

土地利用形態と熱的環境の評価

中野, 芳輔
九州大学農学部灌漑利水工学教室

黒田, 正治
Laboratory of Irrigation and Water Utilization, Faculty of Agriculture, Kyushu University

<https://doi.org/10.15017/23310>

出版情報 : 九州大学農学部学藝雑誌. 43 (1/2), pp.69-75, 1989-01. 九州大学農学部
バージョン :
権利関係 :

土地利用形態と熱的環境の評価

中野 芳輔・黒田 正治

九州大学農学部灌漑利水教室
(1988年11月24日 受理)

The Evaluation of the Thermal Environment of Lands with Different Cover

YOSHISUKE NAKANO and MASAHARU KURODA

Laboratory of Irrigation and Water Utilization, Faculty of Agriculture,
Kyushu University 46-05, Fukuoka 812

緒 言

我々の生活空間である接地境界層内の温度環境は、地表面に入射するエネルギーの分配構造に大きく左右される。様々な植生によつて被われた農村とコンクリートやアスファルトで代表される都市との温度環境の違いは、これまでヒートアイランド現象に関連して論じられてきた。都市の高温化にかかわる直接的因子として冷暖房等の人工熱の放出が考えられるが、間接的にはアルベド、熱容量、熱伝導率、蒸発量、地表面の粗度等の都市特有の土地利用形態に伴う諸因子が関与していると思われる。これまで、都市と農村の温度環境の成立機構についての研究は、蒸発面積率、地表面粗度、地中熱伝導率の違いとして大気の中立条件下で論じた Myrup (1969) の簡単なモデル以来、Atwater (1972)、Gutmann and Torrance (1975) などによつて理論的展開が行われてきた。こうした都市と農村との対比の問題は、地被状態をさらに小さく分類することにより、種々の土地利用形態と温度環境の問題へと発展させることができる。

土地利用形態は大きく、水田、畑地、樹園地、林地、市街地に分類できる。同一気象条件下におけるこれらの熱的環境の違いに関する実験的研究は、相互の移流の影響を除くための場所の選定と、同時多点測定のための測器の数量面で困難が伴う。したがつて、この分野の研究は少なく、裸地と小麦畑を比較した丸山 (1973)、林地と小麦畑を比較した Denmead (1969)、草地、裸地、湿田、林地の地温を比較した竹内ら (1976) の研究が数例見られる程度である。こうした実験面

の困難に鑑み、ここではシミュレーションモデルを採用し、各土地利用形態相互の温度環境について比較検討を試みた。

水田、畑地、樹園地、林地等における植被層の存在は蒸散活動を通してエネルギーの分配構造に大きな影響をおよぼす。植生はそれぞれの種に特徴的な空間幾何構造を有しており、短波、長波放射場や熱、水蒸気の拡散現象もそれぞれ異なつた様相を呈する。しかしこうした多様性も、葉層を大きな一枚の葉と仮定した単層モデル (中野・長, 1985) を用いることにより取扱が容易となる。市街地は蒸発面が極端に少ない点と大きく異なるが、空間構造的には植被層を人工構造物に置き換えることにより同様の手法で解析を行うことができる。

熱的環境の違いは熱収支式を構成する顕熱、潜熱、地中貯熱の3項のバランスによつてもたらされるものである。そこでこれらを指標に用い土地利用現況図からメッシュアナリシス法による地域的溫度環境の評価を試みた。

土地利用形態と熱的特性

都市と農村における温度環境を端的に表す一例として、福岡市とその30 km 東に位置し、まだ緑地を多く残している宗像市の8月の月平均温度の比較を Fig. 1 に示した。過去20年にわたり福岡市は宗像市に比べ常時2°C前後高い温度を示しており、これは明らかに土地利用形態の違いに起因するものと思われる。

太陽からの放射エネルギーは、途中大気中の水蒸気や塵埃等によつて吸収されるが、その多くは地表面に到

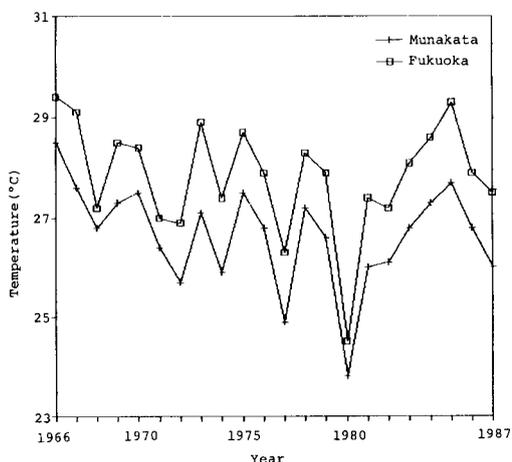


Fig. 1. Annual variation of average air temperature on Aug.

