

大気と地表面間におけるエネルギー交換過程の観測 (1)

光田 寧・池淵 周一・田中 正昭
文字 信貴・小尻 利治

AN OBSERVATIONAL STUDY OF THE ENERGY EXCHANGE PROCESS AT THE AIR-GROUND INTERFACE (1)

By Yasushi MITSUTA, Shuichi Ikebuchi, Masaaki TANAKA,
Nobutaka MONJI and Toshiharu KOJIRI

Synopsis

Preliminary results obtained at the air-ground interaction observing facility are discussed. Various instruments to cover the measurements of the energy and water budgets at the surface were installed and continuous measurements have been started. Results from the intensive observation which includes the turbulence measurements indicates possibility of the parameterization of the energy fluxes near the ground surface, i.e., the normalized eddy diffusivities of momentum, sensible heat and water vapor are shown as the functions of Richardson number.

Water contents in the soil are measured with soil temperature continuously. The relation between the water content and the soil temperature diffusivity are discussed.

1. は じ め に

地球の表面におけるエネルギーの交換過程を明らかにするためには、地表面付近の熱収支と水収支との研究を同時に進めて行く必要がある。降水や蒸発による水の移動は同時に熱の移動をもたらす一方で、太陽放射、大気乱流、地中の温度特性などが蒸発を支配するなど、現象の間には互いに深い関係がある。従って、それらに関連する量を全て、しかも長期にわたって観測してその相互作用を明らかにすることによって初めてエネルギー交換過程を解明する事が可能である。しかしながら現実には降雨中の乱流観測が容易でない事、地中の水分を長期間連続測定できる高精度な計測器が開発されていない事、降雨や地中の水分の移動による熱の輸送に適当な測定手段がない事など多くの未解決な問題が残されているため、早急には全てを解明できないことは明らかである。しかし、少しずつでも関連した知識を集積して行くことには大きな意義がある。

接地気層内の乱流輸送に関しては過去に数多くの研究が行われて来ており、海外でも米国カンザスの平原において実施された空軍の研究グループの観測的研究¹⁾²⁾や、オーストラリアの CSIRO のグループによる幾つかの観測的研究³⁾、また国内では熱収支の各項目を全て観測により求める研究⁴⁾ などにおいて大きな進展が見られた。しかしながら、観測はある特定の数日間に限られる場合が多く、しかも地表面の極く近傍の測定には満足の得られるものが少ない。さらに地中の水分の移動まで含めた長期観測はほとんど行われていない。

この研究の目的は、地表面とその近傍におけるエネルギー交換過程を、できるだけ多様な気象条件下において地上及び地中の両方からの観測事実に基づいて明らかにする事である。すなわち、長期間連続して大気

中、地中の温湿度分布、放射収支の測定を行う一方、種々の季節において乱流観測による輸送量の直接測定を実施し、両者を組合せることにより一般的に輸送量のパラメタリゼーションを可能とする知識を得ることにある。

観測設備の準備は昭和59年度より開始し、設備充実の途上において予備的な観測を行い、その結果については1985年にも報告した⁵⁾。今回行った観測は設備がほぼ完成して初めてのものである。得られた資料も調査途中の結果が多いが、限られた季節の観測例の中間報告として述べる。

2. 観測設備と観測方法

地表面における熱収支及び水収支を同時に長期間観測するための設備を京都大学防災研究所の暴風雨災害部門、水資源研究センター、内水災害部門が協力して開発にあたり、昭和60年度にそれをほぼ完成し、現在測定を開始している。その設備の展開されている宇治市の京大グラウンド周辺の地形は前報⁵⁾に述べたとおりであるが、Table 1 及び Fig. 1 に観測用地内の測器の種類、目的及び配置状況を示した。観測の対象としている露場は東西に約 70 m、南北に約 50 m の広さをもつ平坦な土地であり、現在は表面の凸凹が数 cm 程度の裸地である。

