

植生が大気表層および土壌水分に及ぼす影響

The effect of vegetation on atmospheric surface layer and the water budget in soils

東京工業大学	神 田 学	Manabu KANDA
東京工業大学	日 野 幹 雄	Mikio HINO
千葉工業大学	篠 田 裕	Yutaka SHINODA

Two sets of lysimeter with wind tunnel were constructed, one of which was grassed (40cm height) and the other of which was turf (5cm height). Close relationship between CO_2 flux and insolation, humidity flux and vapor pressure difference, heat flux and humidity flux has been observed. Grass shows much effect of moderating the climate, but not turf, because of their difference in evapotranspiration rate and sheltering effect.

Numerical simulation using NEO-SPAM (soil-plant-air-model) has been performed to see the effect of the allocation of vegetation. Vegetation is more effective in moderating the climate if the separation of vegetated zone are shorter, and leaf area density is important in terms of both the sheltering effect and latent heat effect.

Keywords: a vegetation, evapotranspiration, NEO-SPAM

1 はじめに

植生は蒸散・光合成という生物活動を媒介として大気と土壌を結び付けている。したがって他の大気境界と異なり現象の把握は難しいが、その水文学的・気象学的評価はきわめて重要である。実際、気象モデルの中にも植生の効果が本格的に取り入れられようとしているがまだ試行錯誤の段階であるといえよう。気候緩和効果を定量的に把握して行くには、植生の生物活動の素過程に注目した基礎研究と同時に、植生を含む大気-土壌系の複雑な非線形システムを損なわないマクロな視点からの研究も重要であると考えらる。

我々は風洞付ライシメーターによる裸地・植生の比較実験および植生微気象シミュレーションプログラム (NEOS-SPAM) の開発と数値実験により植生が大気や土壌にもたらす影響について研究を行ってきた¹⁾²⁾³⁾。今回の報告はそれらの研究を引き継ぐものである。一つは今夏に行った実験結果について、もう一つはNEOS-SPAMを用いた気候緩和と数値実験について報告する。実験は生物活動の素過程を調べるためのアプローチとして、また数値実験は実際の実験では行うことができない (あるいは実験が著しく困難である) ような場合についてコンピューターの力を借りて現象の理解に役立てようという主旨である。実験は葉の長い雑草 (約40cm) と、草丈の低い芝 (約5cm) について風洞付ライシメーターを用いた屋外観測を行い定量的な考察を行った。またある一定量の植生で大きな気候緩和効果を挙げるにはどのような配置が効率的かを調べるために数値実験を行い、群落の配置がもたらす影響を気流と植物活動のインターアクションの観点から考察した。

2 風洞付ライシメーターによる雑草と芝の気候緩和と効果実験

2-1 実験概要

東京工業大学構内に設置された風洞付ライシメーターを2台使い、一つは草丈約40cmの雑草 (チカラシバ)、もう一つは草丈5cm以下の芝 (コウライシバ) を植えて、気候緩和と効果の比較実験を行った。実験風洞の概要・測定システムは参考文献を参照されたい。測定項目は風洞出入口での気温・ CO_2 濃度・湿度、風速 (各鉛直7点)、葉温・地温 (出口のみ鉛直3点)、土壌サクション (3断面、鉛直5点)、日射量である。風速及び降雨はそれぞれファンと人工降雨装置により制御下にある。自動計測により、全データにつき6分間に一回、アンサンブル平均値を出力するようにした。測定期間は1989年の夏期2ヶ月で、本解析には8月下旬から9月上旬にかけての一連の乾燥過程における、風速分布が一定のデータを用いた。

2-2 実験結果と考察

2-2-1 風洞内のマクロな物質収支 (CO_2 、水蒸気、熱)

熱、水蒸気、 CO_2 濃度について、風洞の出口と入口に於ける物質フラックス (速度×濃度) の差を求め、マクロな物質収支から植物活動と気候緩和効果について考察してみた。

