大気-植生-土壌系モデル (NEO SPAM) による数値シミュレーション

(1) 植生効果のモデリング*

神田 学*・日野幹雄**

Numerical Simulation of Soil-Plant-Air System

(1) Modeling of Plant System

Manabu KANDA and Mikio HINO

A new numerical model of plant system (leaf-stem-root) has been developed for investigating the complicated bio-meteorological-hydrological process. This model considers the following points,

- 1) the water movement in plants, that is, water uptake by root, transport through stem, and transpiration from leaves,
- 2) the energy budget within canopy,
- 3) the photosynthesis process, and
- 4) the momentum sink by plant leaves.

Using this model, we calculated the response characteristics of transpiration and photosynthesis to some environmental factors (insolation, wind speed, humidity deficit and soil water content). The results explain the essential characteristics of experimental data.

Key words : Leaf-Stem-Root, Evapotranspiration, Photosynthesis, NEO SPAM, Environment

著者らの風洞実験結果および植物生理学的な知見を基に、根・茎（幹）・葉よりなる植生モデルを構築した。このモデルには根による吸水、茎による水分輸送、葉からの蒸散という植物内における水分の動きと同時に、葉に於ける熱収支、光合成過程、葉による運動量損失等の考慮がなされている。

このモデルを用いて、植物系総体が外的諸因子（日射・土壌水分・風速・飽差）にたいして、どのような挙動を示すかについて計算を行い、その結果、既存の実験結果等を定性的に説明し得ることを示した。

キーワード：根・茎・葉、蒸散、光合成、NEO SPAM、環境

I. はじめに

本論文の目的は、大気系（圏）や土壌系（圏）に較べて、機能が複雑で記述する方程式系（時間 t と空間 x , y , z を独立変数とする）が確立されておらず、これら三圏を一体として取り扱う際のネックとなっている植生系（圏）について、われわれの風洞付ライシメーターでの

実験を基にして、また従来の植物生理学的な知見を参考にして、合理的なモデル化を行い、それに含まれる諸因子の相互相関・特性を理解することにある。

植生の生理学的作用については植物生理学分野における植生の知見をもとに、これまでいくつかの水分移動モデル、光合成・蒸散モデル等が各々の目的に合わせてなされてきている³⁾⁵⁾⁷⁾⁸⁾¹⁵⁾。しかしながら、蒸散・光合成等

* 本論文は、既に文献⁹⁾¹⁰⁾において、式形のみを提示したわれわれの植生モデル式について、その導入過程を説明し、この系が示す特性について新たに計算し、結果の検討を行ったものである。

*東京工業大学大学院 Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Tokyo Institute of Technology

**東京工業大学工学部 Dept. of Civil Eng., Tokyo Institute of Technology

の植物生理を踏まえたうえで、「根からの吸水・茎を通じての水分移動・葉からの蒸散」という一連の水収支を熱収支・運動量収支とともに定式化した例は著者らの知る限りでは未だない。

本研究では植生による水移動・熱移動・運動量移動の物理機構・植物生理機構を表現し得る「根・茎（幹）・葉一体の植生モデル」の構築を試みた。またこれまでの植物生理に関する理論的アプローチの多くは電気回路アナロジーであるが、本研究ではあくまで物理機構に沿った流体力学的観点からの物理モデルの構築をめざした。

II. 植生系のモデリング

われわれが植生に影響を与える諸因子のうちのいくつか（風速や土壌水分量）を制御して、不十分ながらも敢えて実験を行った⁹⁾¹⁰⁾¹⁴⁾のは；（1）これらの因子相互の影響度を調べ、（2）それから植物生理機構を推量し、植物生理学で既に得られている知見も参考にして、（3）葉・茎幹・根よりなる合理的な植生系のモデル（時間 t と高さ z を独立変数とする）を構築するためのものである。

以下に述べる植生モデル中にあらわれる風速・気温・水蒸気量等は、それぞれ大気の流れ方程式、熱・水蒸気拡散方程式等によって解かれるべきものであるが、今回は植生モデルの提案と検討に主眼を置くため、大気系方程式との接続についてはここでは述べない。3章で述べるモデル計算では各物理量の鉛直分布形を先に与えて計算を行った。

