、物質移動について詳細に取り扱うことのできることを特徴とするモデルである。

2 モデル

陸面における鉛直 1 次元の熱・水・CO₂ 輸送を計算する数値モデルを構築する。モデルは土壌・植生・大気の 3 つの部分で構成される。

2.1 土壌中熱伝導・ガス拡散

土壌は 1 cm の幅で等間隔に分割され、深さ数メートルまでの間の熱伝導、液状水移動、および水蒸気・CO₂ ガス拡散を数値的に求める。計算ステップは 1 分である。

2.2 大気中乱流拡散

土壌表面の空気力学的な粗度長と、植生層全体の構造から算定される空気力学的粗度長から大気中の乱流輸送速度を求め、シア応力・熱・CO₂ ガスの乱流拡散輸送量を計算する。まず、植生層内における風速鉛直分布は Yamazaki et al. (1992) と同様に近似的に次式のように表す。

$$u^+(z_n) = \frac{u(z_n)}{u(h)} = \frac{\ln(z_n/z_{0g})}{\ln(h/z_{0g})} \cdot \prod_{i=1}^n (1 - \gamma_{m,i} \cdot \Delta z)^i$$
$$\gamma_{m,i} = [c_d a_c(z_i) / \{2\lambda^2(z_i)\}]^{1/3}$$
$$a_c(z_i) = p(LAI) \cdot a(z_i)$$
$$p(LAI) = LAI / (1.5 + LAI) \quad (1)$$

ここで n は植生層を幅 Δz で N 層に分割したとき、植生層の上から数えたときの数を示し、 z_n はそれに対応する高度である ($z_n = h - n \cdot \Delta z$)。このとき $n=1$ は一番上の層を表す。また h は植生高、 c_d は葉面抵抗係数、 a は葉面積密度、 z_{0g} は土壌面の空気力学的粗度長、 λ は混合距離を表す。 λ の計算には Watanabe and Kondo (1990) の混合距離理論を用いる。 γ_m は植生層が蜜で、混合距離が鉛直方向に一定とみなせるとき、風速鉛直分布を K 理論で考えたときの減衰率を正確に与える (近藤, 1994)。上式による風速鉛直分布は、植生がない状態においては対数則に等しくなり、土壌の粗度長 z_{0g} に支配される。関数 $p(LAI)$ は、疎な植生のときに葉面積密度をそのまま用いると、風速分布が K 理論に基づいた詳細な計算結果よりも若干小さくなるので、これを補正するために導入した関数である。 $p(LAI)$ 式中の値 1.5 は K 理論に基づいた乱流拡散方程式による結果との一致性が良いように実験的に決めた。補正された葉面積密度は a_c で表した。

上式から、運動量に対する空気力学的粗度長を次式のように導くことができる。

$$z_0/h = (1 - d_0/h) \exp(-\alpha^{-1})$$
$$\alpha = (1 - d_0/h) [\{\ln(h/z_{0g})\}^{-1} + h\gamma_{m,1}] \quad (2)$$

ここで d_0 はゼロ面変位を表す ($d_0/h = 1 - \lambda(h)/(kh)$ 、 k はカルマン定数)。

2.3 植生を含む地表面における放射伝達と熱収支

植生層内における日射量の分布を、多重散乱を考慮した放射伝達モデルにより計算する。熱収支計算は植生部と土壌部を別々に求め、植生部においては、貯熱を無視した熱収支 [$< \text{正味の入力放射エネルギー} > = < \text{乱流による熱交換量 (顕熱・潜熱)} >$] を解き、土壌表面においては [$< \text{正味の入力放射エネルギー} > = < \text{乱流による熱交換量 (顕熱・潜熱)} > + < \text{土壌中熱伝導} >$] を計算する。ここで、土壌中熱伝導は土壌表面と深さ 1 cm の間の温度勾配から計算される。ここで求められた土壌中熱伝導は上記の熱伝導方程式の上部境界条件を与える。群落コンダクタンスは、個葉の気孔コンダクタンスを積分して求められ、モデルには Ball (1988) モデルを用い、光合成モデルには Farquhar (1980) のモデルを用いる。

本モデルは中国長武高度高原の小麦畑に適用する予定である。以下には、モデルを実際に適用し、CO₂ フラックスを評価する際に、土壌からの CO₂ 放出 (土壌呼吸) の算定に必要な土壌中 CO₂ 生成強度の推定方法および推定例について記す。また、本モデルは半乾燥地に適用するために、植生がパッチ状に分布する場合の放射伝達についても考慮する。そこで、植生層内における放射伝達と植生構造との関係についても以下に記す。

