

森林と草地の夏期の熱環境について

Observation of summer heat environment in vegetated area.

宮田 正史*・池田 駿介**・佐々木 哲也***

By Masafumi MIYATA, Syunsuke IKEDA, Tetsuya SASAKI

Meteorological field observations were performed in the Ara River to study the effect of vegetation (trees and grasses) on urban meteorological environment in summer. In those observations, velocity, temperature and humidity profiles were measured by using lifting balloons. Momentum, heat and vapor fluxes were derived from the observed data. The results reveal the process of heat exchange between the atmosphere and the vegetation. It is found that the atmosphere is cooled by transpiration of both trees and grasses.

Keywords: heat environment, field observation, vegetation, transpiration

1. 緒言

都市内の気温はヒートアイランド現象により、周囲より高温に保たれている。特に夏期においては、熱帯夜の増加や電力需要の逼迫などの一因となっており、その被害は顕著である。一方で、水面や緑地は都市の気象環境を緩和する効果を持ちクールアイランドと呼ばれている。都市内では残された水面や緑地は、河川敷や公園等に限られるが、近年のアメニティの増大や環境保護の高まり等を考慮すると、これらの水面や緑地を積極的に利用することが望ましいと思われる。

本研究では、夏期における河川高水敷内の緑地（森林と草地）の気象緩和機能を調べるために、森林と草地および周辺市街地の気象観測を行った。本稿ではその結果を報告するとともに、解析データの結果を通して森林と草地の熱環境の特性および緑地と周辺市街地との熱環境の相違を明らかにする。すなわち日中、草地では植生からの蒸発散により地表面近傍の気温の上昇が抑制されていること、また森林においては蒸発散の効果の他に日射が遮断されることにより森林内の気温上昇が抑制されていること、さらに森林と草地の蒸発散の効果のため、夏期の河川高水敷は周辺市街地に較べて気温が低く、クールアイランドとして機能していることを示す。

* 学生会員 東京工業大学大学院 土木工学専攻
** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)
*** 東京工業大学 工学部土木工学科

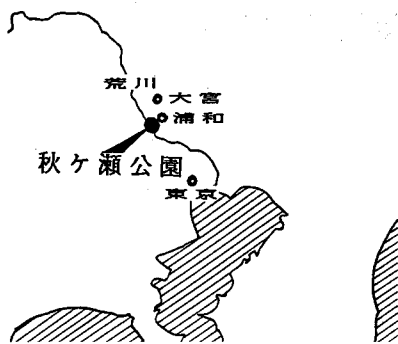


図-1 観測地点

2. 観測概要

観測は1993年7月29日の6時～17時30分にかけて、埼玉県浦和市の荒川河川敷内の秋ヶ瀬公園（羽根倉橋～秋ヶ瀬橋間，37km付近）において実施した（図-1）。公園には森林と草地およびグラウンドが多く存在しており，周辺住民の憩いの場となっている。観測対象の森林は樹高10～15mのハンの木林であるが，他の樹木や低木も多い自然林である。樹木の密生度は大きく，うっそうとした森林である。草地は高さ2～3cm程度の車前草と他の雑草が密に生えている平坦地である。

観測当日の関東地方の天気は晴天であった。しかし観測日の3日前までは，梅雨のため降雨が多く，森林と草地の土壌は湿潤していた。観測地点を図-2に示す。なお図中の斜線部は森林帯を示している。

観測は森林と草地及び公園周辺を対象として，以下に示す3種類の方法で行った。a) 地上60mまでの温度，湿度，風速の鉛直分布を係

留気球に設置した計測器により測定する。この測定は草地と森林中の2点（K1とK2）で行う。b) 地上6mまでの温度，湿度，風速および地中温度の定点観測を行う。この測定も草地と森林中の2点（P1とP2）で行う。そ

の他に，草地の日射量と長波放射量と正味放射量の測定を行う。c) 公園周辺の温度と湿度を調べるために，ポータブル温湿度計を用いた移動観測（S1～S5）を行う。

以上が観測の概要である。観測項目・方法・データの整理方法の詳細を表-1に示す。

3. 観測結果

3.1 観測日の概況

草地の定点観測により得られた日射量，風向，風速の日変化を図-3に示す。日射量（短波放射）の日変化は，一般的な晴天日の分布に近い。しかし午前11時頃からは，若干の雲が出現したため日射量が多少変動した。また図には記していないが，大気放射（長波放射）量は日中を通してほぼ一定（約420 W/m²）であった。

