

# 航空機 MSS データによる地表面熱収支分布の評価\*

川島茂人\*\*

## 要旨

航空機 MSS データを用いて、小地域の地表面熱収支分布を求める方法と、その適用結果について述べた。茨城県南部における秋期日中の測定データを解析して、次のような結果を得た。(1) 地表面温度は対象地域の平均が  $19.1^{\circ}\text{C}$  を示し、これを基準にした温度差は水面  $-11.6^{\circ}\text{C}$ 、森林  $-6.0^{\circ}\text{C}$ 、草地  $+0.5^{\circ}\text{C}$ 、コンクリート  $+3.4^{\circ}\text{C}$ 、アスファルト  $+3.8^{\circ}\text{C}$ 、裸地  $+3.9^{\circ}\text{C}$ 、施肥地  $+4.8^{\circ}\text{C}$  であった。(2) 純放射フラックス密度は対象地域の平均が  $398\text{ W/m}^2$  と計算され、これを 100 とすると地表状態別純放射フラックス密度は水面 135、森林 121、草地 104、裸地 96、アスファルト 95、コンクリート 77、施肥地 68 と求められた。(3) 顕熱フラックス密度は対象地域の平均が  $91\text{ W/m}^2$  と計算され、これを 100 とすると地表状態別顕熱フラックス密度は水面 -31、森林 -8、草地 115、裸地 146、施肥地 154、コンクリート 237、アスファルト 268 と求められた。(4) 潜熱フラックス密度は対象地域の平均が  $244\text{ W/m}^2$  と計算され、これを 100 とすると地表状態別潜熱フラックス密度は、水面と森林 183、草地 109、裸地 71、施肥地 31 と求められた。

## 1. はじめに

日中の陸地上において、地表で吸収された放射エネルギーは、熱と水蒸気にその姿を変え、大気中や地中に拡散、伝達してゆく。このエネルギー変換場所である地表面の熱収支状態は、大気現象の解明や予測で重要な境界条件となる。一方、地表面の熱収支は、我々の生活空間の物理的状态に深くかかわっており、気温や湿度を特徴づけている。また地表面状態が、広い地域にわたって一様なことはまれで、熱収支構造も場所により異なる。それゆえ、地表面における熱収支の面的分布を知ること、大気境界層下部の境界条件を知るためにも、地表付近の気象状態を理解するためにも重要である。

ところが、従来地表面付近での熱収支測定は、ある一地点での地上観測でなされていたため、面的な分布を知ることがきわめて困難であった。面的な研究例として、Paszyński (1964) は約  $1\text{ km}^2$  の小地域内を綿密に地上調査し、アルベドや熱容量の分布図を作成した。

近年リモートセンシング技術を応用して、地表面の熱収支分布を推定する試みがなされるようになった。

Brown (1974) は、航空機から測定した表面温度を用いて、綿畑からの蒸発散量を推定した。しかしながら放射収支の求め方など不明確な点が多い。

Price (1980) は、地上分解能  $500\text{ m}$  の HCMM (Heat Capacity Mapping Mission) 衛星データを用いて、中緯度地帯の日平均蒸発量と日熱容量を推定し、熱収支モデル(数値モデル)の結果と比較した。Carlson ら (1981) は、HCMM の熱赤外データと 1 次元境界層モデルを用いて、都市域とその周辺の熱収支分布を求めた。その結果、都市域と植生密度の低い畑では、蒸発量と土壌水分が非常に少なく、顕熱フラックスが大きいことなどを示した。Gurney ら (1983) は、融雪後のアラスカでの蒸発量を評価するために HCMM データを用いた。彼等は森林地帯と山火事後の裸地での表面温度および蒸発量を比較検討した。

HCMM データを用いた上記の研究における問題点として、次の 3 つが挙げられる。(1) 広い地域を対象とし、水平方向に地形、地表状態などが大きく変化するにもかかわらず、大気の状態としての気象データを特定地点の気象観測値で代表させている。(2) 表面温度や蒸発散量の分布に関して、地表状態別の議論が十分なされていない。(3) 地表面水蒸気圧を求めるにあたり、裸地での理論を裸地以外に拡張している。