敷地のほぼ中央に高さ 6 m の測風塔があり、その頂部に 2 次元超音波風速計、プロベラリ風向風速計及び水晶温度計を設置してある。測風塔の西約 4 m の位置に 2 m のポールを建て、1.5 m と 0.1 m の 2 高度にそれぞれ 2 次元超音波風速計、水晶温度計を設置した (Photo. 1)。水晶温度計は通風型であるが、その吸気口から吸い込んだ空気を分岐し、テフロンチューブで観測室内に導き、ポンプを通じて水晶露点計に接続した。2 m のポールの付近の地表面温度は、赤外線放射温度計を前述の測風塔の 3 m の高さに設置して測定できるようにした。これによって地面付近の空気中の風速、温度、湿度の勾配の平均を測定する事ができる。地表面付近の熱的構造を詳しく調べるためのレーザー加熱計が設置されており、レーザービームは約 8 cm の高さで水平に 15 m 離れた受光部で受信し、そのスポットの位置をセンサーを用いて連続記録できるように設置してある。

測風塔から東へ約 14 m 離れた位置に転倒マス雨量計、降雨強度計、及び大型蒸発計が、さらに 18 m 東の

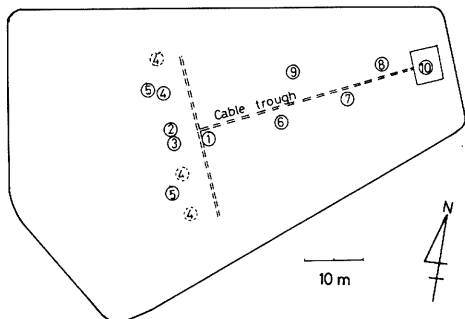


Fig. 1 Position of the instruments in the air-ground interaction observing facility. The numbers correspond to those in Table 1. (1) is 6 m tower. (10) the observation hut. The dotted line between (5) show the light pass for laser refractometer. The turbulence measurement mast (4) is movable.



Photo. 1 Turbulence instruments on the left pole and mean gradient instruments on the right pole.

Table 1 List of the instruments at the air-ground interaction observing facility.

Purpose	Instrument	Manufacturer	Model	Position in Fig. 1	Height (m)	Remarks
Turbulence	3-D sonic anemometer-thermometer (A)	Kaijo Denki	DAT-300	2	1.5	
	Infrared hygrometer (A)	Kaijo Denki	AH-100	2	1.5	wavelength 2.605 μ m
	Thermocouple psychrometer (A)	Kaijo Denki	PY-100	2	1.5	50 μ m copper-constantan
	3-D sonic anemometer-thermometer (B)	Kaijo Denki	DAT-300	4	1.5	
	Infrared hygrometer (B)	Kaijo Denki	AH-100	4	1.5	wavelength 2.605 μ m
	Thermocouple psychrometer (B)	Kaijo Denki	PY-100	4	1.5	Automatic water supply, 50 μ m
	2-D sonic anemometer (C)	Kaijo Denki	SA-200	1	6	
Mean	Propeller anemometer	Ogasawara		1	6	
	Quartz thermometer	Ogasawara	TR-800	1	6	
	2-D sonic anemometer (A)	Kaijo Denki	SA-200	3	1.5	
	Quartz thermometer (A)	Ogasawara	TR-800	3	1.5	
	Quartz dew point thermometer (A)	Yokogawa	2586	3	1.5	
	2-D sonic anemometer (B)	Kaijo Denki	SA-200	3	0.1	
	Quartz thermometer (B)	Ogasawara	TR-800	3	0.1	
	Quartz dew point thermometer (B)	Yokogawa	2586	3	0.1	
	Net radiometer	Eko	CN-1	7	1.5	Funk type
	Pyranometer (A)	Eko	MS-43F	7	1.5	
Radiation	Pyranometer (B)	Eko	MS-43F	7	1.5	
	Soil thermometer	M-system Giken	MC-160	7	-0.05, -0.1	platinum
	Heat flow transducer	Eko	CN-81	7	-0.3, -1.0	
Soil	Tensiometer	Kyowa Dengyo	BPT-1KBS	8	-0.1, -0.3	
	Soil moisture-meter	Japan Electric Instrument Chino	SM-3-5	7	-0.1, -0.2	pressure transducer
	Radiation thermometer (A)		Pyloscope L	7	1.5	surface temperature
	Radiation thermometer (B)	Micron Instrument	M 67	1	3	surface temperature
Rain	Rain gauge	Ogasawara	RE-30E	6	0	
	Rainfall intensity recorder	Ogasawara	RE-30E	6	0	
Evaporation	Evaporation pan	Ikeda	APG-100	6	0	c'ass A pan (ϕ 120 cm)
Refraction	Laser refractometer	Seikido	SLCL	5	0.1	
Room temp.	Platinum resistance thermometer	M-system Giken	MC-160	10	—	