3 土壌内 CO₂ ガス生成強度の推定

CO₂ フラックスを評価する際に土壌表面における土壌呼吸量を算定する必要がある。本モデルでは、土壌中の CO₂ 生成強度の鉛直分布を地温・土壌水分の関数として与え、土壌呼吸量を評価する。そこで、土壌中における CO₂ 生成強度分布の推定方法について述べる。推定の際には、土壌空隙中の CO₂ 濃度測定が必要である。以下には日本の温帯二次林において測定された CO₂ 濃度と土壌呼吸量から推定した例について述べる。

3.1 観測地、測定方法及び推定方法

1998 年 3 月から 12 月にかけて名古屋大学(愛知県千種区)構内二次林において観測を行った。平均樹高は 18m であり、夏期において LAI は 5.9 になる。測定項目は土壌呼吸量 R_s と土壌空隙内 CO_2 濃度 C_s 、地温、および大気中 CO_2 濃度 C_a である。 R_s については、3 月から 12 月にかけて、ほぼ月に 1 度、1 日の間に 11 回測定した(日中に 2 時間間隔、夜間に 3 時間間隔)。 C_s については、ガス検知管(GV-100S, ガステック)を用いて 1998 年 5 月から 12 月にかけて、月に 1 度、 R_s の測定と同じ日に、10cm、20cm、40cm、80cm の 4 深度において測定した。地温は 10cm、20cm、40cm で測定した。また、 C_a については、林内(1.55m)および林外(21.35m)の 2 高度で赤外線式 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ ガスアナライザー(LI-6262, LI-COR, Lincoln, NE)を用いて、 R_s と同様に月に 1 度、1 日の間に 11 回測定した。

土壌空隙内におけるガス拡散過程は、水平方向の不均質性が無視できる場合、次のような鉛直 1 次元方向のガス拡散方程式によって表される。

$$\frac{d}{dz} \left(K \frac{dC_s}{dz} \right) = S(z) \quad (3)$$

$S(z)$ は土壌内 CO_2 生成強度を表す。 $S(z)$ に関数形を仮定すると解析解が得られる。 K は土壌中のガス拡散係数を表し、 $K = \varepsilon \kappa D$ と表される。ここで、 ε は土壌空隙率を表し、 κ は拡散経路の屈曲度を表す。 κ が小さくなるほど拡散経路は曲がりくねって、拡散しづらい状態を表す。 D は CO_2 の分子拡散係数を表す。以下の解析において、 ε については、土壌空隙率の測定結果をもとにして、深くなるにつれ小さくなるような、指数関数で表されたとした($\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-z/z_\varepsilon}$)。以下に式(1)の 2 とおりの解析解について示す。

Method A

$S(z) = S_0 e^{-z/z_s}$ (指数関数形の分布)と仮定すると、式(1)の解は

$$C_s(z) = \frac{S_0 z_s}{K_0 \gamma} (1 - e^{-\gamma z}) + C_a \quad (4)$$

ここで、 $\gamma = z_s^{-1} - z_\varepsilon^{-1}$ である。

また、 $S(z) = S_0 (z/z_s) e^{-z/z_s}$ (ある深度に 1 つピークをもつ分布)と仮定すると、

$$C_s(z) = \frac{S_0 \eta}{K_0 \gamma} \left\{ 1 - \left(1 + \frac{z}{\gamma} \right) e^{-\gamma z} \right\} + C_a \quad (5)$$

ここで $\eta = \gamma^{-1} + z_s$ である。

それぞれの式において、 C_s の観測値に合うように S_0 と z_s を求めて、 $C_s(z)$ が計算される。

Method B

この方法では、 CO_2 が生成される層をある深さまでに限って考える。土壌を N 層に分割して、各層では S は一定とする。

$$C_s(z) = \sum_{k=1}^{i-1} a_k(z_k) S_k + a_i(z) S_i + \sum_{k=i+1}^n b_k(z_k) S_k \quad (6)$$

$$a_i(z) = \frac{z_\varepsilon}{\varepsilon_0 \kappa D} \{ (z_\varepsilon + z_i - z) e^{z/z_\varepsilon} - z_\varepsilon e^{z_{i-1}/z_\varepsilon} - \Delta z_i \} \quad (7)$$

$$b_i(z) = \frac{z_\varepsilon}{\varepsilon_0 \kappa D} (e^{z/z_\varepsilon} - 1) \Delta z_i \quad (8)$$