(a) 水蒸気量 昨年報告では裸地風洞の蒸発量でさえ最大で植生風洞の水蒸気ソース量の10%にも満たないことを示した。実際には植生による風速の減衰、日射の遮断等により、それよりはるかに低い寄与率になっていると考えられるので、水蒸気ソースを植物蒸散と考えることにする。風洞内水蒸気ソース量と飽差の関係を図1に記す (数日分のデータをまとめてプロットしてある)。まず雑草に関しては、飽差が低い領域では飽差と水蒸気ソース量のあいだに良い対応関係がみられる。ところが飽差が大きくなってくると土壌水分の状態が大きく影響してきているようであり、土壌水分の乏しいものほど飽差量に対する蒸散量の伸びが小さくなっていく。これは高い蒸散能に見合う吸水能不足から生じる一時的な気孔閉塞の影響であると考えられる。一方、芝の場合はトータルの葉面積が少ないので当然蒸散量は雑草より少ない。雑草の場合に比べて飽差に対する蒸散量の伸びが緩慢で、ある程度の飽差量ではほぼ飽和するか、高飽差域では逆に蒸散量の低下も見られる。雑草と芝の根による吸水状態の違いを見るために土壌内サクションの日変化プロファイルの例を図2(a)(b)に記す。雑草は地中深いところまで吸水しているのに対し、芝は25cm深程度のところに限られているのがわかる。

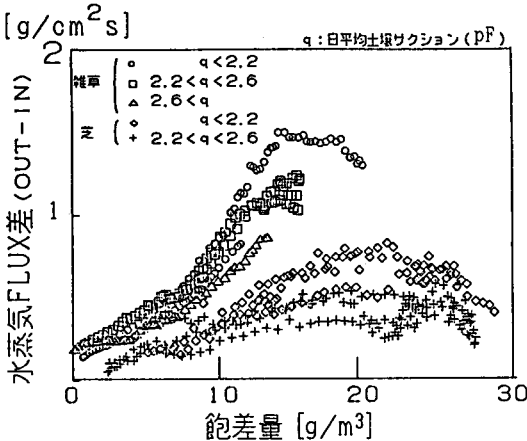


図-1 飽差と水蒸気ソース

(b) CO_2 量 光合成活動は風洞内の CO_2 シンク量から検討することができる。図3からわかるように光合成活動は雑草・芝とも日射量とかなりよい対応関係を示している。芝は日射の強い領域で光合成効率の低下がみられるが、これは蒸散のところで述べた水ストレスによる気孔閉塞に対応しているものと考えられる。また水蒸気量と同様、土壌水分によっても若干の影響を受けているように思われる。

(c) 熱量 図4に示されるように熱フラックスは雑草と芝でかなり異なる。雑草は水蒸気ソース量の小さいうちにはむしろ加熱効果が顕著に働き、その後水蒸気ソース量の

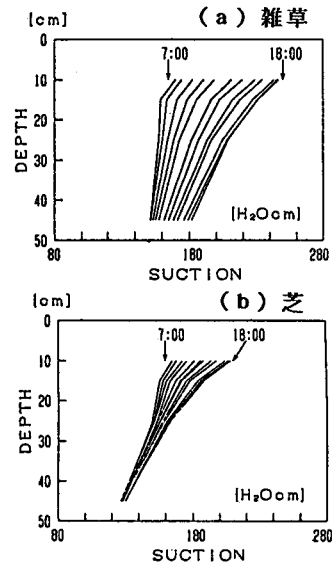


図-2 土壌サクション分布の日変化

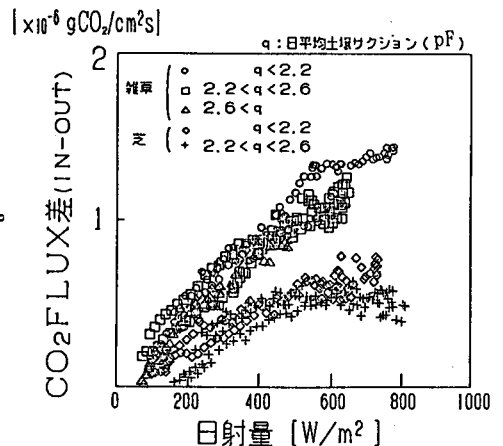


図-3 日射と CO_2 シンク

増加と共に冷却効果が卓越してきて次第に飽和形になる傾向にある。また異なる日で比較すると流入空気の水蒸気温度が高い日ほど冷却効果が大きく、台風前などのように流入空気の水蒸気温度が比較的低い日は加熱効果が卓越している。一方、芝はつねに加熱効果が卓越している傾向にあり、潜熱効果の影響が顕著でない。両者の違いを検討するために、雑草と芝の葉温の日変化の一例を図5に示そう。これをみると雑草は群落下方ほど葉温が低く、その振幅も芝に比べて小さい。一方芝は日中の葉温は雑草よりかなり高温化しており、雑草の葉がトータルとして熱のシンクとして働いているのになら、芝はむしろ熱のソース源となっていることが考えられる。すなわち雑草は水蒸気ソース量が大きいと同時に群落内で日射が十分遮蔽されていくのになら、芝はいずれの効果も弱い。それが両者の違いとなってあらわれていると考えられる。地面温度の日変化の一例を図6(a)(b)に示す。芝は地温の振幅が雑草に比べて大きい、これは日射が地表面までに十分に減衰しないことに対応している。