位置にはテンショメータを付けた土壌水分計が2台地下10 cmと20 cmに埋設してある。

測風塔から東へ約26 m離れた位置には放射関係の測器、すなわちフンク型の放射収支計、日射計、及び地表面に向けた赤外線放射温度計が配置してある。日射計は同種のものが2台あり、上下方向に設置してアルベードの測定が可能である。放射計のほぼ真下の土中には深さ5, 10, 30, 100 cmに白金線抵抗温度計を埋設して地中の温度プロファイルを、さらにその近くで深さ10及び30 cmに熱電堆型熱流板を埋設して地中の熱の移動の測定を行っている。

以上に述べた計測器からの信号は敷地のほぼ中央を通る信号用の溝を通して観測地の東端に設けた観測室に導き、打点記録計及びカセット式磁気テープ記録装置に連続して収録される。

乱流輸送の観測は、平均勾配測定用のポールに近接させて1.5 mのポールを建てて行なうようになっている。そのポール上には乱流観測用計測器、すなわち3次元超音波風速計、赤外線湿度計、熱電対乾湿計などを観測時に設置するように設計されている。乱流計測用のポールは2基あり、そのうち1基は南北20 mの間を5 m毎に移動して観測できるように基礎の設置と配線が行われている。乱流観測のデータ収録にはデジタルデータレコーダを用いた。この装置では、8成分の要素を10 Hzで収録した場合42分間の連続記録が可能である。乱流観測には地表面の一様性が要求されるため、測定風向に制限がある。Fig. 1の乱流観測点⑨については、北西から南東にかけての範囲内の風向を選べば地形の影響は最小に止める事ができる。ただし敷地の西端は高度差約3 mの差となって西側へ落ちているため、西端から発達する内部境界層の中に乱流計測器を配置する必要があり、測定高度は前述のように低く選ばれている。

乱流観測は長期連続観測を行う事が困難であるため、数ヶ月に1度、1〜2週間の観測期間を特に設けて測定を行うことにしている。この観測設備がほぼ完成して第1回目の観測については本文第3章に詳しく述べる。なお、設備完成途中で予備観測を実施した結果については昨年の論文³⁾に述べられている。

3. ネネルギー輸送量の観測

3.1 輸送量の算定方法

地表面における運動量や顕熱・潜熱の輸送量を観測するための最も精度の高い方法は乱流観測による渦相関法である。しかしながら、渦相関法を適用するためには膨大な量の乱流データの処理が必要であり、測定中の測器を良好な状態に保つため慎重な保守が要求される。そのため長期間多地点で測定を行う必要がある場合は、これより容易な観測方法によらなければならない。乱流輸送量測定の最も簡便な方法はバルク法と呼ばれるもので、大気中の1点と地表面での値を用いる方法である。計算方法は簡単ではあるが、予め求めておくべき抵抗係数やバルク輸送係数にまだ不確実な点がある事、さらに地表面における温湿度、特に表面湿度については陸地ではその定義さえはっきりしない事など多くの問題点を持つているため、陸地での適用には限界がある。

次に、バルク法よりも測定要素が増えるが、地面近くの数高度で風、温湿度を測定し、その勾配から輸送量を求める方法(傾度法)がある。この方法を用いるためには勾配と輸送量との関係を予め求めておかねばならない。過去に幾つかの観測結果から実験式が求められているが、それぞれ適用限界があるため、そのままどこにでも使用できるものが確立されているとは言えない。特に今回のこの設備における観測のように非常に地面に近い所の観測は数少なく、新たに実験式を作成する必要があると考えられる。

この傾度法と呼ぶべき方法は、接地層内の Monin-Obukhov の相似則を利用するもので、最低2高度における風・温湿度の平均値の観測が必要である。そして実験式の常数を求めるためには、その2高度の間の層内で乱流輸送量の観測が必要である。すなわち、運動量、顕熱及び潜熱の輸送量はそれぞれ、

$$\tau = \rho u_*^2 = \rho K_M \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \approx \rho K_M \frac{U_1 - U_2}{z_1 - z_2} \dots \dots \dots (1)$$

$$H = -C_p \rho K_H \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \approx -C_p \rho K_H \frac{\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_2}{z_1 - z_2} \dots\dots\dots (2)$$