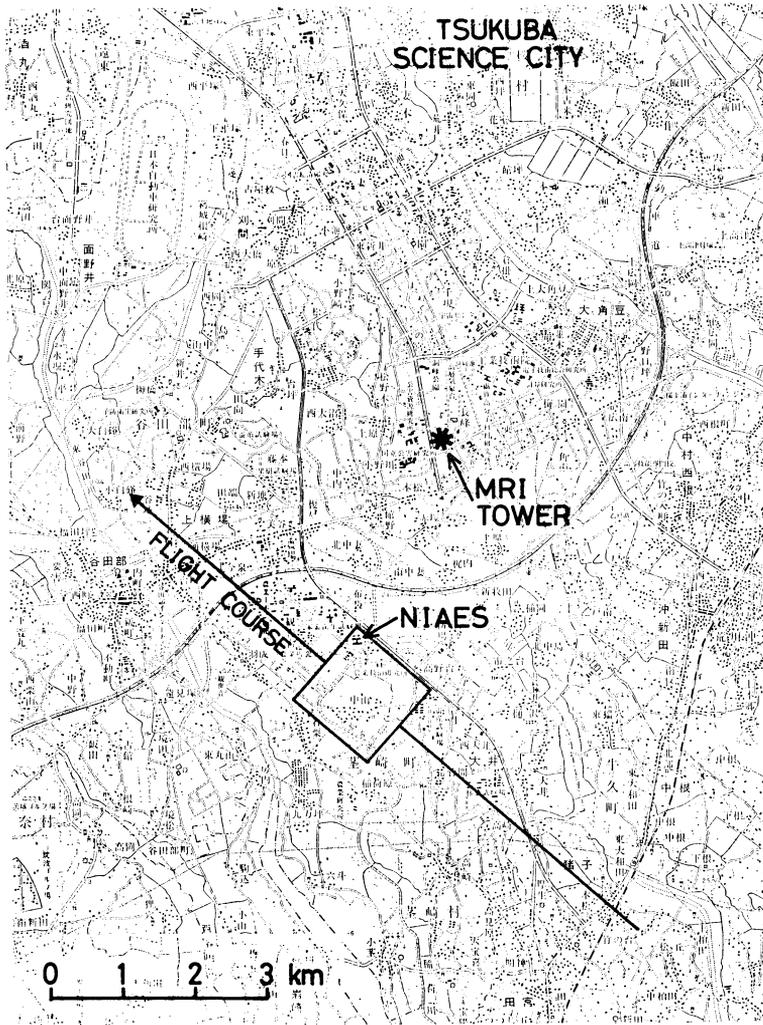
Camillo ら (1983) は、土壌中の熱・水移動に重点を

\* Estimates of the surface energy balance distributions with aerial MSS data.

\*\* Shigeto Kawashima, 農業環境技術研究所.

—1985年11月28日受領—

—1986年5月22日受理—



第1図 筑波研究学園都市における、解析対象地域、農環研 (NIAES)、気象研鉄塔 (MRI TOWER) の位置を示す。

置いたモデルを作成し、航空機から測定した表面温度を用いて粗度、熱伝導率などを求めた。このモデルは裸地のみを対象としている。

わが国では古藤田ら (1984) が、ランドサットデータによる土地利用区分にもとづき、平衡蒸発量を関東地域で計算している。

本報告では、様々な地表状態を含む平坦な小地域 (1.3 km × 1.3 km) の、秋期日中における地表面熱収支分布を、地上分解能、波長別分光特性ともにもすぐれた航空機 MSS (マルチスペクトルスキャナー) データを用い

て評価した。

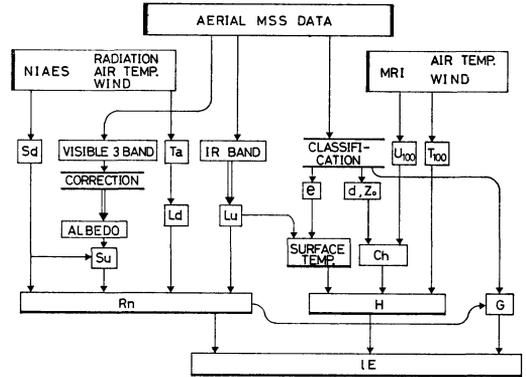
解析には農業環境技術研究所 (農環研) リモートセンシング解析装置 (CPU: FACOM M-310, イメージプロセッサ: グラフィカ I-5088) を使用した。

## 2. MSS データと解析対象地域の概況

解析に用いた MSS データは、牛久沼周辺調査の一環として 1984 年 10 月 31 日、中日本航空 JSCAN-AT-18M により得られたものである。JSCAN-AT-18M のバンドと波長域を第 1 表に示す。このセンサーは、瞬間視野

第1表 MSS センサーのバンド別波長域.

Band No.	Wave length (micron)	Colour
0	0.27~0.34	Near UV
1	0.34~0.43	Violet
2	0.41~0.46	Blue violet
3	0.46~0.49	Blue
4	0.49~0.53	Green
5	0.53~0.57	Yellow green
6	0.57~0.60	Yellow
7	0.60~0.65	Orange
8	0.65~0.70	Red
9	0.69~0.72	Dark red
10	0.73~0.76	Near IR
11	0.76~0.80	Near IR
12	0.82~0.90	Near IR
13	0.92~1.00	Near IR
14	1.00~1.10	Near IR
15	1.52~1.73	Middle IR
16	2.06~2.45	Middle IR
17	8.00~12.00	Thermal IR



第2図 解析の流れの概要. *Sd* は下向き短波放射, *Su* は上向き短波放射, *Ta* は地上気温, *Ld* は下向き長波放射, *Lu* は上向き長波放射, *e* は地表面の射出率, *d* は地表面修正量, *Z<sub>0</sub>* は粗度, *Ch* はバルク係数, *U<sub>100'</sub>* は上空風速, *T<sub>100'</sub>* は上空気温, *Rn* は純放射フラックス, *H* は顕熱フラックス, *G* は地中熱フラックス, *IE* は潜熱フラックスである. 太い矢印は, グラウンドトゥルースにもとづく変換を意味する.

2.5 ミリラジアン, 走査角度 80度, 波長域最小 0.01 ミクロンなどの特性を持つ.

MSS 測定時刻は午前 11 時, 飛行高度は約 1,000 m で, 同時に写真撮影も行われた. 測定時の気象状態は快晴, 視程 20 km 以上であった.