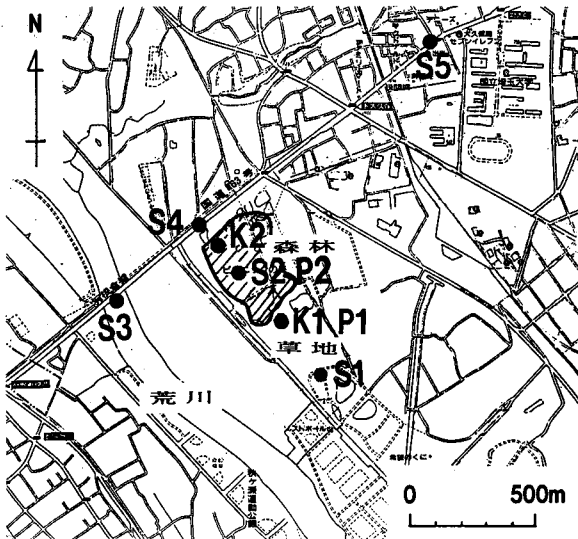


図-2 観測機器の配置

表-1 観測項目・方法・データ処理方法

観測地点	観測項目	測定高さ(m)	観測機器	観測間隔	データ処理
K1, K2 (係留気球)	風速	1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60	三杯式風速計 白金温度計 高分子誘電式湿度計	1時間	各高さ 1分平均
P1 (草地)	風向 風速 気温・湿度 放射収支 日射量 赤外放射量 地表温度 地中熱伝導 地中温度	2.3 0.15, 0.4, 1.0, 6.0 0.2, 0.6, 1.25, 6.0 2.22 2.24 2.24 5.10(cm) 1, 2, 5, 10 15, 25, 40(cm)	矢羽式風向計 三杯式風速計 白金温度計 高分子誘電式湿度計 放射収支計 日射計 赤外放射計 放射温度計 熱流計 サーミスタ温度計	30分 30分 30分 30分 30分 30分 30分 30分 30分 15分	30分平均 30分平均 30分平均 30分平均 30分平均 30分平均 30分平均 30分平均 30分平均 直統平均値
P2 (森林)	風速 気温・湿度 日射量 地表温度 地中熱伝導 地中温度	1, 2, 2.2, 3.2, 4, 2.5, 2.6, 2 1.0, 2.4, 6.2 2.38 2(cm) 1, 2, 6, 4, 7, 11.5(cm)	熱線風速計 日射計 放射温度計 熱流計 サーミスタ温度計	30分 30分 30分 15分 30分 15分	30分平均 30分平均 30分平均 30分平均 30分平均 直統平均値
S1～S5 (移動観測)	気温・湿度	1.2	ポータブル温湿度計	1時間	直統平均値

風向と風速に着目すると、午前中は風速が小さく風向は一定にはならない。しかし正午から夕方にかけては海風が卓越して風速は徐々に大きくなり、風向はほぼ東向きで安定していた。次に草地で観測された気温、湿度および水蒸気量の日変化を図-4に示す。気温は午後2時頃に最大となった。湿度は気温の上昇に伴って一担低下するが、夕方になり気温の低下とともに再び高くなる。水蒸気量に関しては、午前9時頃と午後1時頃の2点でピークを有する日変化を示した。9時のピークは日射量の増加に伴う植生からの蒸散と、地表面および植生葉面に付着している水滴からの蒸発が原因であると考えられる。水滴は、観測当日の午前3時頃に多量の露が降りた時に付着したものである。