1. 葉系のモデリング

葉の存在は運動量、水蒸気量、熱量、 CO_2 等の多くの物質の移動形態に影響するため、これらの定式化はとりわけ重要である。

（a）運動量交換

運動量シンクとしての働きについて考える。これについては、既にいくつかの研究がなされている（例えば Kondo & Akashi¹²⁾）。ある空間を占める植物の葉群によって気体に及ぼされる抵抗は、一枚の葉が及ぼす抵抗のアナロジーから式(1)のように表される。

$$F = \rho c_m s u^2 \quad (1)$$

ここで F ：葉による抵抗、 c_m ：抵抗係数、 s ：葉面積密度 (m^2/m^2)、 u ：風速 (m/s)、 ρ ：空気密度 (g/m^3)。

ここで抵抗係数とレイノルズ数の関係を図-1に示す（近藤¹¹⁾より引用）。群落内の葉の抵抗係数は層流時には $Re^{-1/2}$ に比例し、 $10^2 < Re < 10^5$ までの広範囲にわたっておよそ $c_m = 0.5$ の一定値を取ることがわかる。今回は $c_m = 0.5$ を用いた。

（b）熱交換

葉温と気温に温度差があることによって、葉は熱のシ

図-1 レイノルズ数と抵抗係数の関係
（近藤（1984）より引用）

図-2 レイノルズ数と熱交換率の関係
（実験データは佐藤より引用）

ンク・ソースとして働く。単位空間当りの気流と葉の間の熱交換量は式(2)のように表される（例えば佐藤¹²⁾）。

$$HH = k_T u s (T_L - T) \quad (2)$$

ここに、 HH ：熱交換量、 T ：気温、 k_T ：熱交換率（熱輸送係数）、 T_L ：葉温。

図-2（佐藤¹²⁾）は様々な群落内の葉の熱交換率とレイノルズ数の関係を示したもので、およそ $k_T \sim Re^n$ ($-1.0 < n < -0.5$)であることがわかる。実際の葉の熱輸送係数は葉の風向に対する角度、葉の振動等の影響等が入るためばらつきが大きい⁹⁾が、ここではそういった影響は考慮しないものとする。

（c）水蒸気交換

葉の蒸散による水蒸気交換機構の概念を図-3に示す。蒸散作用は気胞という一種のキャビティーと、気孔を介してその上を通り過ぎる気流との間で交わされる機械的な拡散現象であると考えることができる。この気胞内の水蒸気量は、常にそのときの葉温での飽和水蒸気量にあると考えてよいであろう。以上のことから水蒸気交換量は、式(3)のように飽差・風速・交換率の積で表すことができる。

図-3 気孔からの蒸散の概念図

ここに、

$$E = \kappa_H u s (H_s - H) \quad (3)$$

E : 水蒸気交換量, H : 水蒸気量, κ_H : 水蒸気交換率 (係数)

H_s : T_L での飽和水蒸気量。

キャビティーと気流の境界面には気孔が介在しており、この気孔の開閉によっても拡散効率はコントロールされるから、交換係数は風速、気孔開度の関数として、式(4)のように表すことができる。

$$\kappa_H = f(u, O_p) \quad (4)$$

ここで、 O_p : 気孔開度。気孔幅が1mm以下で拡散が粘性底層内で起こるものとして理論的に式(5)が導かれてい (近藤¹¹⁾。

$$\kappa_H u = \beta u^{1/2} O_p^{2/3} \quad (5)$$

ここに、 β : 気孔形状による定数。また気孔開度は後述するように日射・葉温・葉内水分の関数となる (式(7))。

なお、Raupach⁹⁾らは一枚の葉の物質拡散に対する群落葉の物質拡散の補正として経験的定数 'shelter factor' を導入しているが、その物理的意味の不明確さのためここでは用いないこととする。