解析を行うにあたり, 切り出す対象地域は縦 512 ライン, 横 512 ピクセルとした. 各画素の大きさは 2.5 m 四方であり, 対象地域の大きさは 1,280 m × 1,280 m である.

解析対象地域, 農環研 (NIAES), 気象研鉄塔 (MRI TOWER) の位置関係を第 1 図に示す. 解析対象地域は茨城県筑波研究学園都市南部に位置し, 農林水産省筑波研究団地の一部を含む. 畑作地帯が広がる中に森と集落が散在し, 水利の良い所で水田が営まれている. 地形は特に起伏はなく, 平坦な地域である.

MSS 測定日の状況は, 水田は稲刈後の裸地状態であり, 畑も裸地のところが多かった. 芝生など丈の低い植生は枯れているところもあった.

### 3. 解析方法

第 2 図に解析の流れの概要を示す. 以下, 解析方法をいくつかの段階に分けて述べる.

#### 3. 1 地表面状態による分類

熱収支を計算するためのパラメータを地表面状態別に与えるため, 分類を行った. 手法は最尤法を用い, 地域内を 8 種類に分類した. 各カテゴリは, それぞれ分散共分散行列の異なる多次元正規分布をなすという条件のもとに, 各点が属する確率密度の最も大きいグループに属するものとする. 未知の点を表すベクトルを *X*, 第 *i* 番目のカテゴリの平均ベクトルを *M<sub>i</sub>*, 分散共分散行列を *V*, バンドの数を *n* とし, *X* がカテゴリ *i* に属する確率密度を *P<sub>i</sub>(X)* とすると,

$$P_i(X) = ((2\pi)^{n/2} |V|^{1/2})^{-1} \exp\left(-\frac{1}{2}(X-M_i)^T V^{-1}(X-M_i)\right) \quad \text{---(1)}$$

ここで  $|V|$  は *V* の行列式,  $V^{-1}$  は逆行列,  $(X-M_i)^T$  は  $(X-M_i)$  の転置ベクトルを表す.

教師となるカテゴリデータは, 各地表状態ごとに数個用いた. 8 種類の地表面状態カテゴリを, 教師の状態に従い, 水面 (Water), アスファルト (Asphalt), 裸地 (Soil), 草地 (Grass), 森林 (Forest), 集落 (Village), コンクリート (Concrete), 施肥地 (Limed Soil) と名付けた. これらのカテゴリが実際にどのような地表面状態と対応したかは, 4. 1 で述べる.

航空機 MSS データによる地表面熱収支分布の評価

第2表 地表状態カテゴリとパラメータ値。eは射出率、Z<sub>0</sub>は粗度、dは地表面修正量、G/Rnは地中熱フラックスと純放射フラックスの比。

Surface Category	e	Z <sub>0</sub> (m)	d (m)	G/Rn
1: Water	0.993	0.00001	0	0.2
2: Asphalt	0.956	—	—	0.35
3: Soil	0.980	0.01	0.01	0.2
4: Grass	0.986	0.02	0.1	0.1
5: Forest	0.986	1.0	7.0	0.08
6: Village	0.975	0.3	3.0	0.2
7: Concrete	0.966	—	—	0.3
8: Limed soil	0.930	0.01	0.01	0.2

分類上予期される問題点は、以下のようなことである。(1) 水面では太陽との位置関係で表面波の散乱等が生じる。(2) アスファルトでは画素の一辺より狭い幅の道がある。(3) 裸地では土壌の性質が場所により異なる。(4) 草地(丈の低い植生)では枯れているところもある。(5) 森林では樹高が10m前後あるため帯状の日蔭地帯を形成している。(6) コンクリートではビルの屋上部であることが多く、森林と同様に日蔭部を伴っている。(7) 集落としたカテゴリは、裸地、コンクリート、アスファルト、草地などが混在した場所であるため、他のカテゴリとは性格が異なる。

3.2 地表面温度の計算

MSS 測定時刻前後に、地上十数地点の地表面温度を赤外線放射温度計(BARNES PRT-5)により数回測定した。飛行時刻に最も近い測定値に重み0.5その前後の測定値に重み0.25をかけて合計した値を、飛行時の地表面温度実測値とした。一方、MSS データのバンド17(熱赤外)で地表面温度実測地点に対応する画素の値を求めた。これらのデータから、次の回帰式(2)が導かれた。

$$eT_s^4/10^8 = 49709 + 146.29 IR \quad \text{---(2)}$$

ここでeは射出率、T<sub>s</sub>は地表面温度(K)、IRは熱赤外バンドの値である。

回帰式(2)を用いて熱赤外バンドの値からeT<sub>s</sub><sup>4</sup>を計算し、地表状態別のeを代入してT<sub>s</sub>を求めた。地表状態別に与えた射出率eを第2表に示す。eの値は、4.1で述べる分類結果にもとづき、Paltridgeら(1976)、Monteith(1973)、農業気象ハンドブック(1977)を参考にして決定した。

この方法で求めた表面温度を実測値と比較したとこ

ろ、草地で最大0.4°C、アスファルトで最大0.2°Cの差が生じた。一方、すべての地表状態でe=1とした場合、草地で最大1.3°C、アスファルトで最大3.5°Cの差が、計算値と実測値との間に生じた。野外における様々な表面のeは、まだよく整理されておらず、今後研究すべき問題の1つである。