3. 2 草地と森林の風速・水蒸気量

・気温・地中温度の鉛直分布

この節では気球観測と定点観測の結果より、夏期の森林と草地の熱環境の特徴を捉える。代表的な結果として、図-5 (a), (b), (c) に11時, 15時, 17時における草地と森林の風速 U , 水蒸気量 P_v , 気温 T および地中温度 T_s の鉛直分布を示す。図中の○印は草地(観測点K1), ×印は森林(観測点K2)の観測結果を示す。

a) 午前11時: 風速は小さい。気温の鉛直分布より草地では地表面から、森林では樹冠部分から大気が暖め

られていることがわかる。従って森林内の気温の最大値は、葉量が多い高度(約10m)で現れる。一方森林内の下層の気温は樹冠部分から地表に向けて小さくなり、地表面付近の気温は樹冠層より 1.5°C も低い。このように森林内の下層では、大気安定層が形成されていることが確かめられた。日中を通してこの安定層は維持された。水蒸気量は全高度にわたって森林の方が多くなった。b) 午後15時: 風速は午前中に較べて大きくなるが、森林内の風速はほとんど変化しない。森林樹冠部で運動量の大部分が吸収されてしまうためである。森林帯の上空では、草地に較べて気温が $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ 程度高い。これは森林樹冠部の葉温の上昇が、森林上層の大気を暖めていることを示唆している。この傾向は日射量が多い他の時間帯においても認められた。次に森林の水蒸気量の分布をみると、林内の地表面から急な勾配を持つ分布となった。従って森林内の平均的な水蒸気フラックスは、どの高度においても上向きであると考えられる。また森林の地表面温度は林内の気温より低いので、林内下層部では顕熱は下向きになっていると考えられる。地表面温度は午前11時には草地の方が 10°C 程度高いが、その差は日没に向けて徐々に小さくなってゆく。c) 午後17時: 気温分布は一定となり、大気は中立に近い成層を形成している。森林と草地の上空の気温差は夕方になり小さくなる。これは日射量が小さくなり、森林樹冠からの上空大気への顕熱移動量が小さくなったためと考えられる。草地と森林の水蒸気量はともに、植生からの蒸散が少なくなるため減少する。地中温度の分布より、草地では地表面付近から地温が低下していくことがわかる。

観測結果より、夏期の森林の熱環境の特徴として、森林内の顕熱は樹冠部より上方では上向きに、下方では下向きに輸送されること、さらに潜熱は森林内のどの高度においても上向きであるため、日射の遮断とともに林内の気温上昇を抑制していることが示唆された。