達して顕熱、潜熱、地中貯熱エネルギーに変換される。地表面に接する諸生命活動にとって密接な関係にある10~100 mの層は接地境界層と言われている。この境界層の諸環境は地表面の熱的特性に大きく依存する。土地利用形態に伴って変化する因子には、アルベド、射出率、熱容量、熱伝導率、粗度長、植生(建物)高、葉面積指数、土壌水分等が考えられる。

アルベドの違いは地表面に吸収されるエネルギー量を規定する。市街地における明彩色の多用、植生の撤去等はアルベドを高くする要因となるが、反対に建物等の複合反射はこれを低くする要因となる。また植生がある場合は落葉等の季節的変動もあるが、一般に林地や樹園地は他に比較して小さな値を示す傾向にある。射出率は金属面以外は0.9以上で、長波放射をよく吸収、射出するため土地利用形態による差はあまりない。市街地の建築材料として一般的なコンクリートは熱容量が小さく温度拡散率が大きいために、天然の土や草木に比べて昇温しやすい特徴をもっている。粗度長は空気の流れに対する地表面の粗さを表す定数で、熱や水蒸気の拡散速度に関係する。市街地や林地で大きく1 m程度もあるが、水田、畑地では10 cm程度の小さな値を示す。風速分布の対数則から外挿された風速ゼロの点は粗度長に地面修正量を加えた高さに相当し、植物群落の修正量は経験的に植生高のほぼ6割程度であることが知られている。土壌水分状態は植物の蒸散活動および土壌面蒸発量を規定する重要な因子である。水1 gが蒸発するためには約580 calの潜熱を必要とするので、その冷却効果は大きい。都市における公園、

乾燥地における灌水された圃場では、こうした湿面によるオアシス効果が顕著に認められる。市街地の地表面は不透水性の構造物であることが多く、降水は集水施設によつてすみやかに排水される。これに対し、植生面の地表面流出量は小さく、降水の多くは土壌中に貯えられ、蒸発散に消費される。水田、畑地、樹園地、林地のエネルギー収支は、土壌-植物-大気系の中で成り立っており、葉面積指数の多寡は植生によるエネルギーの吸収量、土壌面への到達量を規定する。また、葉群の空間分布構造は群落内の拡散係数と密接な関係にあり、潜熱、顕熱輸送に影響を与える。

Fig. 2はコンクリート、水田、林地の3種類の地被について、7月下旬から8月にかけて日最高地表面温度を測定した結果である。温度はコンクリート面、水田、林地の順に高く、とくにコンクリート面は晴天日には60°C近くにもなるが、林地は常時30°C以下であった。土地利用形態の違いによるこうした温度差は、先に述べた諸因子の複合の結果もたらされたものである。

シミュレーションモデル

緑地面上のエネルギー収支には、太陽高度、日射量、散乱日射量、空の放射量、群落の空間幾何学的構造、葉の反射率および透過率、蒸散抵抗、葉面積指数、風速、気温、地温、土壌水分等多くの要因が関与しており、熱的環境の解析にあたってこれらの諸物理的、植物生理的現象を一つの系として統一的に考察を加える必要がある。植物群落の取り扱い、精度を要する場合は葉群を多くの層に分割して層毎にエネルギーの吸収と分配を計算する層モデルが用いられるが、ここでは空気力学的風速ゼロの高さに仮想葉を設定し、これを熱と水蒸気の湧源、吸源に定めた。

運動量、熱、水蒸気の輸送に関する支配方程式は移流項を考慮しない場合、それぞれ次式で表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial q}{\partial z} \right) \quad (3)$$

ここで、 u 、 θ 、 q は風速、温位、比湿である。 K_m 、 K_h 、 K_v はうず拡散係数で $K = K_m = K_h = K_v$ を仮定すれば式

$$K = \kappa(z-d)u_*\phi(z/L) \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 κ 、 d 、 u_* はそれぞれカルマン