3.3 放射収支の計算

対象地域に入る下向き短波放射(Sd:直達日射+散乱日射)は水平方向に一様であると仮定し、農環研気象観測露場での値を用いた。また下向き長波放射(Ld)も対象地域内は一様と仮定し、同露場における気温Taをもとに、Swinbank(1963)が示した次の関係式(3)を用いて求めた。

$$Ld = 1.2\sigma Ta^4 - 171 \quad \text{---(3)}$$

ここでTaは地上1.5mの気温(K)で287.9K、σはステファン-ボルツマン定数で5.6703×10<sup>-8</sup>(W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)である。

上向き短波放射(Su)は次のようにして求めた。可視波長域の中から、バンド3(青)、バンド5(黄緑)、バンド9(濃赤)の平均値の分布を求め、スキャン視野角度による補正を行った。一方、MSS測定時と太陽高度が同程度の時に、地域内の代表的地被・地物上におけるアルベドを、アルベドメーター(英弘精器MR-21)を用いて測定した。この測定値と対応画素の可視平均値との間の回帰式を導いた。この回帰式を用いて全域の可視平均値からアルベドの分布を求め、これに下向き短波放射をかけて、上向き短波放射を求めた。ただし、水面については、MSS測定時刻の太陽高度から定まる水面反射率を用いた。

上向き長波放射(Lu)は、(2)式から求めたeT<sub>s</sub><sup>4</sup>に

$\sigma$ をかけて求めた。

以上の4要素を次式(4)に代入して、純放射の分布を求めた。

$$Rn = Sd - Su + Ld - Lu \quad \text{---(4)}$$

ここで  $Rn$  は純放射フラックス密度 ( $W/m^2$ )、右辺の各項もすべて単位面積当りの放射フラックス ( $W/m^2$ ) である。

### 3.4 顕熱フラックスの計算

対象地域上空 (100 m) の気温、風速は一樣であると仮定した。農環研の北北東約 3 km に気象研究所の観測鉄塔 (高さ 213 m) がある。MSS 測定時刻の農環研気象観測鉄塔 (高さ 14 m) と、気象研鉄塔低高度 (高さ 10 m) に関して、風向は西北西で一致し、風速も農環研鉄塔でやや強いもののほぼ一致した。対象地域と気象研鉄塔は隣接しているのみならず、地理的、地目的に同質の地域内にあることも考えて、気象研鉄塔上部の風速、温湿度が対象地域上空のこれらに等しいと仮定した。

対象地域からの顕熱フラックスは次式(5)、(6)により評価した。

$$H = c_p \rho C_h U_{100} (T_s - T_{100}) \quad \text{---(5)}$$

$$C_h = \left( \frac{k}{\ln \left( \frac{100-d}{Z_0} \right)} \right)^2 \quad \text{---(6)}$$

ここで、 $H$  は顕熱フラックス密度 ( $W/m^2$ )、 $c_p \rho$  は空気の体積熱容量 ( $J/m^3 K$ )、 $C_h$  は上空と地表面間のバルク係数、 $T_s$  は地表面温度 ( $^{\circ}C$ )、 $T_{100}$  は高度 100 m の気温 ( $^{\circ}C$ ) で  $12.8^{\circ}C$ 、 $U_{100}$  は高度 100 m の風速 ( $m/s$ ) で  $6.2 m/s$ 、 $k$  はカルマン定数で  $0.4$ 、 $Z_0$  は粗度 ( $m$ )、 $d$  は地表面修正量 ( $m$ ) である。ただし  $T_{100}$  は温位で表すために、 $0.98^{\circ}C$  を加えて高度差を補正した。

(5)、(6)式を用いるにはいくつかの問題があるが、特に次の2点が挙げられる。(1) 中立時のバルク係数を用いていること。風の弱い不安定時に、バルク係数は中立時よりかなり大きくなる。しかし当解析では風速が比較的強く、地上 25~100m 間の風速勾配と温位勾配から求めた  $Ri$  数 (リチャードソン数) が約  $-0.1$  であったので、近似的に中立時の式を用いた。(2) 温度に対する粗度に、風速に対する粗度を用いていること。温度に対する粗度は、風速に対する粗度より小さいことが知られている (竹内・近藤, 1981)。しかし様々な地表面状態における温度に対する粗度の値は、まだ十分明らかになっていないため、風速に対する粗度を用いた。

地表面状態別に与えた粗度 ( $Z_0$ ) と地表面修正量 ( $d$ ) を第2表に示す。これらのパラメータは、4.1で述べる

分類結果と現地での樹高、草丈、表面凹凸などの調査をもとに、Sutton (1953)、Rosenberg ら (1983)、Simiu ら (1978)、Maki (1976) を参考にして決定した。

(6)式は群落上の拡散でしばしば用いられる式であり、リモートセンシングにおいても同様の式が Price (1980)、Gurney ら (1983) により使われた。

アスファルトとコンクリートでは、潜熱フラックスは無いと仮定し、純放射フラックスと地中熱フラックスの差から顕熱フラックスを求めた。

### 3.5 地中熱フラックスの計算

様々な地表面下の熱フラックス観測例は少なく、まだ十分整理されていない。ここでは、Brutsaert (1982) によって示された、地中熱フラックス密度 ( $G$ ) と純放射フラックス密度 ( $Rn$ ) の比を一定と仮定する方法を用いた。地表面状態ごとに定めた  $G/Rn$  の値を第2表に示す。 $G/Rn$  の値は、4.1で述べる分類結果をもとに、Brutsaert (1982)、古藤田ら (1984)、成田ら (1984) を参考にして決定した。