(d) CO_2 交換

風洞実験から得られた結果によると、 CO_2 シンク量は日射量、風速との関係が強い。これは葉内の CO_2 濃度が光化学的な反応である光合成活動量によって決まるためだと考えられる。 CO_2 交換も気孔を介した気胞——気流間の拡散現象という点では水蒸気交換と同様に扱うことができるので、 CO_2 シンク量は式(6)のように表せる。

$$D = -\kappa_C u s (C_L - C) \quad (6)$$

ここに、 D : CO_2 交換量, C : 気流の CO_2 濃度, κ_C : CO_2 交換率, C_L : 葉内の CO_2 濃度。

ここでは、 κ_C は水蒸気交換率 κ_H と同じ値を用いる。また気胞内 CO_2 濃度は光化学的な反応によって決まるので日射量の関数として表現できる。

(e) 気孔開度

図-4 気孔開閉メカニズムの概念図

植物生理学的知見にもとづく気孔開閉メカニズムの概念を図-4に示す。葉は気孔から CO_2 を摂取し、光合成活動によって同化する働きを持つ。日射量の増加は光合成活動を促進し、細胞内の CO_2 濃度を減少させ、気孔をさらに開かせる。一方、日中葉温が必要以上に高くなったばあい、葉内の水分が不足をきたさない限り、気孔を開き蒸散にともなう潜熱を放出することによって葉温を下げようとする自己調節機能が働く。しかしながら、吸水が蒸散に間に合わず、植生内の水分量が不足をきたすような場合には、逆に気孔を閉じて自らの 'しおれ' を防ごうとする。以上の植物生理を踏まえると気孔開度は日射、葉温、葉内水分 (式(7)) によって直接規定されることができる。気温、飽差等は葉温・葉内水分等への間接的因子であるといえる。

$$O_p = O_{p\max} f(R_n) f(T_L) f(\theta V) \quad (7)$$

ここで、 R_n : 日射量, T_L : 葉温, θV : 葉内水分, $O_{p\max}$: 最大の気孔開度。また、 $f(R_n)$, $f(T_L)$, $f(\theta V)$: 気孔開度への影響関数で0~1の値を取る。

また上述の考察に基づけば各関数形はそれぞれ式(8)(9)(10)のように与えられるであろう。

$$\text{飽和型曲線: } f(R_n) = R_n / (c_1 + c_2 R_n) + c_0 \quad (8)$$

$$\text{単調増加曲線: } f(T_L) = c_4 T_L + c_5 \quad (9)$$

$$\text{減衰曲線: } f(\theta V) = \exp(-c_6 \cdot \theta V) \quad (10)$$

ここで、 $c_1 \sim c_6$: 実験値から同定されるべき定数。

既存の実験結果 (例えば Zur⁷⁾堀江¹⁰⁾) を整理すると、上述の関数形が質的な意味でほぼ妥当であることが裏付けられる。上式の関数形を決定するにあたっては限られた実験結果から厳密に複雑な式を同定するよりも、ここではむしろ物理機構に沿ったうえで、できるかぎりシンプルな定式化を行い一般性を持たせておくことを心がけた。

式(7)を式(5)に代入して整理すると交換率は以下のように表せる。

$$\kappa_H = \kappa_{H\max} (f(R_n) f(T_L) f(\theta V))^{2/3} u^{-1/2} \quad (11)$$

ここで、 $\kappa_{H\max}(=\beta \cdot O_{p\max}^{2/3})$ は最大水蒸気交換率で気孔形状・気孔数に依存し植物種ごとに異なる値を取る。

(f) 群落内の日射環境

群落内の葉群はその葉面積密度に応じて群落内に透過する日射量を遮蔽する。葉面積密度と日射量の減衰の間には式(12)の関係があり、それを高さ z で積分することによって群落内の日射量分布式(13)の関係が得られる。

$$\alpha R_n/dz = -\delta(s)R_n \quad (12)$$

$$R_n(z) = R_{n0} \cdot \exp(-\delta(s)z) \quad (13)$$

ここで、 R_n :葉が受けるトータルの日射量(大気放射量も含む)、 R_{n0} :群落上部での日射量、 δ :日射減衰率。

(g) 葉面での熱収支

群落内の葉温は葉面熱収支式(14)から決定される。

$$\rho_s c_s \frac{dT_L}{dt} = -2\sigma T_L^4 + R_n - c_p \rho \kappa_{Hu}(T_L - T) - L \rho \kappa_{Hu}(H_s - H) \quad (14)$$