2-2-2 雑草内における鉛直物質移動

植生による気候緩和効果を、雑草(草丈40cm)における鉛直物質移動から考察してみた。熱、CO₂、水蒸気量の鉛直フラックスは(1)式のように表せる。ここで拡散係数は植生内の成層状態の影響を無視すれば、運動量拡散係数と等しいと見なせる。今回はそのような仮定のもとで解析を行った。

運動量フラックス、及び拡散係数に対する式を(2)(3)(4)に示す。拡散係数の鉛直分布は葉面積密度、風速、の実測値からマルカット法により逆推定した²⁾。それらの結果を図7(a)(b)(c)に示す。

$$F_z = K \frac{\partial F}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial u}{\partial z} \right) = c_m s u^2 \quad (2)$$

$$K = L^2 \left(\frac{d u}{d z} \right) + \nu \quad (3)$$

$$L = \frac{2 \kappa^3}{c_m s} \quad (4)$$

u	風速	c _m	抵抗係数
s	葉面積密度	κ	カルマン定数
K	拡散係数	z	高さ
ν	分子粘性係数	F _z	物理量フラックス
L	混合距離	F	物理量

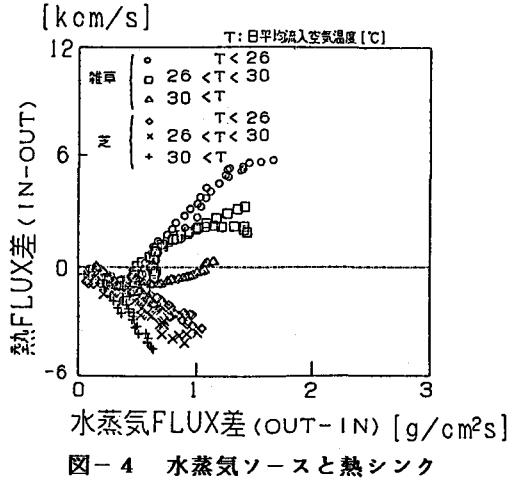


図-4 水蒸気ソースと熱シンク

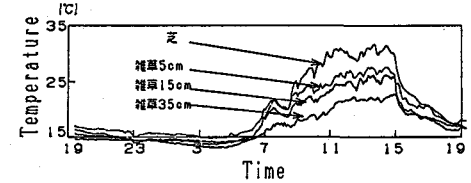


図-5 葉温の日変化

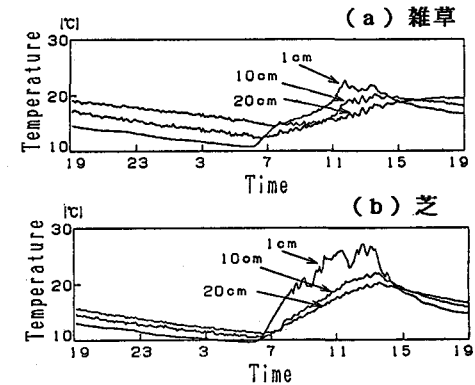


図-6 地温の日変化

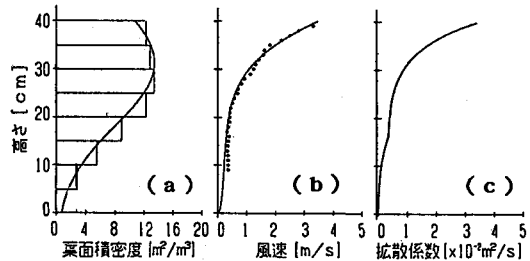


図-7 拡散係数の同定

CO₂、熱、水蒸気量の鉛直フラックスの時間変化の一例を図8に示す。いずれの場合も葉面積密度の非常に大きい群落上方で大きな物質移動が起こっていることがわかる。CO₂は群落上方で下方向に、逆に群落の下方では上向きに移動している。水蒸気は鉛直上方にむかって移動する。