$$E = -\rho L_E K_E \frac{\partial \bar{q}}{\partial z} \approx -\rho L_E K_E \frac{\bar{q}_1 - \bar{q}_2}{z_1 - z_2} \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。ここで、 $\bar{U}$ は平均風速、 $\bar{\theta}$ は平均温位、 $\bar{q}$ は平均比湿、 C_p は空氣の定圧比熱、 ρ は空氣の密度、 L_E は蒸発の潜熱で、各添字は二つの高度の値である事を表わす。これらの式に表れる係数、 K_M, K_H, K_E は渦拡散係数と呼ばれ、特に K_M は渦粘性係数と呼ばれている。Monin-Obukhovの相似則によれば、無次元化した拡散係数 $\phi_M^{-1} = K_M/kU_*z$ 、 $\phi_H^{-1} = K_H/kU_*z$ 及び $\phi_E^{-1} = K_E/kU_*z$ は z/L のみの関数である。ただし、 L はMonin-Obukhovの長さで $L = -T \cdot U_*^2 / kg\theta_*$ で表される。ここで、 U_* は摩擦速度、 T は平均温度、 g は重力加速度、 k はカルマン定数、 θ_* は $-H/C_p\rho U_*$ で表される量である。従って、実験的に ϕ_M^{-1} 、 ϕ_H^{-1} 、 ϕ_E^{-1} を z/L の関数として求めておき、さらに z/L をリチャードソン数 $R_t = (g/T)(\partial\bar{\theta}/\partial z)/(\partial\bar{U}/\partial z)^2$ の関数として求めておけば、2高度における風速・温湿度の測定から乱流輸送量を計算する事ができる。

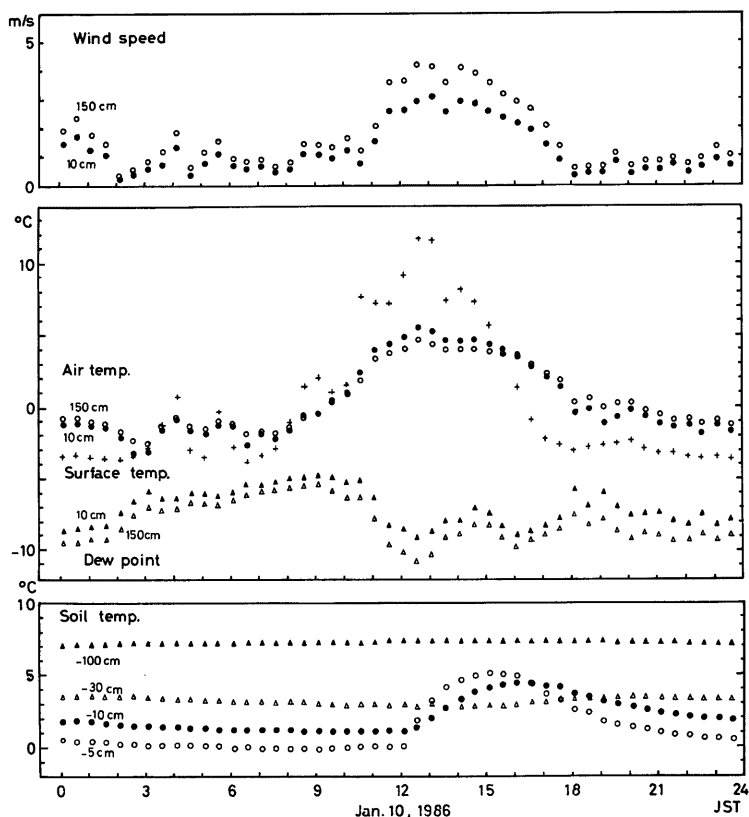


Fig. 2 An example of the diurnal variation of the mean quantities.