ここで、 ρ_s :葉の比重、 c_s :葉の比熱、 σ :ステファン-ボルツマン定数、 L :水蒸気潜熱。

上式の左辺は葉温の非定常項、右辺第1項が葉の長波放射、第2項が葉が受けるトータルの日射量(大気放射も含む)、第3項が顕熱項、4項が潜熱項である。群落内の葉は地面からの長波放射も受けているが、ここではそれは考慮しなかった。

2. 茎幹系のモデリング

茎・幹については水分移動の通路としての役割を定式化する。植生の導管は死んだ細胞であり、水分移動に使われるだけの一本のパイプとみなせる。蒸散によって葉のサクションが低下すると植物下方との間にサクション差が生じ、その圧力差が駆動力となって導管内の水移動、さらには根からの吸水が促進されると考えることができる。(以前は、根圧の作用というものも考えられていたが、現在ではほぼ否定されている(田崎¹³⁾)。普通の流体場では絶対圧0(−1013mb)以下の負圧は存在しない。しかし、不飽和状態の植物内にはマイナス数百気圧にもおよぶ負圧状態が存在することが知られている(田崎¹³⁾)。これは植物体内の細管中の水が引張力に対して抵抗力を持つことによる。

同じ高さに存在する茎・幹と葉、茎・幹と根の水分ポテンシャルは(計算の便宜上)等しいと仮定して、蒸散・根の吸水によるシンク・ソース項と接続することによって、茎内の水分移動式は(15)式のように表すことができる。

$$C_p \frac{\alpha \Psi_p}{\alpha t} = \frac{\alpha}{\alpha z} \left(K_p \frac{\alpha(\Psi_p - z)}{\alpha z} \right) - S_p \quad (15)$$

$$S_p = -\left(\frac{\theta'}{\theta_s}\right)^n \xi l (\Psi_s - \Psi_r) \quad z < 0: \text{土壌内の根}$$

$$S_p = \kappa_{HS}(H_s - H) \quad z > 0: \text{大気中の葉}$$

ここに、 C_p :植生の比水分容量($\text{cm}^3/\text{cm}^3/\text{cm}$)、 K_p :植生

($\times 10^{-3} \text{ cm/s}$)

針葉樹	0.6
常緑広葉樹	0.4 ~ 1.3
落葉広葉樹	1.8 ~ 3.5
つる植物	6.5 ~ 34.5

図-5 各種植物の茎内透水係数

内の透水係数(cm/s)、 Ψ_s , Ψ_r :土壌および根のサクション、 S_p :根の吸水あるいは葉の蒸散。

上式の左辺は非定常項、右辺第1項は植物内の水分フラックスの勾配、第2項は根からの吸水項(後述式(16))あるいは葉からの蒸散項(式(3))をあらわす。

図-5は主な植物の茎内透水係数であるが、太い導管を有するものほど大きな透水係数を与える。層流管路の理論式が導管内にも適用できるとすれば、茎・幹内の透水係数は導管径の2乗に比例すると考えることができる。

$$K_p \sim d^2$$

ここに、 d :導管径(cm)。

なお、外的因子の変化に対する植物反応の時間遅れの効果に関して、根から葉までの水分移動にともなうものについては本モデルで扱うことができるが、植物生理そのものに起因する遅れについてはここでは考えないこととする。

3. 根系のモデリング

ここでは土壌水分のシンクとしての根系の役割について定式化を行う。根からの吸水機構の概念を図-6に示す。根からの吸水は根の浸透膜を介した土壌・植生根の間の浸透現象として理解することができるから、吸水量は浸透率と根-土壌のサクション差に比例する。ただし、根周囲の土壌水分が不飽和である場合は根に接している摂取可能な水分の実質的な表面積は減少するから、その補正が必要となる。不飽和時の飽和時に対する接触水分表面積の比(面積比)は土壌含水率の飽和土壌含水率に対する比(体積比)の n 乗と考えることができる。ここで n は土壌構造の表面積/体積の比を与える。以上より根の吸水量は式(16)で表される。

$$S_p = -\left(\frac{\theta'}{\theta_s}\right)^n \xi l (\Psi_s - \Psi_r) \quad (16)$$