熱フラックスの分布は植生上部で下向きに熱移動が起こるようないわゆる方射型の分布を示している。このような熱移動形態は堀江6) (1981)の一次元解析や、Monteith4) (1976)、などによる水稻や大麦など(本実験で用いたチカラシバも稲と似た構造を持つ)の現地気温観測値と定性的によく似ている。

これらの結果より外部(校舎周辺)から風洞に流入してくる暖気は、植生内部に向け顕熱の形で下方移動していく。そして葉面における蒸散効果によって潜熱に変換され、上方に向けて逆に放出される。その結果冷却された空気が風洞外へ放出されると考えられる。

3 気候緩和効果の数値実験

植生微気象数値モデル(NEOSPAM)1)2)を用いて植生群落の配置間隔の異なる4通りのパターンにつ

いて数値実験を行い、植生群落の配置が気候緩和効果にどの様に影響を及ぼすかを比較検討してみた。

3-1 数値実験概要

トータルの植生量(全葉面積)は等しいが植生の配置方法がそれぞれ異なる4ケースについて2次元気候緩和計算を行い、気候緩和効果の効率について比較検討した。(a)(b)(c)の3ケースは、葉面積密度が同じ(5(m²/m³))植生を用い、群落の配置間隔だけを変えて比較したものである。裸地と植生の床占有面積比率はいずれも1:1であり(a)(b)(c)の順に植生の散在化が2倍ずつ強まっている。(ここで葉面積密度とは単位空間に占める葉の面積のことで、葉の繁茂度の指標である。)(d)は(a)(b)(c)とは異なり、地表面をすべて植生が覆っているとすると、その葉面積密度が(a)(b)(c)の半分の植生を用いた場合の比較計算である。図9に今回計算を行った4通りのパターンを示す。左右の境界はいずれも周期境界条件を課しており図のような植生パターンが水平方向に無限に続いているものと見なす。

計算に用いた主な計算パラメータを表1に示す。葉面積密度は鉛直方向に一律とした。表に示した一定の入力条件のもとで場がほぼ定常状態になるまで計算を行った。

3-2 計算結果

風速場の計算結果を図10に示す。群落の密集度の高いケース(a)は群落外の裸地域で風速が大きく、逆に群落内風速の減衰が大きい。すなわち群落内外の風速の非一様性が目立つ。それに対して(b)(c)と散在化がすすむにつれて風速の非一様性は解消され群落内外での風速が一様化してくると同時に、群落内風速そのものの減衰も小さくなっていることがわかる。このことから散在化した場合の方が群落内と群落外における物質交換は速やかに行われるものと考えられる。一方ケース(d)は葉面積密度が半分なので葉による抵抗が小さく風速の減衰が一番小さくなっている。

気温場の計算結果を図11に示す。まずケース(a)(b)(c)に関しては、散在化が進むほど図のハッチで示した気温の低下領域がより広域に及んでいるのがわかる。ところが(d)に関しては群落下部で気温低下がみられるものの、群落内の中程からやや上部ですでに気温の上昇域がみられ、単純に(a)(b)(c)とは比較できない。そこで各植生断面での気流温度と葉温の差の分布を図12に示す。またその温度差による葉の熱シンク

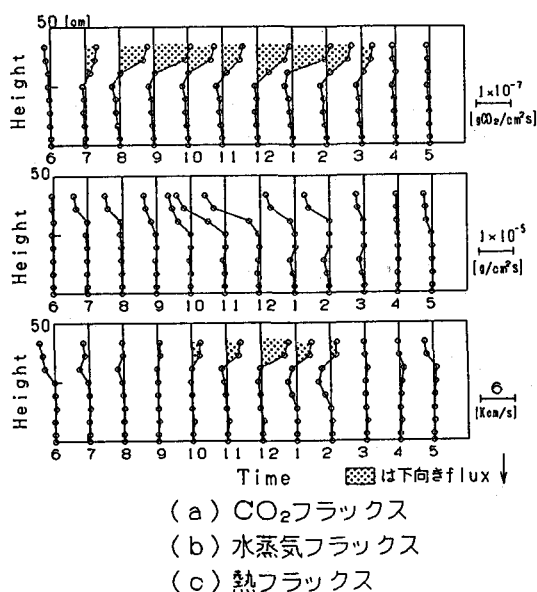
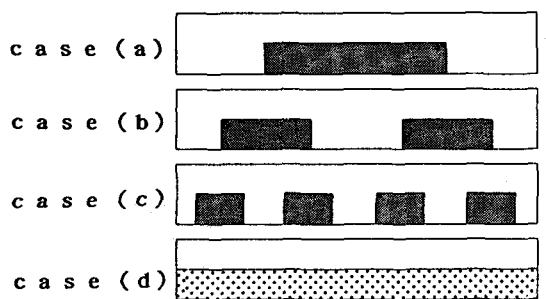