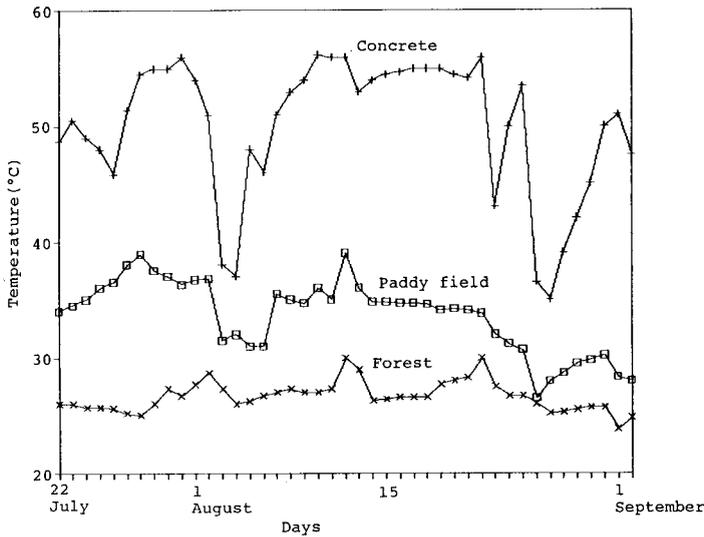


Fig. 2. Seasonal variation of maximum ground surface temperature from July to Sept.

定数, 地面修正量, マサツ速度である. ϕ は大気安定度を表す Monin-Obkov 長

$$L = - \frac{\rho_a c_p (T_a + 273.16) u_*^3}{g \kappa Q} \quad (5)$$

の関数で, $L > 0$ のとき安定, $L < 0$ のとき不安定となる. ここで, ρ_a , c_p , T_a , u_* はそれぞれ空気密度, 定圧比熱, 温度, マサツ速度であり, g は重力の加速度, κ はカルマン定数, Q は顕熱伝達量である. また地中の熱輸送式も同様に次式で表される.

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \quad (6)$$

ここで, T_s , K_s は地温および地中の温度拡散係数である. K_s の値は1日の間で変化がなく, 深さ方向の分布もないものと仮定した.

境界条件は, 上空 100 m の高さを風速, 温位, 比湿の一定層と考え, 福岡市 (東経 120°26', 北緯 33°38') 上空の気象観測データをもとに7月の平均値 $u = 360 \text{ cm s}^{-1}$, $\theta = 25.0^\circ\text{C}$, $q = 0.015$ を与えた. ただし, 日射量は7月26日の実測値を用いた. 下部境界は地表面下 50 cm の位置を温度一定層と仮定し, 25.0°C を与えた. 地表面の水分状態は水田は湿面と見なし 0 bar とした. 畑地は林地や樹園地に比べ土壌面の植被は十分でない. 干天が続くと表面に容易に乾燥土層を形成することから, 同一気象条件でも, 林地や樹園地に比べて水分量は少ないと思われる. したがって, 畑地につ

いて -10 bar, 林地, 樹園地について -1 bar を与えた. 市街地は人工地被面ばかりでなく, 部分的に蒸発面も存在する. この比率を 20% と仮定し, 水分状態は -10 bar を与えた. その他, 解析に用いたパラメータは Table 1 の通りである.

植物群落高 (市街地については建物高) から 100 m の間を 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7×2, 8×8 m の計 16 層に不等分割し, 地中についても 50 cm の厚さを表面から順次 0.5, 1×2, 1.5, 2×3, 3×2, 4, 5×6 cm の計 16 層に分割して (1), (2), (3), (6) 式を Implicit 法で解いた. 時間間隔は 6 sec を採用した結果, 3 日目には十分な収束を得ることができた.