3.2 観測方法と観測例

1985年12月から1986年1月にかけて、条件の良い時、すなわち風向が西寄りの時を選んで観測を行った。まず、2高度における風速・温湿度の変化例(1986年1月10日の例)をFig. 2に示す。Fig. 2は10分間平均値を30分毎にプロットしたものである。2高度の気温は、8時30分頃から16時30分頃まで下層の方が高温となっており、その他は下層が低温となっているのに対し、露点温度の方は24時間中下層の方が高くなっている。さらに注目すべき事は、湿度は10時頃から減少しはじめ正午ころ最低となり、また夕方には増加する傾向を示す事である。昼間は下層の水蒸気は対流によって上に運ばれるが、それを補充するだけの水蒸気が地表から供給されない状態にある事を意味する。この現象は常時起っているわけではなく、場合によって昼間湿度の増加する時もある。どのような時にこの現象が起るのか、水収支と熱収支の両方が関係する興味深い問題であるが、現時点ではこれを解決するだけに十分な研究は進んでいない。

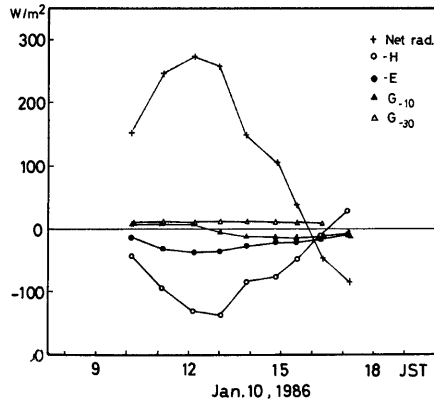


Fig. 3 An example of the variation of the heat fluxes. The fluxes are plotted as positive when they are toward the surface, and negative when off the surface.

Fig. 3に同じ日の放射収支量、顕熱輸送量、潜熱輸送量及び地中熱輸送量の時間変化を示す。乱流輸送量は渦相関法によって求めたが、一つの観測時間は42分間である。乱流輸送量の測定高度は1.5 mであるが、このような低高度で湿度変動を求めるには熱電対乾湿計は応答が充分ではないため、結果は赤外線湿度計によるものが示してある。ただし、その出力の較正は乾湿計によった⁶⁾。すなわち、両者の周波数応答特性に問題のない周波数範囲0.01~0.1 Hzの変動の標準偏差を比較することによって較正值を得た。

観測期間中は、昼の間しか条件の良い西寄りの風が吹かず、従って輸送量の測定時間帯も昼間に限られた。これから熱収支を計算すると10時から14時頃の間は放射収支量は約215 W/m²で顕熱輸送量99 W/m²と潜熱輸送量29 W/m²の和よりも大きく、従って地中への熱輸送が熱収支に大きな割合を占めることが予想される。ところが、深さ10 cmと30 cmの熱流板で測った移動は、それぞれ-2 W/m²と-11 W/m²程度でそれほど大きくなく、この時間の間は浅い層に熱が一時的に貯えられている可能性があることを示唆している。そして逆に日没後は、貯えられた熱量が放出されている可能性がある。Fig. 3に見られる傾向は、気象条件がほぼ同様であったその前日、前々日も同様であり、この期間の昼間(10~18時)のBowen比は約1.7であった。顕熱輸送の方向と昼夜で逆転するが、潜熱輸送は常に蒸発の方向にあることはFig. 2の露点温度の勾配から推測される通りの結果となっている。

3.3 拡散係数

地面付近の2高度から簡便法により乱流輸送量を求めるためには、3.1節で述べたように無次元化された渦拡散係数がリチャードソン数の関数として表されている必要がある。まず、リチャードソン数がMonin-Obukhovの相似則を満足するパラメータかどうかを見るために、 z/L との関係を求めFig. 4に示した。冬の観測例で十分に幅広い安定度は得られていないが、両者の間には明らかな一意的関係が存在することがわかる。なお、この図において z の値としては $(z_2 - z_1)/\ln(z_2/z_1) = 52$ cmを用いている。 z/L と Ri との関係については過去にも観測例はあるが、今回の観測例のように地表に極く近い例はほとんど無く、確立された関係はいまだに得られていない。

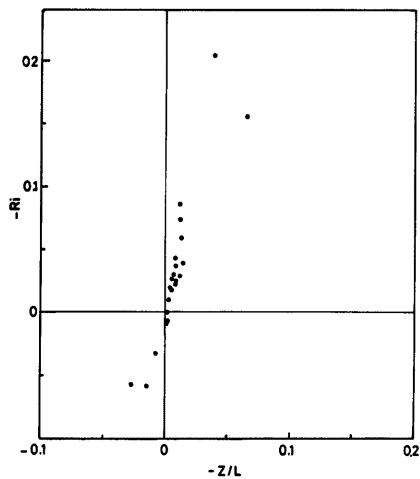


Fig. 4 Relation between Ri and z/L .