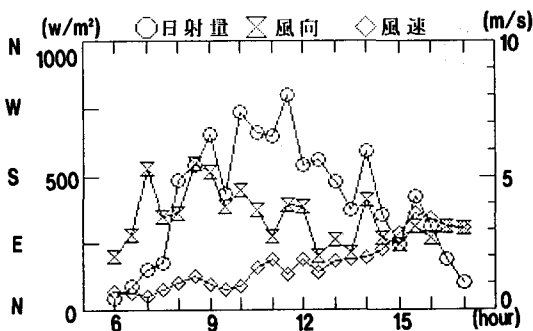


図-3 草地で観測された日射量, 風向, 風速の日変化

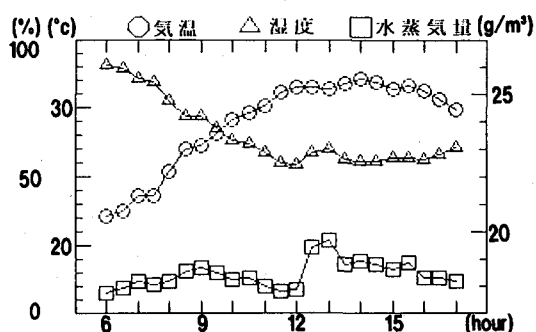


図-4 草地で観測された温度, 湿度, 水蒸気量の日変化

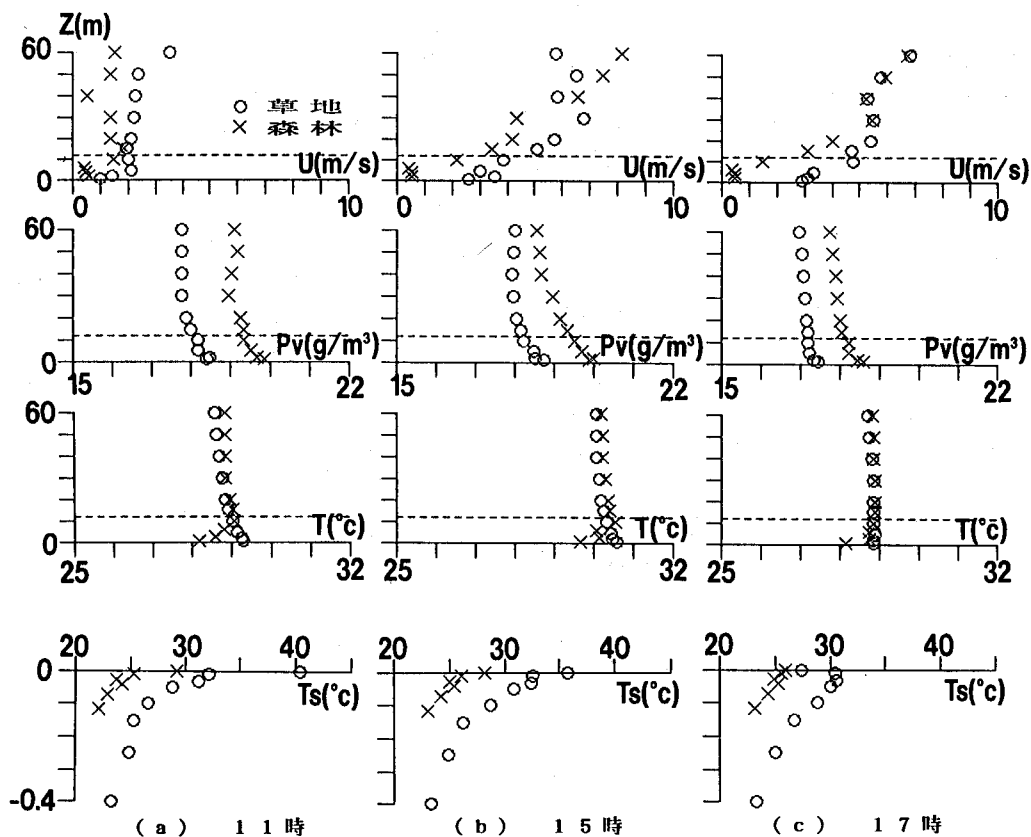


図-5 風速、水蒸気量、気温、地中温度の鉛直分布

3.3 草地の熱収支

この節では、草地の熱環境の特性を熱収支解析を行うことにより評価し、草地が大気冷却に果たす役割を示す。熱収支解析では対象とする表面に流入出する熱量 (W/m^2)、すなわち正味放射量 R_{net} 、顕熱量 H 、潜熱量 ℓE (但し ℓ は水の気化熱 (J/g)、 E は蒸発量 ($g/m^2/s$)) および地中伝導熱量 G のバランスを表す式 (1) を考える。左辺の正味放射量は地表面が獲得する正味の放射エネルギーであり、式 (2) で表現される。

$$R_{net} = H + \ell E + G, \quad R_{net} = (1 - \alpha) S \downarrow + L \downarrow - \sigma T_0^4 \quad (1), (2)$$

ここに、 $S \downarrow$: 日射量 (W/m^2)、 $L \downarrow$: 大気からの長波放射 (W/m^2)、 α : 地表面のアルベド (反射率)、 σ : ステファン・ボルツマン定数、 T_0 : 地表面温度 (K) である。式 (1) の各熱量は以下に示す方法で求める。 R_{net} は熱収支計により直接測定を行う。 H と ℓE はポール観測によって得られる風速、気温、水蒸気量の鉛直分布から傾度法¹⁾を用いて求める。さらに G は地中温度と熱流計の観測値を用いて求める。

草地の熱収支の日変化を示したものが図-6である。日中の正味放射量の大部分が潜熱 ℓE に変換されている。これは植生からの蒸散が盛んに行われていることに対応している。この結果、地表面付近の熱が奪われ、地表面温度の上昇は抑制される。従って顕熱は小さく (最大約 $100 W/m^2$) なる。夏期におけるコンクリートやアスファルトの日中の顕熱は各々 160 、 $300 W/m^2$ にも及ぶので²⁾、地表面付近の気温を下げるという観点で見れば、草地の効果は大きい。さらに植生からの蒸散と地表面からの蒸発が日没まで続くため、潜熱は夕方においても大きな値をとる。よって顕熱は午後16時には負の値をとるようになり、大気から土壌に顕熱が移動し始める。これは夏期のアスファルトの顕熱が一日中正の値²⁾となり、大気を暖めていることとは対照