Figs. 3, 4, 5 は, 土地利用形態別の地中熱伝達量, 顕熱, 潜熱の時間変化を示したものである. これで見ると, エネルギー分配における市街地の特徴は, 潜熱伝達量が極端に小さく, 地中熱伝達量が大いことである. 顕熱伝達量の日変化は他の土地利用に比べ1日を通して放熱型の特異な変化を示している. また日中の顕熱伝達量が畑地よりも小さな値を示したのは, 地表面の昇温により地表面からの上向き長波放射が大きくなったことに起因する. Table 1 に示すように, 市街地の地表面水分環境は緑地を考慮して -10 bar の土壌面が 20% 存在する状態を仮定したが, 計算の結果, 蒸発量は日中の 3 時間若干認められた程度であった. 土地利用形態によるエネルギー分配量の違いは, 結

Table 1. Parameters used in the study.

| | Paddy field | Upland field | Orchard | Forest | Town |
|---|-------------|--------------|---------|--------|-----------|
| Thermal diffusivity of soil (cm ² /s) | 0.0027 | 0.005 | 0.004 | 0.002 | 0.02 |
| Volumetric heat capacity of soil (cal/cm ³ °C) | 0.65 | 0.55 | 0.58 | 0.60 | 0.50 |
| Height of obstacle (cm) | 70 | 100 | 300 | 800 | 500 |
| Displacement height (cm) | 44 | 63 | 189 | 504 | 315 |
| Roughness length (cm) | 9 | 13 | 39 | 104 | 65 |
| Soil water potential (bar) | 0 | -10 | -1 | -1 | -10 (20%) |
| Albedo (%) | 20 | 20 | 17 | 15 | 20 |
| Emissivity (%) | 98 | 98 | 98 | 98 | 90 |
| Leaf area index | 3.7 | 3 | 4 | 8 | 0 |

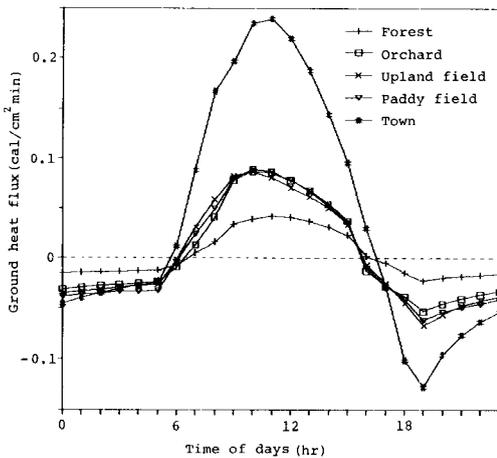


Fig. 3. Hourly variation of simulated ground heat flux of five types of different land use.

果として温度環境の違いをもたらす。日温度変化の振幅が最も大きくなる層は、裸地条件では地表面であるが、緑地条件では植被層内に存在する。この層が緑地表面におけるいわば仮の地表面的機能を果たしている。植被層内にこうした最高温度が出現する現象は、圃場の観測によつて容易に確かめられる事実である。各土地利用形態毎の日温度変化を仮の地表面について比較したのが Fig. 6 である。これで見ると、日中の市街地の温度は他に比較して極端に大きく、畑地、水田、樹園地、林地の順に小さくなっている。

地域の熱的環境の評価

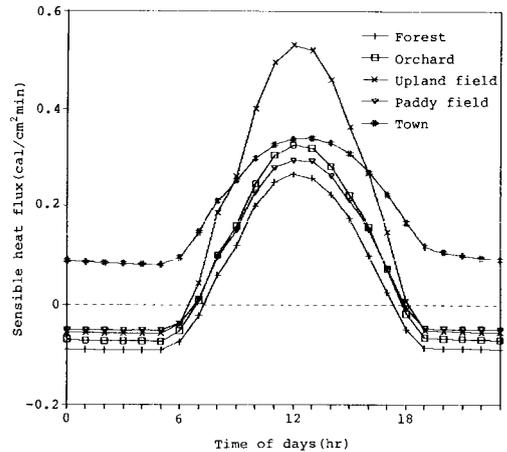


Fig. 4. Hourly variation of simulated sensible heat flux of five types of different land use.