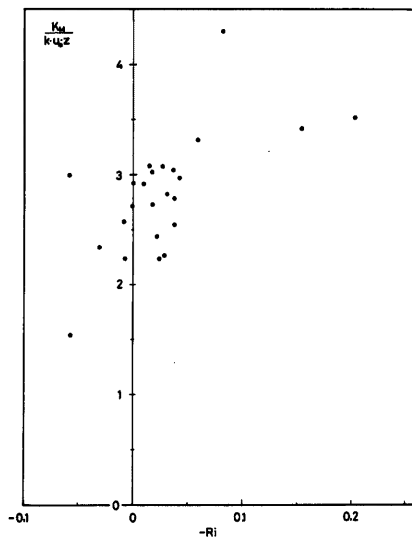


Fig. 5 Normalized eddy viscosity as a function of Ri .

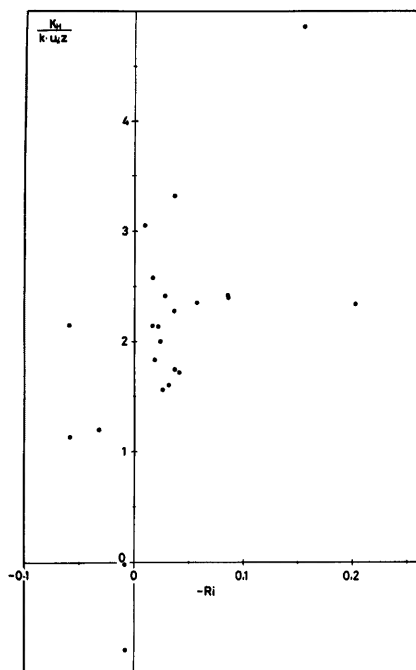


Fig. 6 Normalized eddy thermal diffusivity as a function of Ri .

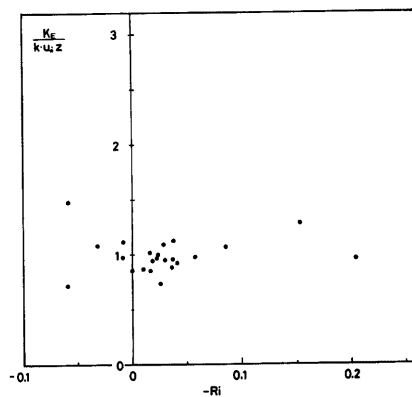


Fig. 7 Normalized eddy diffusivity of specific humidity as a function of Ri .

次に無次元化した渦粘性係数及び渦拡散係数と Ri との関係を Fig. 5, 6 及び 7 に示す。運動量, 湿熱, 潜熱に関する係数はそれぞれ異なった値を持ち, しかも大きなばらつきを示している。これらの係数と z/L の関係については過去に幾つかの観測例がある。ただし, 確立されたものはなく, カルマン常数 k の値さえ観測によって幾つかの異なった値が得られているのが現状である。なお, Fig. 4~7 における k の値としては 0.4 を用いている。これらの係数と Ri との関係には大きなばらつきがあり, Monin-Obukhov の相似則に限界があることを示しているが, 平滑化すれば輸送量の算定に利用できる可能性がある。ここに示したのは冬の観測の一例であるが, さらに熱輸送量の大きい季節のデータを加えることによってこれらの関係はより明らかなものが見られるものと考えられる。