### 3.6 潜熱フラックス (蒸発散速度) の計算

上記の方法で求めた熱収支各項を、次式(7)に代入して、潜熱フラックスを求めた。

$$LE = Rn - H - G \quad \text{---(7)}$$

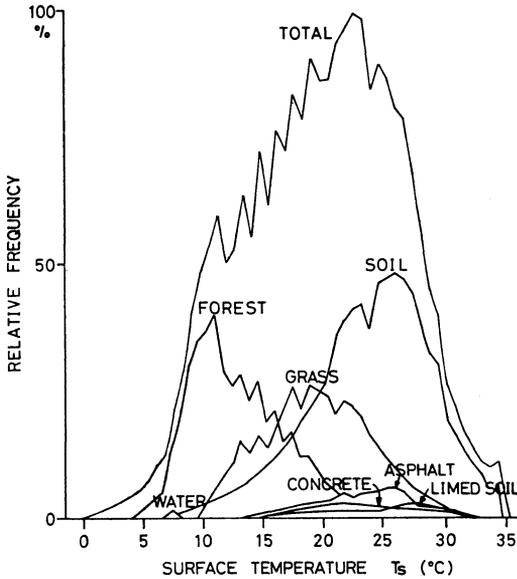
ここで、 $LE$  は潜熱フラックス密度 ( $W/m^2$ )、 $l$  は蒸発潜熱で  $2,440 (J/g)$ 、 $E$  は蒸発散速度 ( $g/m^2 s$ ) である。なおアスファルトとコンクリートでは、潜熱フラックスは無いものと仮定した。

## 4. 解析結果

### 4.1 地表面状態による分類

対象地域のすべての画素を、8つのカテゴリーのいずれかに分類した。分類結果の平面図を第3図に示す。水面は青、アスファルトは赤、裸地は茶、草地は黄緑、森林は濃緑、コンクリートは白、施肥地は黄、集落および未分類は黒で示した。

各カテゴリーの特徴を、現地調査と空中写真で調べた結果、次のことがわかった。(1) 水面はかんがい用貯水池である。(2) アスファルトは幅員 5 m 以上の道路で判別が良い。(3) 裸地の大部分は落花生、陸稲などの収穫が終った畑地であり、稲刈後の水田用地も含む。(4) 草地は芝生、雑草、そ菜など丈の低い植生に対応する。(5) 森林の大部分は松、杉、かしを主とする平地林であり、丈の高い雑草も含む。(6) コンクリートは主に研究施設の屋上部分である。(7) 施肥地は肥料用の石灰をま



第4図 地表面温度のヒストグラム。地表状態ごとに、どのような温度を示す画素が、どれくらいの割合あるかを表す。縦軸は便宜的に図の上限を100としてある。TOTALには集落を含む。

いた畑地である。(8) 集落として判別されたところは、集落部以外にコンクリート建築物の周囲、コンクリートやアスファルトで細かく仕切られた実験用の田畑、幅員の狭いアスファルト道路の周囲、森によって生じた日蔭部分などである。

集落というカテゴリが、各カテゴリ同士の境界にある画素を含みやすいのは、このカテゴリが、土、草、コンクリート、アスファルトなどの混在した状態の分光反射特性を持つためと考えられる。以下の議論では意味のあいまいな集落カテゴリに関する結果は省略する。

判別結果にもとづく地表状態別面積率は、水面0.1%、アスファルト3.3%、裸地33.7%、草地17.8%、森林19.1%、コンクリート1.6%、施肥地0.8%である。

#### 4.2 地表面温度の分布

第4図に対象地域全域および地表状態別の地表面温度のヒストグラムを示す。対象地域の平均地表面温度は19.1°C、地表状態別平均値は水面が最も低温で7.5°C、ついで森林が低く13.1°Cであった。草地は19.6°Cと地域の平均地表面温度に近かった。さらにコンクリート22.5°C、アスファルト22.9°C、裸地23.0°Cの順に高温となり、施肥地は23.9°Cと特に高温であった。

従って対象地域の平均地表面温度からの差は、水面-11.6°C、森林-6.0°C、草地+0.5°C、コンクリート+3.4°C、アスファルト+3.8°C、裸地+3.9°C、施肥地+4.8°Cとなる。

標準偏差は、水面のみが非常に小さく0.4°C、森林とアスファルトが4.1°C、施肥地4.3°C、草地とコンクリートが4.7°C、裸地がやや大きく5.2°Cであった。水面を除けば各地表状態とも4~5°Cの標準偏差を示した。第5図に地表面温度の分布図を示す。5°Cきざみで色を変えて表示した。

面積率の大きい3つのカテゴリ、裸地、草地、森林について次のことがわかった。

(1) 裸地では区画ごとにパッチ状に表面温度の差が見られた。これは耕起の時期や方法の違いによる、土壌の熱的性質や土壤水分の差が現れたと考えられる。裸地の約70%が20~30°Cを示した。15~20°Cのいくぶん低温の部分は畑地帯中の湿潤な場所に、15°C以下のさらに低温の部分は稲刈後耕起した水田用地に対応した。30°C以上の高温となる地帯が畑地の一部（主に落花生収獲後の裸地）に現れた。