ただし、

図-6 根からの吸水機構の概念図

図-7 吸水項の理論と実験の比較
(実験データはHerkelrath(1977)より引用)

$$\theta^* = \theta - \theta_r$$

ここで、 θ_s , θ (cm^3/cm^3): 飽和土壌水分量, 土壌水分量,
 θ_r : 根が吸水可能な土壌水分量の下限, ψ_s , ψ_r (cm):
土壌のサクション, 根内のサクション, ξ ($\text{cm}^2/\text{cm} \cdot \text{min}$):
単位根長の膜浸透率, l (cm/cm^3): 単位体積土壌中の根

長.

Herkelrath ら¹⁾の root contact model は本モデルの $n = 1$ の場合に相当し, 単純に体積と表面積の比をとった場合は $n = 2/3$ となる. 図-7 は Herkelrath ら¹⁾の実験結果と彼らの理論解 ($n = 1$) を与えているが, $n = 2/3$ とした本論文の理論解の方がより実験結果とフィットしているようにみえる. 実際には $1 < n < 2/3$ 程度の値を取るものと考えられる.

III. 諸因子にたいするモデル植生総体の挙動

(既存の実験結果と比較して)

以上述べてきたモデルを用いて葉・茎幹・根を一体として扱ったとき, モデル植物系が総体として外的諸因子にたいしてどのような挙動を示すかを既存の実験結果と比較しながら以下に検討した.

1. 計算概要

植物としては, 草本類 (case(a)) と木本類 (case(b)) の2種類を想定し行った(図-8). 両者の主な違いは植生鉛直スケールと茎・幹内透水係数等の植生物性値である. 各植生モデルに使用した諸パラメーターを図-9に示す. 計算は外的条件に対し定常になるまで行った.

植生内の境界条件は上端および下端で不透水条件とし

図-8 モデル植物の概念図

植物の物性	CASE (a)	CASE (b)
透水係数 (cm/s)	1×10^{-4}	1×10^{-3}
比水分容量 (ℓ/cm)	1×10^{-6}	1×10^{-5}
日射減衰率	0.5	0.5
最大水蒸気交換率	0.2	0.4

図-9 計算に用いた植物物性値

図-10 異なる土壌水分に対応した光合成・蒸散一日射の関係 case(a)の場合

図-11 異なる土壌水分に対応した光合成・蒸散一日射の関係 case(b)の場合

た。大気-土壌系の境界条件は本論文の第2部で具体的に示す。

2. 諸因子と蒸散・光合成活動の関係

(a) 日射・土壌水分と蒸散・光合成活動

図-10・図-11に異なる土壌水分に対応した日射-光合成・蒸散関係を示す。case(a), case(b)の共通の特徴を説明する。

1) 土壌水分の影響は湿潤状態では微小であるが、ある程度(ここではpF値2.7程度)以上の乾燥状態で顕著に蒸散・光合成を抑制するようになる。これは土壌の乾燥状態を反映して根の吸水力が弱まり、葉の負圧が上昇することによって気孔の閉塞が起こるからだと考えられる。

2) 日射量が高い場合ほど土壌水分による蒸散・光合成の抑制が顕著である。これは高い日射量で蒸散が促進されことにより、土壌水分で規定される吸水との間のア

ンバランスがより顕在し、葉の負圧低下の影響がでやすくなるためだと考えられる。特に土壌が極端に乾燥している場合には(ここではpF 3.4)、日射量が強くなると逆に光合成の低下を引き起こす。これは日射による光合成・気孔開度の促進よりも葉のポテンシャル低下による気候閉塞の影響が卓越するからである。このような傾向は我々の風洞実験結果¹⁴⁾(図-12)や矢吹の野外観測¹⁶⁾(図-13・14)等と定性的によく一致している。

case(a), case(b)の相違点は日射量に対する蒸散量・光合成曲線の形が異なる点である。すなわち、case(a)は蒸散量が日射に対して直線的に増加するのに対し、case(b)は飽和形の増加傾向を示す。これはcase(a)の場合は茎の透水係数が小さいため、高い蒸散に見合うだけの流量が与えられるまでには、葉の負圧が根の負圧にたいしてかなり低下しなくてはならず、そのため透水性のよいcase(b)にくらべ日射の増加に対して、気孔閉塞の影響が