ここで $\Delta z_i = z_i - z_{i-1}$ である。また、土壌呼吸量に関しては、次のような関係式が成り立つ。

$$R_s = \sum_{i=1}^N S_i \Delta z_i \quad (9)$$

以上の式(4)~(7)と C_s の観測値を用いて各深度の CO_2 生成強度 S が計算される。

3.2 観測結果について

図 1 に示すように、土壌呼吸量 R_s ($\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) は深度 10cm における地温 $T_{s,10}$ と良い関係が見られた。図において白丸が観測値を表し、エラーバーは標準偏差を表している。曲線は指数関数

$$R_s = R_{20} Q_{10}^{(T_s - 20)/10} \quad (10)$$

で回帰した結果である($R_{20}=0.095$, $Q_{10}=2.55$, $r^2=0.96$)。

図 2 に各深度の C_s と地温との関係を示した。黒丸、白丸、黒四角、白四角はそれぞれ深度 10cm、20cm、40cm、80cm における値を表す。各深度について描かれた線は指数関数を用いた回帰曲線を表す。20cm を除いて、回帰曲線はほぼ同じ傾きを示す。20cm において傾きが少し異なるのは、この深度付近での植物根の影響や土壌構造の変化によるものかもしれない。

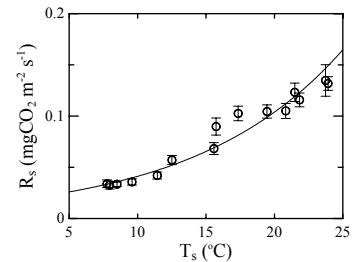


図 1. 土壌呼吸量と地温の関係

3.3 推定結果について

図 3 には土壌空隙内 CO_2 濃度鉛直分布の観測値と計算値の比較を示す。点破線と点線は Method A による計算値を示し(点破線が S に指数関数形を仮定したもので、点線はある深度にピークを仮定したもの)、

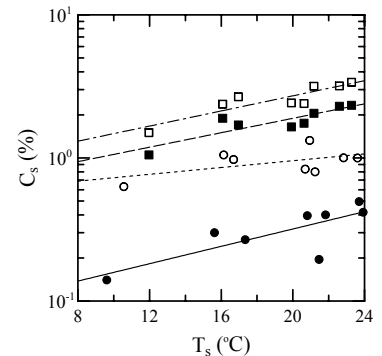


図 2. 土壌内 CO_2 濃度と地温の関係

実線は Method B による計算値を示す。いずれの計算においても、観測値をおおむね再現して

いる。図 4 には層別の CO_2 生成強度の季節変化を示す。ここでは、Method A と Method B のそれぞれについて、40cm より浅い層と、40cm より深い層での CO_2 生成強度の季節変化を示している。上の 2 図が Method A についての結果であり、下の 2 図が Method B についての結果である。白丸は 40cm より浅い層の CO_2 生成強度

S(0-40cm) であり、黒丸は 40cm より深い層での CO_2 生成強度 S(40cm-) である。白四角は土壤呼吸量を示している。エラーバーは、土壤空隙の屈曲度の推定誤差を考慮したときの变化幅を