(2) 草地では、枯れ草の割合が多いところほど高温であった。草地の70%が15~25°Cを示し、特に枯れ草の割合が多く、緑色が薄くなった部分が20°C以上であった。草地中15°C以下の低温の部分は稲刈後の水田の植生と葉菜類の畑に現れた。

(3) 森林では、約70%が10~20°Cを示した。20°C以上となる部分は丈の高い雑草に、15°C以上となる部分は小さな森や植生の粗な林に、10°C以下の部分は植生が密な森に現れた。

#### 4.3 純放射フラックスの分布

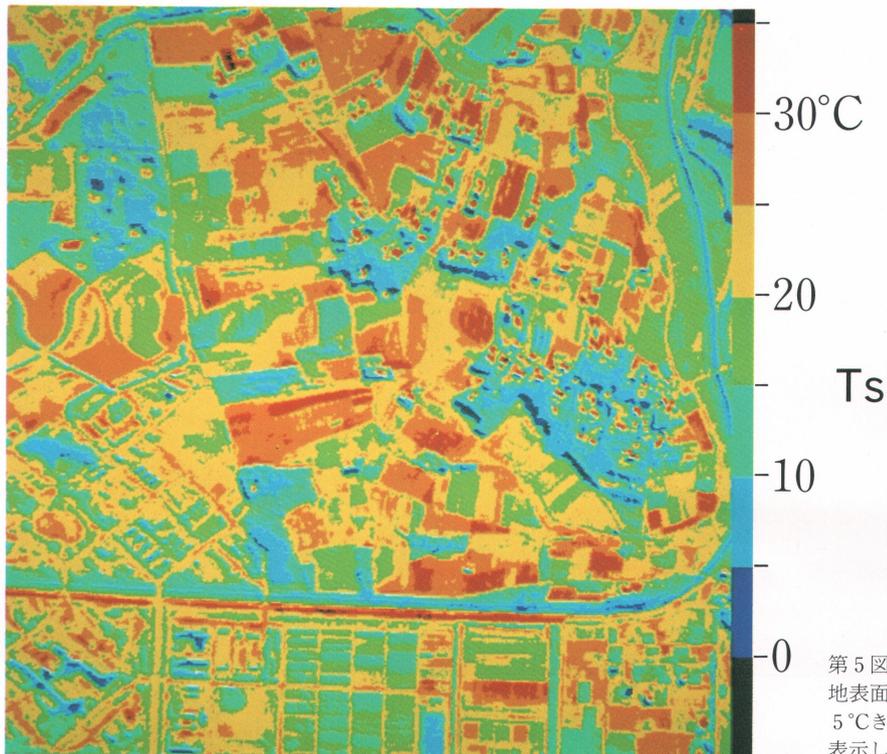
第6図に対象地域全域および地表状態別の純放射フラックス密度( $R_n$ )のヒストグラムを示す。対象地域の平均 $R_n$ は398 W/m<sup>2</sup>、地表状態別平均 $R_n$ は、水面が最も大きく537 W/m<sup>2</sup>、次に森林が大きく482 W/m<sup>2</sup>、草地は対象地域の平均よりやや大きく412 W/m<sup>2</sup>、裸地は平均よりやや小さく384 W/m<sup>2</sup>、アスファルトは裸地より小さく377 W/m<sup>2</sup>、コンクリートはさらに小さく307 W/m<sup>2</sup>、施肥地は特に小さく水面の約半分の272 W/m<sup>2</sup>であった。