図-12 風実験における土壌水分に対応した光合成一日射の関係 (神田・日野 (1990) より引用)

乾燥季における熱帯乾燥常緑樹林の正味光合成速度と風速ならびに日射量との関係

+ : $1.5 \leq U_{10} < 2.0 \text{ m/sec}$ $\circ$: $2.0 \leq U_{10} < 3.0 \text{ m/sec}$
 Δ : $3.0 \leq U_{10} < 4.0 \text{ m/sec}$ $\diamond$: $4.0 \leq U_{10} < 5.0 \text{ m/sec}$
 ∇ : $5.0 \leq U_{10} < 6.0 \text{ m/sec}$ $\circ$: $6.0 \leq U_{10} < 7.0 \text{ m/sec}$

図-13 野外観測における異なる風速に対応した光合成一日射の関係、湿潤時の場合 (矢吹 (1985) より引用)

生じやすいものと思われる。

(b) 風速と蒸散・光合成活動

図-15・図-16に異なる風速に対応した日射-光合成・蒸散関係を示す。case(a), case(b)いずれも風速の増加とともに蒸散・光合成とも増加する傾向にある (図-13と比較参照)。case(a)は日射量が強くなってくると、弱い場合よりも風速差による蒸散量の違いが小さくなる傾向にある。これは、日射量が弱い場合は、蒸散量そのもの

湿潤季における熱帯乾燥常緑樹林の光合成速度と日射量ならびに風速との関係

風速は 44 m 高の値

+ : $1.5 \leq U_{10} < 2.0 \text{ m/sec}$ $\circ$: $2.0 \leq U_{10} < 3.0 \text{ m/sec}$
 Δ : $3.0 \leq U_{10} < 4.0 \text{ m/sec}$ $\diamond$: $4.0 \leq U_{10} < 5.0 \text{ m/sec}$
 ∇ : $5.0 \leq U_{10} < 6.0 \text{ m/sec}$ $\circ$: $6.0 \leq U_{10} < 7.0 \text{ m/sec}$

図-14 野外観測における異なる風速に対応した光合成一日射の関係、乾燥時の場合 (矢吹 (1985) より引用)

のが小さいため葉内水分の不足の影響がなく、風速差による交換効率の差異だけがそのまま蒸散量の差に反映されるのに対し、日射が強いときは、蒸散量が大きいため風速の強いものほど葉内水分不足によるマイナス効果を強く受けることになるため、蒸散量の差が生じにくくなってくると思われる。

(c) 飽差・土壌水分と蒸散・光合成活動

図-17・図-18に異なる土壌水分に対応した大気飽差-光合成・蒸散関係を示す。case(a), case(b)とも蒸散量は大気飽差量とともに増加傾向に、光合成は飽差量の増加に対して逆に減少傾向にある。これは蒸散量が飽差量に直接影響を受けるのに対し、光合成は気孔開度を通じて間接的に影響されるからである。すなわち飽差の増加によって蒸散が増すと葉内水分の低下によって気孔の閉塞が起こり、それが光合成効率の低下となって現れるわけである。実際の飽差量は強い気温依存性をもつので、ここで行った計算との厳密な比較はできないが、参考までに我々の風洞実験結果¹⁴⁾を図-19に示す。

IV. おわりに

大気-植生-土壌圏にわたる複雑な系を把握するには、このような物理方程式群にもとづいた植生モデルの構築と、その有効利用が今後おおいに重要度を増すと考えられる。本モデルにはまだ検討すべきいくつかの点を残しており、それらを改良していくと同時に、大気-植生-

図-15 異なる風速に対応した光合成・蒸散—日射の関係 case(a)の場合

図-16 異なる風速に対応した光合成・蒸散—日射の関係 case(b)の場合

図-17 異なる土壌水分に対応した光合成・蒸散—飽差の関係 case(a)の場合

図-18 異なる土壌水分に対応した光合成・蒸散-飽差の関係 case(b)の場合

図-19 風洞実験における異なる土壌水分と対応した蒸散-飽差の関係 (神田・日野 (1990) より引用)