図-8 鉛直フラックスの日変化



■ 葉面積密度 5 [m^2/m^2] (a) (b) (c)
 □ 葉面積密度 2.5 [m^2/m^2] (d)

図-9 計算領域

基準風速	2 (m/s)
日射量	850 (W/m^2)
基準温度	30 ($^{\circ}\text{C}$)
葉面積密度	鉛直一様 5と2.5 (m^2/m^2)
植生高さ	2 (m)
一周期長 (L)	20 (m)

表-1 主な計算条件

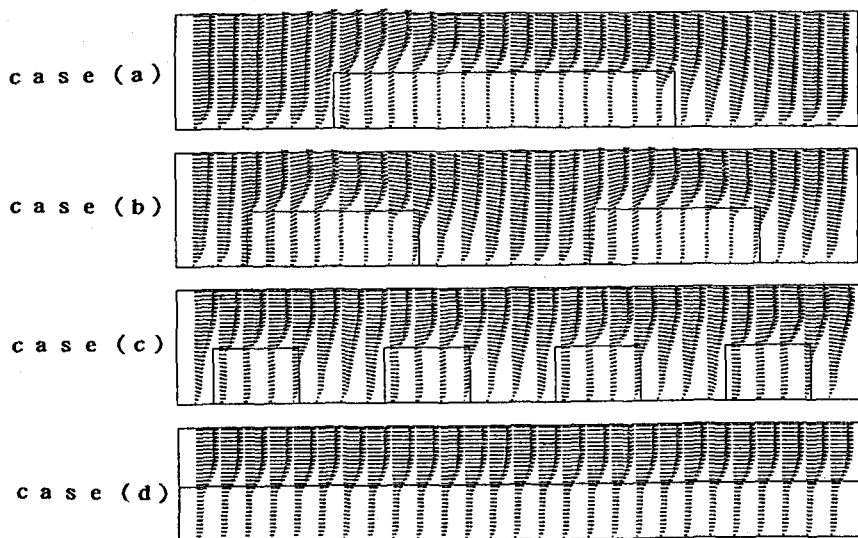
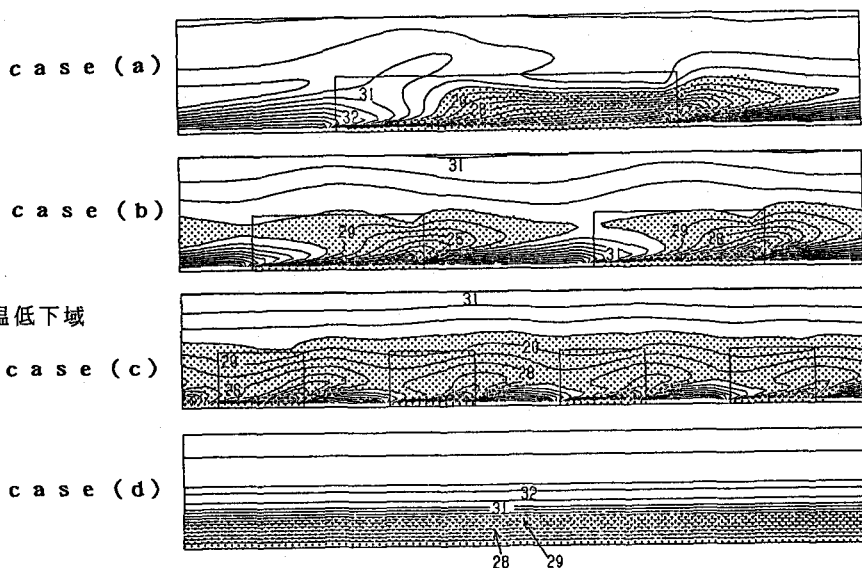