対象地域の平均 $R_n$ を100とすると、水面135、森林121、草地104、裸地96、アスファルト95、コンクリート77、施肥地68となる。

水面と森林が大ききな値を持つのは、表面温度が低くア

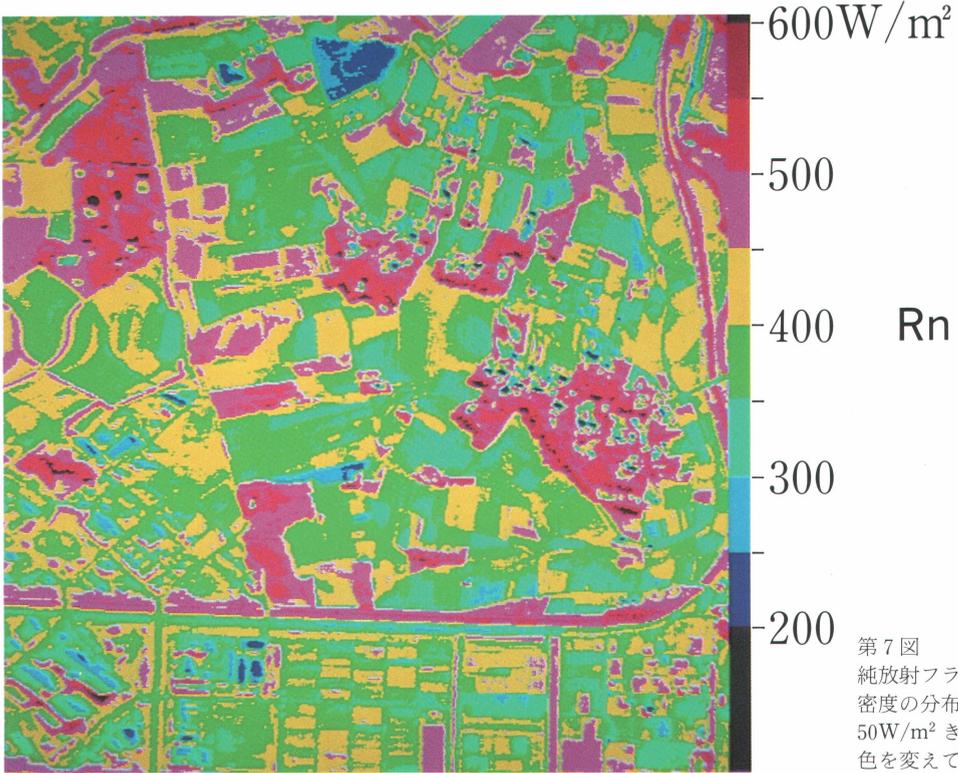


第3図  
地表状態による分類結果の  
平面図。  
青は水面、  
赤はアスファルト、  
茶は裸地、  
黄緑は草地、  
濃緑は森林、  
白はコンクリート、  
黄は施肥地、  
黒は集落および未分類。