的である。一方地中伝導熱は午前9時過ぎに最大となる。これは前節で示したように、午前中において地中温度と地表面温度の差が大きいためである。また土壌が比較的湿潤していたため、最大値が 180W/m^2 程度とかなり大きい値をとった。

3. 4 森林の顕熱、潜熱、地中伝導熱

ここでは前節と同様な方法で森林植被上（キャノピー上）からの顕熱量、潜熱量および地中伝導熱量を求める。森林植被上からの潜熱と顕熱を草地と同じ方法で求めるが、以下に記す問題点がある。a) 森林樹高が高く、計器設置の都合により植被面上での R_{net} の計測が不可能であったこと。b) 気球観測の計測は1点につき1分間と短いこと。c) 気球観測のため観測機器の高度が正確に一定でないこと。これらの理由のため特に森林上の摩擦速度が正確に見積れない。すなわち地表面修正高さ d と粗度高さ z_0 が風速分布より正確に求められない。しかし既往の観測結果により地表面修正高さ d と樹高 H の関係はおおよそ与えられるので、今回は地表面修正高さ d を樹高（約12m）の0.9倍として与えた。これにより植被面上からの顕熱と潜熱を、解析可能なデータについて計算した。傾度法を適用した際の16時における風速、気温および水蒸気量の鉛直分布を図-7に示す。図中の実線が普遍関数をあてはめたものである。

図-8に森林植被面からの顕熱、潜熱および地中伝導熱の日変化を示す。草地の場合と同様に潜熱が顕熱に較べて非常に大きく、植被面からの蒸発散が活発だったことがわかる。森林からの潜熱と顕熱の割合は土壌水分や季節等によって変化するが、夏期においては正味放射量の大部分が潜熱と

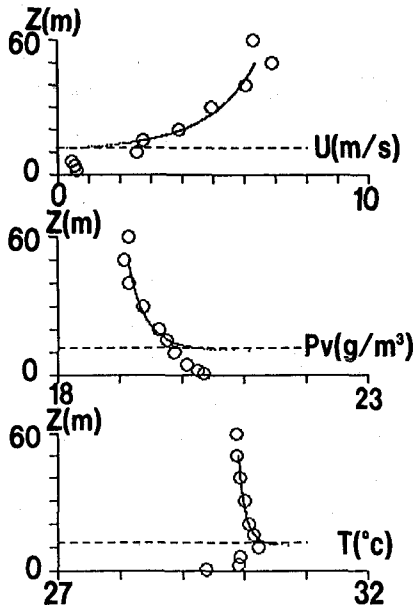


図-7 森林で観測された風速、水蒸気量、気温の鉛直分布（16時）
実線は普遍関数をあてはめたもの

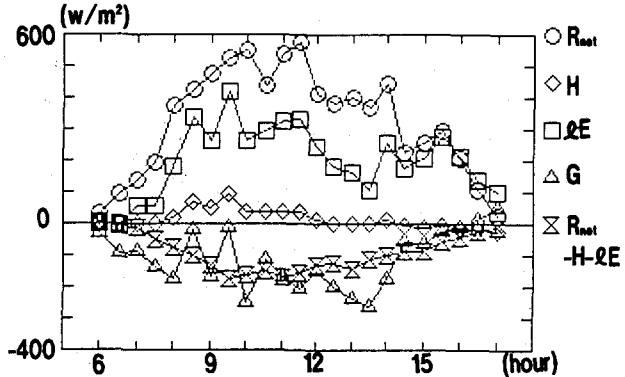


図-6 草地の熱収支の日変化
 R_{net} は地表面に入る場合を正、 H と LE は地表面から出る場合を正、 G は地下に入る場合を負とする

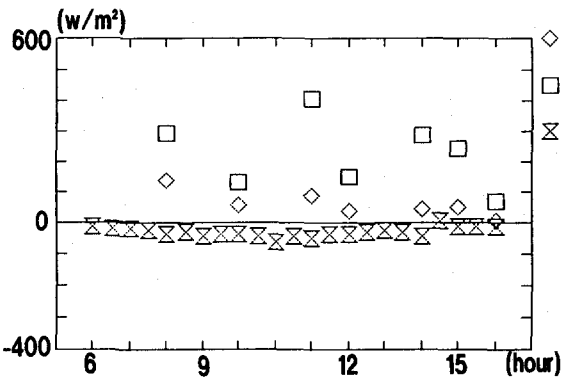


図-8 森林の顕熱、潜熱、地中伝導熱の日変化
 H と LE は植被面から出る場合を正、 G は地下に入る場合を負とする

して分配されることがわかる。さらに森林内では葉による蒸散のため、葉温の高温化が防がれ顕熱を小さくしていると考えられる。地中伝導熱は日中を通して小さい値をとった。草地の約1/3の大きさである。このため草地に較べて地中温度の上昇はかなり抑えられる。