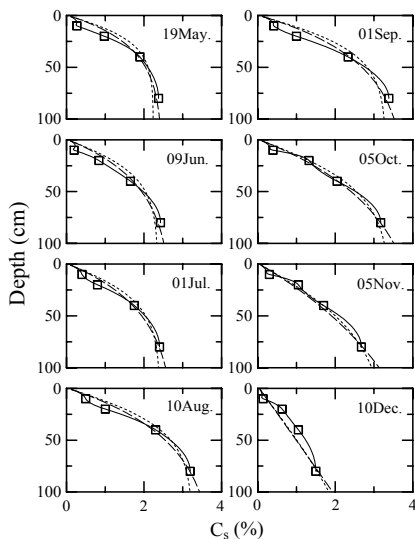


図 3 . 土壤空隙内 CO_2 濃度鉛直分布の観測値と計算値との比較

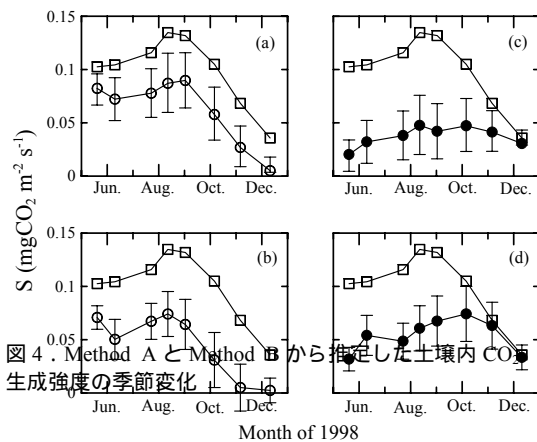


図 4 . Method A と Method B から推定した土壌内 CO_2 生成強度の季節変化

示している。図のように、浅い層での S(0-40cm) は、土壤呼吸量の季節変化とほぼ同様の变化を示し、地表面での温度変化に敏感である。これに対し、S(40cm-) は温度変化に対し応答が緩慢であり、S(0-40cm) から季節変化の位相が遅れて秋にピークを持つ。このことから、浅い層と深い層とでは、 CO_2 生成強度の季節変化の大きさと位相が違ってくるのがわかる。

図 5 には S(0-40cm) と S(40cm-) のそれぞれについて、地温と土壌水分量との関係について示した。左の 2 図が S(0-40cm) についての結果であり、右の 2 図が S(40cm-) についての結果である。図 5(a) のように、S(0-40cm) は地温と指数関数的な関係を持っていることがわかる。図中の点線は指数関数で回帰したものであり、また実線は地温が 20 以上のデータで回帰したものであ

る。図のように、あたたかい温度 (20 以上) のみのデータを用いると温度に対する増加率が少し減少する。また土壌水分量については、明

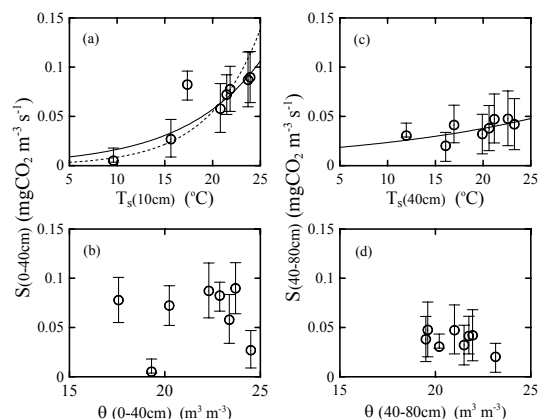


図 5 . 土壌内 CO_2 濃度生成強度と地温・土壌水分量との関係

瞭な関係は見られない (図 5(b))。図 5(c) のように、S(40cm-) は変化が鈍く、地温とゆるやかな関係にある。土壌水分量との関係は明瞭でない (図 5(d))。

4 植生構造と放射伝達

本モデルは鉛直 1 次元であるため、3 次元の植生構造をそのまま取り入れることはできないが、別に構築した 3 次元の放射伝達の計算結果を本モデルに反映させて、鉛直方向だけでなく水平方向の植生構造の不均一性を考慮する。ここでは、植生が水平方向にパッチ状に分布する場合と一様に分布する場合について比較した結果を記す。

4.1 3 次元放射伝達モデルについて

まず、3 次元放射伝達モデルについて、概略を説明すると以下のとおりである。日射の天頂角を ϕ_s 、方位角を θ_s 、視線の天頂角を ϕ_v 、方位角を θ_v すると、日射と視線の挟角 δ の余角は

$$\cos \delta = \cos \phi_s \cos \phi_v + \sin \phi_s \sin \phi_v \cos(\theta_s - \theta_v) \quad (11)$$

である。これを用いると、葉の角度分布がランダムであるとき、視線の方向における植生層の i 層に見える Sunlit leaves の面積の割合は

$$f_{\text{front}}(\delta) : f_{\text{back}}(\delta) = (1 + \cos \delta) : (1 - \cos \delta) \quad (12)$$

のように表される。

個葉における反射率を r_f 、透過率を t_f とする。第 n 層から樹冠上に到達する k 回目の反射・透過によるものは

$$\chi_k(z_n) = \frac{\chi_f}{4\pi} \int a_k(z_n) M_{1,n}(\gamma_v) \Phi_{k-1}(z_n) \Delta z d\mu \quad (13)$$

ここで $M_{i,j}(\gamma(z)) = \prod_{k=i}^j [1 - \gamma(z_k) \cdot \Delta z]$ であり、また $\Phi_k(z_n)$ は第 n 層に到達する k 回目の反射・透過によるものを表し、次式から求められる。

$$\Phi_k(z_n) = \sum_{i \neq n} \frac{r_f + t_f}{4\pi} \int a_k(z_i) M_{i,n}(\gamma_V) \Phi_{k-1}(z_i) \Delta z d\mu \quad (14)$$