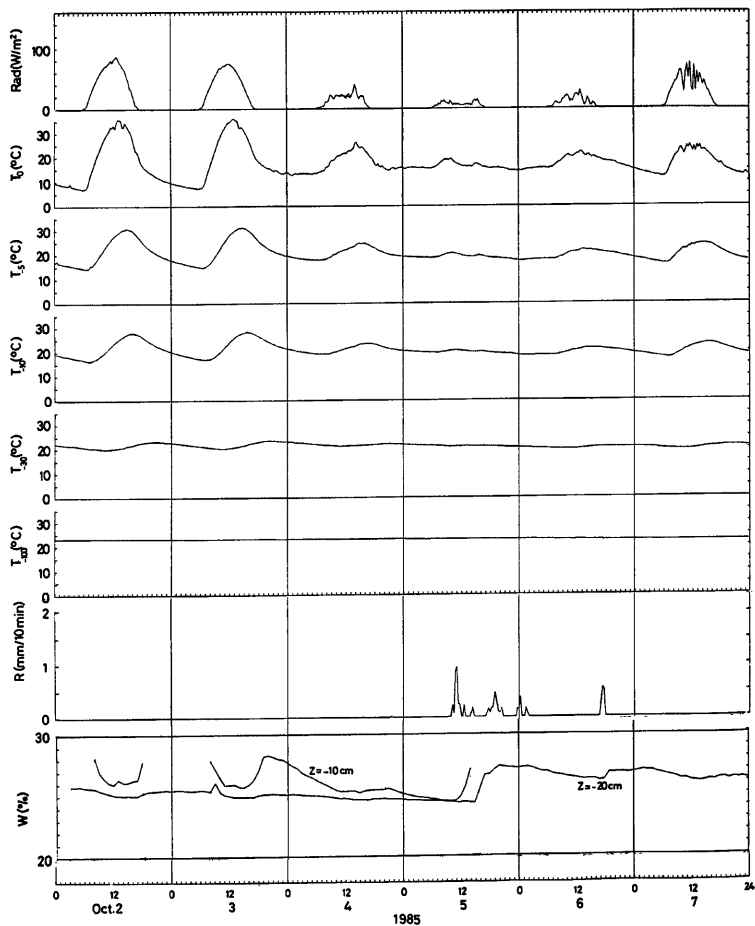


Fig. 8 Variations of the soil temperatures at various depths and soil water contents, with solar radiation and rainfall.

4. 地中水分と熱的性質

地中の水分は地表からの蒸発と互いに関連があるばかりでなく、地中の熱伝導率や比熱に影響を及ぼすため、地表面でのエネルギー交換を理解するために重要な量である。しかしながら長期連続観測できる高精度な計測器の開発が遅れているために研究が充分進んでいるとは言えない。当観測設備露場では圧力変換器を取付けたテンショメータを -10 cm と -20 cm に埋設して連続観測を行っているが、冬期の結氷期にはデータが得られなかったため、ここでは1985年の10月の2日～7日の観測例について述べる。なお、水分計の検定は、水分計埋設地点の近くから試料用の土を採取し、遠心法によって水を分離し秤量により行った。採取試料の分析では、この土の構成は細土37.5%、石礫16.5%、孔隙46%である。

この期間は、初め2日間(10月2日, 3日)は晴天が続き、4日は曇天、5日、6日は降雨があり、7日が再び晴天という状況であった。Fig. 8 にこの期間の日射量、地表面温度、地中4深度の温度、雨量及び地中2深度の水分量の変化を示す。晴れた日の昼間の浅い層での水分の変化は興味深い形を示しており、夜間の結露が予想外に大きいことを示している。また Fig. 9 には晴天日と雨天日の地中温度の鉛直分布の変化例を示す。地中の水分は晴れた日は日中に少なく夜間に増加するが、この傾向は浅い場所の方が顕著である。この変化は地表面からの蒸発と関係があるものと考えられるが、この時期にはまだ水蒸気輸送量の観測が開始されておらず、現時点では明らかにできていない。ただし降雨のあった日の地中水分量にはそれに対応した明確な変化が現れている。

降雨は水分だけでなく、温度分布にも著しい変化をもたらし、Fig. 8 に示すように降雨日は日射量も小さいこともあって、一日中土は熱を失う向きの温度分布をしている。降雨による土中水分の増大により、土の熱的性質も変化することが考えられる。すなわち熱伝導率、比熱、密度が変化するため、熱輸送に重要な温度拡散係数(κ)が変化する。 κ は熱伝導方程式、

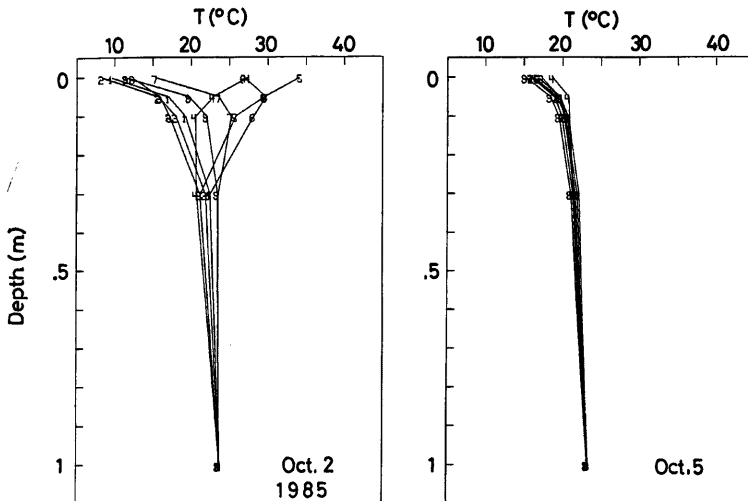


Fig. 9 Examples of the soil temperature profiles on sunny and rainy days. Numbers on the line 1 corresponds to 0~3 hr·JST, 2, 3~6 hr·JST and so on.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \dots\dots\dots (4)$$