3. 5 高水敷周辺の気温・水蒸気量

この節では移動観測による気温と水蒸気量の計測結果を示す。図-9に観測地点別の気温の日変化を示す。観測地点S1は草地、S2は森林内、S3は河川上の橋梁、S5は市街地を示している。この結果より日中の森林内(S2)の気温は市街地と較べて約2°C~3°Cも低いことがわかる。日射の遮断と葉からの蒸散が林内の気温上昇を抑制しているためである。また森林内では日射が弱く、人が実際に感じる体感温度はさらに低いと考えられる。一方草地(S1)の気温は市街地(S5)に較べて約1°C~2°C低い。草地の蒸発散の効果によって、これだけの気温上昇の抑制効果があるのは非常に興味深い。さらに河川上の橋梁(S3)では交通量が多く熱の排出が多いも関わらず、市街地よりも気温が1°C~2°C程度低い。これは水面と草地が周辺の気温上昇を抑制していることを示唆している。

最後に、水蒸気量の日変化を図-10に示す。森林内の水蒸気量は、他の場所に較べて午後ではかなり多い。日射によって蒸発散が盛んに起ったためであると考えられる。

4. 結語

河川高水敷の森林と草地および周辺市街地の気象観測を行うことにより、夏期における森林と草地の熱環境の特性を明らかにした。すなわち日中、草地では植生からの蒸発散により地表面近傍の気温の上昇が抑制されていること、また森林においては蒸発散の効果他に日射が遮断されることにより森林内の気温上昇が抑制されていることが明らかになった。さらに森林と草地の蒸発散の効果のため、夏期の河川高水敷は周辺市街地に較べて気温が低く、クールアイランドとして機能していることを明らかにした。

最後に、1993年に実施した気象観測に際しては、建設省荒川上流工事事務所、埼玉県公園緑地課、浦和公園事務所および東京工業大学水工研の諸氏から多大な協力を頂いた。なお、本研究は文部省科学研究費一般研究B(池田駿介:05452244)の補助を受けた。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) Brutsaert, W :Evaporation into the atmosphere, Kluwer Academic Publishers, p.299,1982.
- 2) 浅枝 隆, 藤野 毅:舗装面の熱収支と蓄熱特性について, 水文・水資源学会誌, Vol. 5, No. 4, pp. 3-7, 1992.

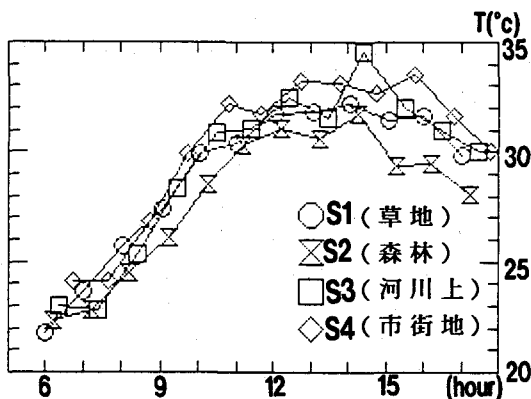


図-9 気温の日変化

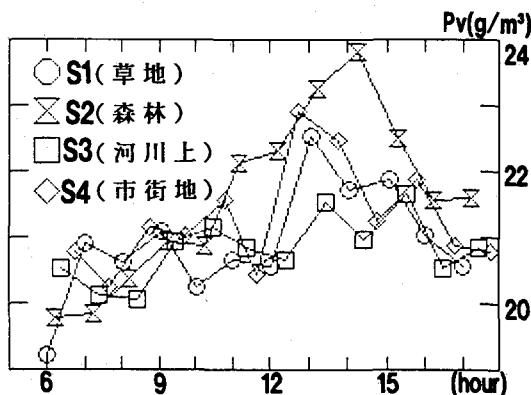


図-10 水蒸気量の日変化