温度環境は人間の生活環境を質的に評価する際の一要因と考えられる。しかし、ある地域を対象としてこの評価の作業を具体的に進める場合、多様に入り組んだ土地利用形態の取り扱いが問題となる。異なった地表面が散在する場合、熱や水蒸気の移流現象が生じるため、温湿度環境は必ずしも各地表面特有の値を示さない。また地形に起伏が存在すれば、斜面の向きによつて日射量が異なり、これに風の乱れも加わつて熱的環境は複雑な様相を呈すると思われる。今回は、各土地利用面の熱収支構造の違いを鮮明にするために以上の問題は考慮せず、各地表面が十分広い場合を想定しており、この意味で現実とは若干異なる。また空間的

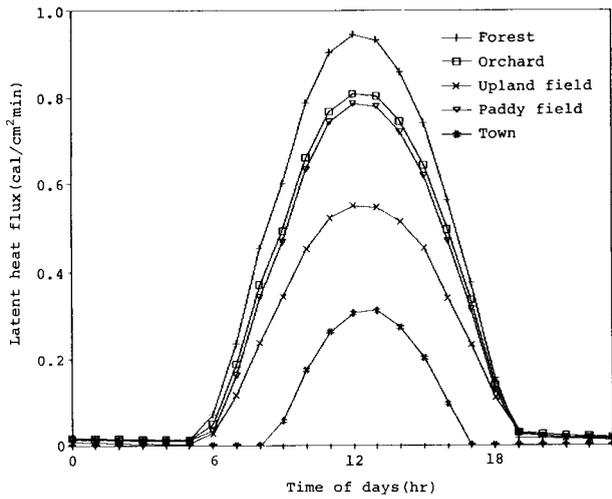


Fig. 5. Hourly variation of simulated latent heat flux of five types of different land use.

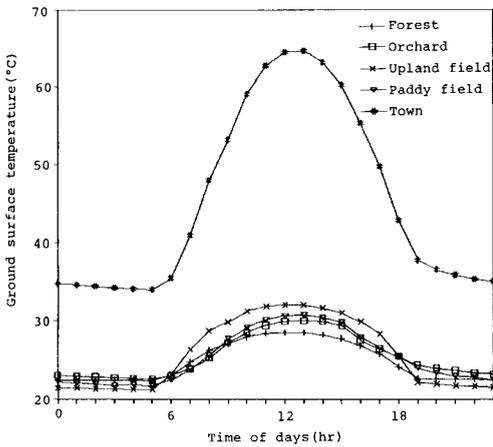


Fig. 6. Hourly variation of simulated soil surface temperature of five types of different land use.

な評価を遂行するためにメッシュアナリシス法を採用した。評価指標として、潜熱伝達量、顕熱伝達量、地中熱伝達量を用いた。前節の解析によれば1日間の顕熱伝達量および地中熱伝達量の総量は市街地、畑地、水田、樹園地、林地の順であり、潜熱伝達量はこの逆であった。

温度環境の評価地区として福岡県宗像市(面積77 km²)を選定した。当地は北九州市と福岡市の中間にあつて、両市のベッドタウンとして急速な人口増加の

られる地域で、土地利用形態の変貌も激しい。解析には1辺200 mのメッシュを用い、市全域を包むように計2,450メッシュに分割した。メッシュの方向線は経度、緯度の方向線と一致させた。Figs. 7, 8, 9はそれぞれ1日あたりの潜熱、顕熱、地中熱伝達量の分布を示したものである。ただし、市域外はゼロと置いている。等分布線はいずれも25 calcm⁻²毎に描いている。潜熱伝達量の最大値は林地で467 calcm⁻²、最小値は市街地で101 calcm⁻²であり、これとは逆に顕熱伝達量の最大値は市街地で261 calcm⁻²、最小値は林地で101 calcm⁻²であつた。地中熱伝達量は一日あたりでは+が相殺されてゼロに近く、市街地が51 calcm⁻²と他より若干大きな値を示した。こうした図の利用により一目で市全域のエネルギー分配状況を把握することができる。これは7月の一例に過ぎないが、土地利用形態の違いが周囲環境におよぼす影響を客観的に評価する方法として有効と思われる。

摘 要

土地利用形態が生活空間内の熱的環境におよぼす影響について、定量的評価を試みた。シミュレーションモデルは各地目に典型的な地被物を想定し、熱的、空力的特徴量をそれぞれ付与した。

気温、湿度、風速等の入力データは福岡市上空100 mの7月の平均値を用い、日射量は7月26日の実測値を用いた。その結果、1日間の顕熱伝達量および地中熱

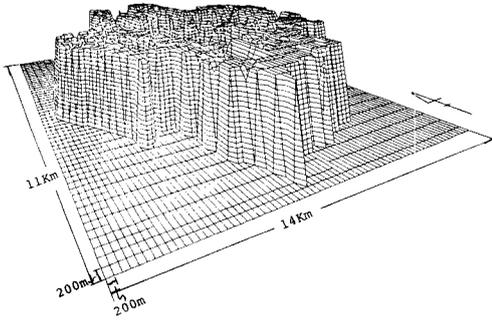


Fig. 7. The simulated areal distribution of daily latent heat flux. Note: isoline spacing 25 calcm^{-2} .