中の係数であり、温度の時間・空間分布から計算することができる。しかしながら、一般に(4)式を差分に置きかえて直接計算で得る方法では安定した κ の値が求まらないため、地中温度変化の深さに伴う位相や振幅の変化を利用して求めること⁷⁾が行われる場合が多い。地中の温度変化を調和解析し、24時間周期の変動を取出してその位相の差から得られた温度拡散係数の変化をFig. 10に示す。ここには示していないが、振幅の比から求めたものもほぼ同じ傾向を示す。雨天の10月5日についてはFig. 8からも判るように周期的な変化をしていないので図から省いた。この図は地表近くの温度拡散係数は地中水分量が大きい時に大きな値をとることを示しているが、少し深い所では必ずしも良い対応が見られず、今後に検討の余地を残している。

5. む す び

地表面におけるエネルギー交換の観測設備において得られた観測途上の結果の数例を示した。現在はまだ乱流輸送も含めた観測は冬期のものだけであるが、地上の平均量の勾配との関係から、地表面の極く近傍においても乱流輸送量が2高度の平均量の勾配でパラメタライズされ得る可能性を示しており、今後他の季節の観測を加えることによってさらに充実した結果が得られるものと考えられる。

地中の水分が地中の熱的性質を変化させ、熱収支に影響を及ぼすことを示す結果の一例が得られた。しかも地中水分の変化が地上の蒸発と密接な関係がある可能性を示す結果も得られており、乱流輸送量等の観測を同時に行って、さらに地中水分と蒸発や熱収支との関係を明らかにする研究を進めて行く必要がある。

この研究は文部省科学研究費一般研究(A)(課題番号 60400007)の補助によった。また、観測及びデータ解析には京都大学防災研究所助手村林成氏の協力を得た。

参 考 文 献

- 1) Haugen, D.A., J.C. Kaimal and E.F. Bradley: An experimental study of Reynolds stress and heat flux in the atmospheric surface layer, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 97, 1971, pp. 168-180.
- 2) Businger, J.A., J.C. Wyngaard, Y. Izumi and E.F. Bradley: Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer, J. Atmos. Sci., Vol. 28, 1971, pp. 181-189.
- 3) Dyer, A.J.: A review of flow-profile relationship, Boundary-Layer Meteor., Vol. 7, 1974, pp. 363-372.
- 4) Mitsuta, Y., T. Hanafusa, O. Tsukamoto and H. Kawanishi: A study of energy budget at the air-ground interface, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Vol. 22, 1973, pp. 249-257.
- 5) 里田弘志, 文学信貴, 光田 寧: 裸地面におけるエネルギー輸送の研究, 京大防災研年報, 第28号

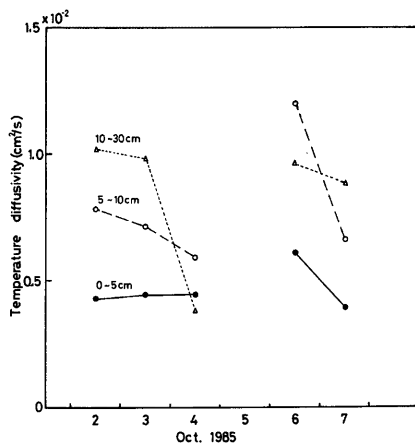


Fig. 10 Variation of temperature diffusivities of the soil derived from the phase difference in the harmonic analysis of temperature variations.

- B-1, 1985, pp. 415-426.
- 6) 塚本 修・光田 寧：種々の湿度計を用いた水蒸気輸送量の直接測定，京大防災研年報，第 25 号 B-1, 1982, pp. 283-295.
- 7) 土壌物理性測定法委員会：土壌物理性測定法，養賢堂，1982, 505 pp.