4.2 結果について

葉がクラスター構造を持った場合の、日射の吸収率の変化について調べた。クラスター構造の度合いは、パラメータ Ω で表され、0に近いほど、クラスターの度合いが高いことを示す。図6には、LAI=5の場合の計算例を示す。上段はパッチ状分布の結果で、下段は水平均一な分布の結果である。

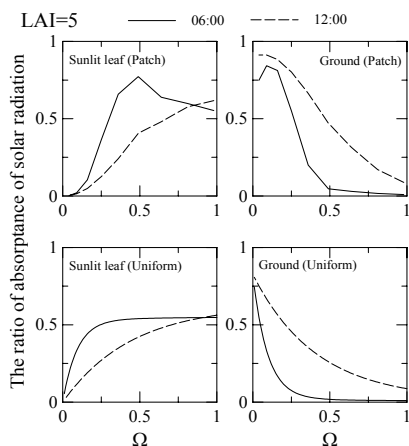


図6. パッチ状分布と水平均一分布の場合の、日射の吸収率とクラスター構造の関係 (LAI=5)

ることがわかる。これに対し、下段に示された水平均一な場合では、 Ω の変化に対してそのよ

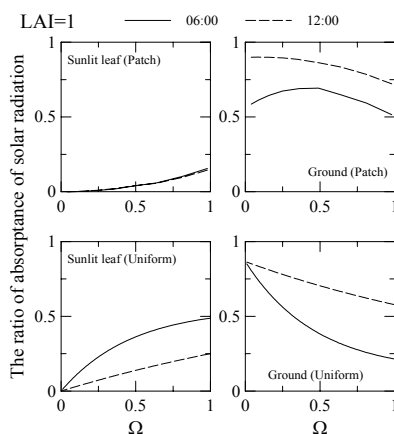


図7. パッチ状分布と水平均一分布の場合の、日射の吸収率とクラスター構造の関係 (LAI=1)

うなピークは見られない。このことは、パッチ状分布である場合、葉がある程度かたまりとなったクラスター構造を持つと、日射の吸収率が高くなるのに対し、水平均一では吸収率の変化は小さいことを示している。図7には LAI=1 の場合につ

場合の土壌の吸収率には Ω が0.5のところに弱いピークが見られる。

上記のように、植生構造の水平方向の不均一性および葉のクラスター構造は、葉と土壌表面の日射の当たり具合に影響を及ぼすことがわかる。このことは、葉の気孔コンダクタンスの評価や地中伝道熱、土壌呼吸量の評価にも影響すると

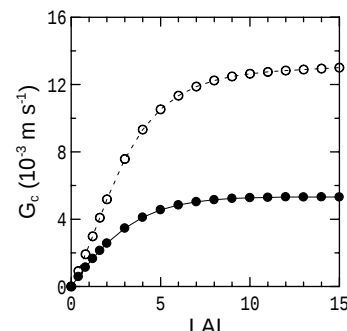


図8. 日向・日陰の区別をした場合と、平均として扱った場合の群落コンダクタンスと LAI の関係

考えられる。

図8には、植生層内の日射の分布を、各層で平均した場合と、日向・日陰の区別をした場合に、群落コンダクタンスを比較した例について示した。白丸は平均した場合を示し、黒丸は区別した場合を示す。この結果は気孔コンダクタンスの計算式に用いるパラメータの設定値に依存するが、図に示されているように、区別した場合に比べ、平均した場合は群落コンダクタンスが大きくなる。これは、個葉レベルから群落レベルにスケールアップするさいには、日向・日陰の区別が重要であることを示している。

5 おわりに

中国長武黄土高原に適用を予定している鉛直1次元熱・水・CO₂交換モデルについて、その概略と、土壌中CO₂生成強度推定方法、放射伝達と植生構造の関係について示した。本モデルは、黄土高原において実施される大気境界層観測のデータを用いて検証されるとともに、黄土高原における熱・水・CO₂交換過程の解析に利用される。

引用文献

- Ball, J. T. (1988): An analysis of stomatal conductance. Ph.D. thesis, Standard University, 89pp.
- Farquhar, G. D., and J. A. Berry (1980): A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, **149**, 78-90.
- Watanabe, T., and J. Kondo (1990): The influence of canopy structure and density upon the mixing length within and above vegetation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **68**, 227-235.
- Yamazaki, T., J. Kondo, T. Watanabe, and T. Sato, (1992): A heat-balance model with a canopy of one or two layers and its application to field experiments. *J. Appl. Meteor.*, **31**, 86-103.