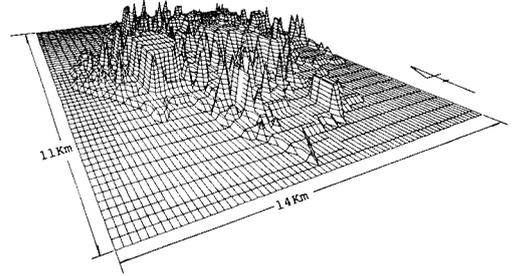


Fig. 8. The simulated areal distribution of daily sensible heat flux. Note: isoline spacing 25 calcm^{-2} .

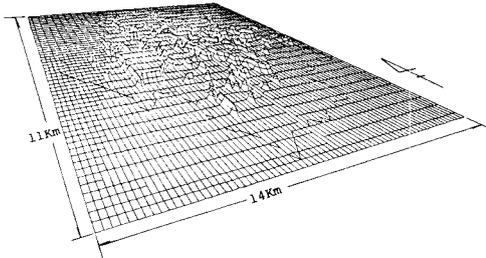


Fig. 9. The simulated areal distribution of daily ground heat flux. Note: isoline spacing 25 calcm^{-2} .

伝達量の総量は市街地、畑地、水田、樹園地、林地の順であり、潜熱伝達量はこの逆であつた。しかし、今回の評価法には、1. 水平移流項を無視したこと、2. 地形の影響を考慮していないこと、3. 各土地利用形態に与えた特徴量は、実際には局所的に異なること、4. 年間を通した場合、植物には活性期、不活性期がある、など残された問題もある。近年、リモートセンシング技術の発達により、人工衛星、飛行機等を用いた広域的な諸環境評価が試みられている。しかしこうした探査は瞬時であるため、これを補完するために本報で述べたシミュレーション技法が必要とされる。

文 献

- Atwater, M. A. 1972 Thermal effects of urbanization and industrialization in the boundary layer: A numerical study. *Boundary-Layer Met.* 3: 229-245
- Denmead, O. T. 1969 Comparative micrometeorology of wheat field and a forest of pinus radiata. *Agr. Met.* 6: 357-371
- Gutman, D. P. and K. E. Torrance 1975 Response of the urban boundary layer to heat addition and surface roughness. *Boundary-Layer Met.* 9: 217-233
- 丸山栄三 1973 地べのちがいと微気象との関係についての研究. *農業気象* 6: 151-156
- Myrup, L. O. 1969 A numerical model of the urban heat island. *J. Appl. Met.* 8: 908-918
- 中野芳輔, 長 智男 1985 緑地面の温度環境形成機構とそのモデル化. *農業土木学会論文集* 115: 1-7
- 竹内篤雄, 島 通保 1976 地況の地表面日射量および地温に与える影響について. *京大防災研究所年報* 19B: 351-370

Summary

It is clear that ground conditions have a large effect on the thermal environment.

A numerical experiment was carried out to determine the diurnal changes of energy flux on various types of land use. Wind velocity, potential temperature and specific humidity were applied respectively at the upper boundary 100 m, and a temperature was specified for the lower boundary -0.5 m. All these conditions were kept constant throughout the simulation period. The analysis were performed on the basis of data obtained in Fukuoka City (latitude 33 33'N) on July.

The model was simplified by (1) omitting advection, (2) no consideration on the topographical difference and (3) adopting the most outstanding land usage as the unit mesh (200 m X 200 m) character. The daily amounts of sensible and latent heat flux were large in a order of town, upland field, paddy field, orchard and forest. And that of latent heat flux was in a reverse order.

Recently, remote-sensing is widely used for the exvironmental assessment. But in most cases, those are limited to the instantaneous data. The simulation presented here will effectively be used for the estimation of unknown data which cannot be measured.