土壌一体の水文気象プログラムへと発展させていく予定である。

本論文の図面整理で本研究室 4 年の稲垣聡君に手伝ってもらった。ここに厚く感謝する。

参考文献

- 1) Herkelrath. W. N, Miller. E. E and Gardner. W. R (1977) : Water up take by plant (The root contact model) , Soil. Sci. Am. j. vol41. p1039-1043.
- 2) Kondo. J and Akashi. A (1976) : Numerical study on the two dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layers, Boundary. Layer. Meteorol, vol10, p255-272.
- 3) Molz. F. J (1981) : Models of water transport in

the soil-plant system (A Review) , Water. Res. Resour, Vol15, p1245-1259.

- 4) Monteith. J. L (1973) : Principles of Enviromental Phisycs, Edward Arnold.
- 5) Protopapas. A. L and Bras. R. A (1988) : State-space dynamic hydrological modeling of soil-crop-climate Interactions, Water. Resour. Res, vol. 24, p1765-1799.
- 6) Raupach. M. R and Thom. A. S (1981) : Turbulence in and above plant canopies, Ann. Rev. Fluid. Mech, vol13, p97-129.
- 7) Zur. B and Jones. J. W (1981) : A model for the water relations, photsynthesis and expansive gross of crops, Water. Res. Resour, vol17, p311-320.
- 8) 石田明靖(1985) : 土壌-植物系における水分移動に関する研究, 山形大学紀要 (農学), 9 巻 4 号.
- 9) 神田学・日野幹雄 (1989) : 植生による気候緩和効果に関する基礎的研究, 第33回水理講演会論文集, p685-690.
- 10) 神田学・日野幹雄 (1990) : 植生が大気表層および土壌水分に及ぼす影響, 第34回水工学論文集, p235-240.
- 11) 近藤純正 (1984) : 大気境界層の科学, 東京堂出版.
- 12) 佐藤威(1987) : 群落構造下の稲の葉の平均熱輸送係数の推定, 文部省科学研究費報告.
- 13) 田崎忠良 (1978) : 植物生理学, 朝倉書店.
- 14) 日野幹雄・神田学 (1989) : 風洞付ライシメターによる植生の気候緩和と解析, 水文・水資源学会誌, vol2, p61-69.
- 15) 堀江武(1981) : 気象と作物の光合成, 蒸散, そして生長に関するシステム生態学的研究, 農技研報A,

vol28.

- 16) 矢吹萬寿 (1985): 植物の動的環境, 朝倉店.
(1990. 8. 21受付, 1990. 9. 11受理)

付録 本モデルと電気回路アナロジーとの対応関係

本モデルは電気回路アナロジーで扱われる各種抵抗係数とある程度の対応関係をつけることができ, 本論文でも抵抗値で整理された他文献を参照したことからその対応関係を水蒸気拡散を例に取って示す.

$$\text{本モデル} \quad : E = \rho_{KHMS}(H_s - H) \quad (\text{A } 1)$$

$$\text{電気回路アナロジー} : E = \rho \frac{1}{r_a + r_s} (H_s - H) \quad (\text{A } 2)$$

ここで, r_a : 葉面境界層拡散抵抗, r_s : 気孔抵抗.
したがって,

$$K_{HMS} \sim \frac{1}{r_a + r_s} \quad (\text{A } 3)$$

(A 3) に(1)を代入して (A 4) が得られる.

$$K_{H\max}(f(R_n)f(T_L)f(\theta V))^{2/3}u^{1/2} \sim \frac{1}{r_a + r_s} \quad (\text{A } 4)$$

著者略歴

(かんだ まなぶ)

1964年 新潟県に生まれる
1986年 東京工業大学工学部卒業
1989年 東京工業大学修士課程修了
現在, 東京工業大学博士後期課程二年
工学修士

(ひの みきお)

1932年 秋田県に生まれる
1955年 東京大学工学部卒業
1960年 (財)電力中研究所入所
1967年 東京工業大学助教授
1973年 東京工業大学教授となり現在に至る。工学博士