図-10 風速場



□□□ は気温低下域

図-11 気温場

量の空間積分（葉による熱シンクのトータル量）を地表面積で除した値を表2に掲げる。いずれも葉温は群落上端で気流温度よりやや高温化する以外は気流温度より低温化し熱シンクとして働く。

いま熱シンク量を単純に気候緩和の指標と見なせば、(a) (b) (c) と散在化とともに気候緩和効果の効率が増している。一方葉面積密度が半分の(d)は最も効率が悪いことがわかる。

まず (a) (b) (c) の順に群落の散在化が気候緩和効果を促進する理由について説明する。ひとつは風速場からも類推されるように、植生内の影響が気流の一様化によって、より効率的に移流伝達されること、もう一つは群落内の風速が大きくなることによって植物の蒸発散作用そのものが助長されたことによるものと考えられる。図13は各植生内断面の単位葉面積当りの水蒸気ソース量の分布を表したものである。また葉の水蒸気ソース量の空間積分（葉による蒸散のトータル量）を地表面積で除した値を表3に掲げる。これらを見ると確かに (a) (b) (c) と散在化に対応して蒸散活動が促進されていることがわかる。

つぎに (d) の気候緩和効果が他に比べて低いことについて説明する。蒸散量は図13、表2よりわかるように通風性の増加にともない4ケース中最大である。ところが図14の植生内日射量をみてわかるように、葉面積密度が低いため日射の遮蔽効果が悪く、蒸散効果以上の熱のインプットがあるために気候緩和の効率が悪くなっているものと考えられる。（葉面積密度をパラメータとした場合、日射の遮蔽効果と潜熱効果の観点から、最大気候緩和効率を与える葉面積密度が存在するものと考えられる。）

以上、基本的には葉面積密度が一定の場合は物質交換や生物蒸散の点からは植生群落を散在化させた方が気候緩和効果の効率の面では望ましいようである。一方、その際の葉面積密度は日射の遮断効果と潜熱交換の観点から決める必要があると考えられる。

表-2

	CASE (a)	CASE (b)	CASE (c)	CASE (d)
総熱シンク/L [J/m ² s]	10.8	25.6	35.4	2.96

表-3

	CASE (a)	CASE (b)	CASE (c)	CASE (d)
総蒸散量/L [g/m ² s]	0.21	0.24	0.27	0.30

4・終わりに

本研究は科学研究費「一般研究(A)63420042」(代表者日野幹雄)の補助を受けたものであり深く感謝したい。

5. 参考文献

- 1) 神田・日野(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pp685~690
- 2) 日野・神田(1989): 風洞付ライシメーターによる植生の気候緩和実験、水文・水資源学会誌、vol.2
- 3) 神田・日野(1989): 植生微気象モデル(NKOSPAM)による数値実験、第44回土木工学年次講演会概要集
- 4) MONTEITH, J. L. (1973): PRINCIPLES OF ENVIRONMENTAL PHYSICS
- 5) 矢吹萬(1985): 植物の動的環境、朝倉書店
- 6) 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

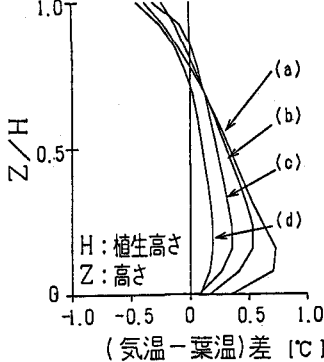


図-12 葉温と気温の差分布

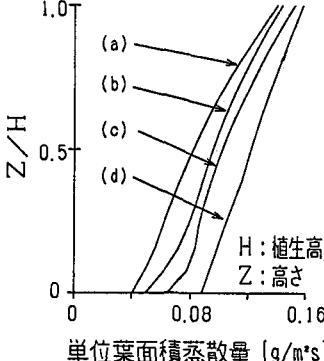


図-13 蒸散量分布

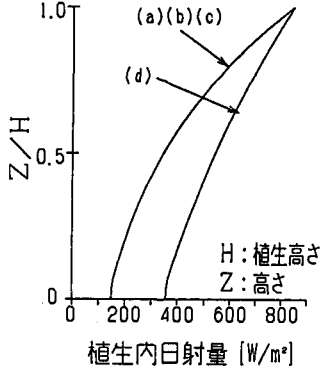


図-14 植生内日射量