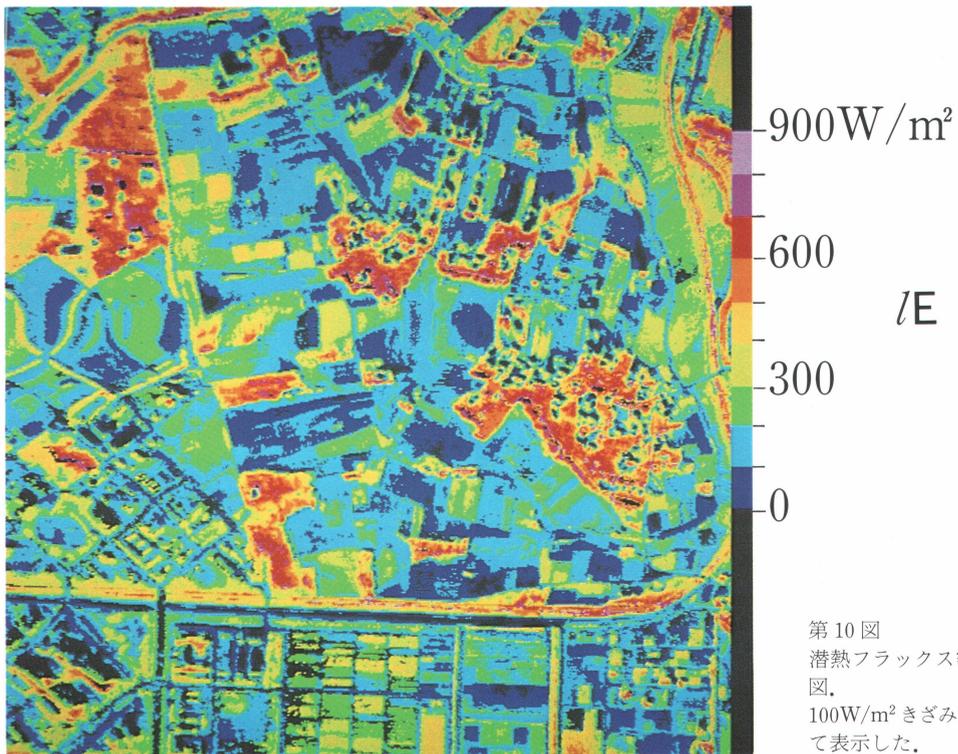


第5図  
地表面温度の分布図。  
5°Cきざみで色を変えて  
表示した。

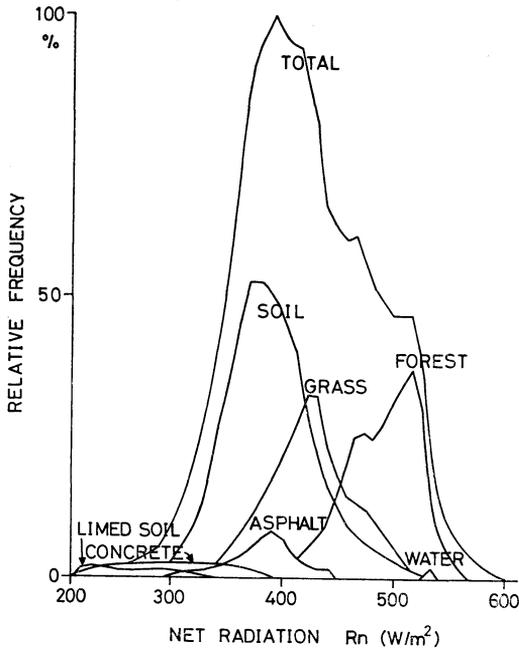
1986年7月



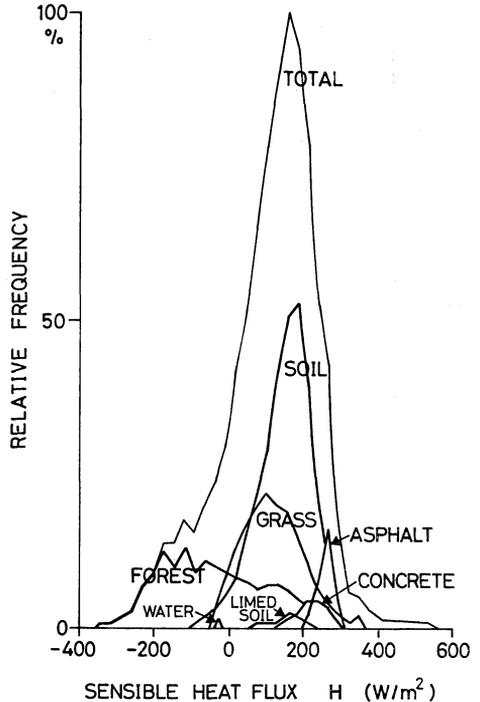
第7図  
純放射フラックス  
密度の分布図。  
50W/m<sup>2</sup>きざみで  
色を変えて表示した。



第10図  
潜熱フラックス密度の分布  
図。  
100W/m<sup>2</sup>きざみで色を変え  
て表示した。



第6図 純放射フラックス密度のヒストグラム。地表状態ごとに、どのような純放射フラックス密度を示す画素が、どれくらいの割合あるかを表す。縦軸は便宜的に図の上限を100としてある。TOTALには集落を含む。



第8図 顕熱フラックス密度のヒストグラム。地表状態ごとに、どのような顕熱フラックス密度を示す画素が、どれくらいの割合あるかを表す。縦軸は便宜的に図の上限を100としてある。TOTALには集落を含む。

ルベドが小さいために、 $Lu$ ,  $Su$  が小さくなるためである。コンクリートや施肥地の  $Rn$  が小さいのは、水面や森林とは逆に表面温度が高くアルベドが大きいため、 $Lu$ ,  $Su$  が大きくなるためである。

$Rn$  の標準偏差は、水面が非常に小さく  $2 \text{ W/m}^2$ 、つづいてアスファルト  $31 \text{ W/m}^2$ 、森林  $32 \text{ W/m}^2$  が小さな値を示す。裸地  $40 \text{ W/m}^2$ 、草地  $38 \text{ W/m}^2$  が中程度の値、施肥地  $46 \text{ W/m}^2$ 、コンクリート  $48 \text{ W/m}^2$  がやや大きな標準偏差である。森林やアスファルトは、 $Rn$  からみてコンクリートや施肥地より均一である。第7図に  $Rn$  の分布図を示す。  $50 \text{ W/m}^2$  きざみで色を変えて表示した。

裸地、草地、森林の3つのカテゴリについて、次のことがわかった。

(1) 裸地内の  $Rn$  について、表面の湿った畑地と稲刈後耕起した水田用地は相対的に値が大きく ( $400 \sim 450 \text{ W/m}^2$ )、落花生や陸稲収穫後の畑地などでは平均的な値 ( $350 \sim 400 \text{ W/m}^2$ ) を示し、落花生収穫後の畑地の一部と表面の乾燥した耕起畑では相対的に小さい値 ( $300 \sim$

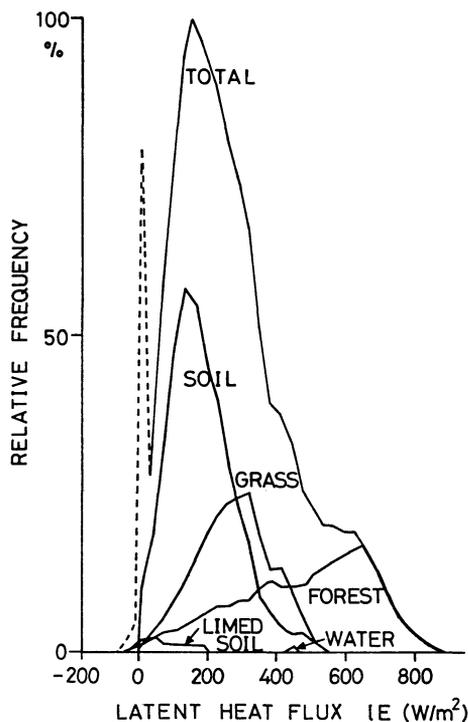
$350 \text{ W/m}^2$ ) を示した。

(2) 草地内の  $Rn$  について、葉菜類の畑などでは相対的に値が大きく ( $450 \sim 500 \text{ W/m}^2$ )、緑の残る芝地、里芋畑、稲刈後の水田の植生などでは平均的な値 ( $400 \sim 450 \text{ W/m}^2$ )、表面が枯れた芝地では相対的に小さな値 ( $350 \sim 400 \text{ W/m}^2$ ) を示した。

(3) 10 a 以上の森は  $490 \sim 530 \text{ W/m}^2$ 、小さな森や植生が粗な林は  $450 \text{ W/m}^2$  以下、丈の高い雑草は  $420 \text{ W/m}^2$  以下の  $Rn$  を示した。

#### 4.4 顕熱フラックスの分布

第8図に対象地域全域および地表状態別の顕熱フラックス密度 ( $H$ ) のヒストグラムを示す。対象地域の平均顕熱フラックス密度は、 $91 \text{ W/m}^2$  であった。地表状態別では、水面と森林が負でそれぞれ  $-28$ ,  $-7 \text{ W/m}^2$ 、草が平均値に近く  $105 \text{ W/m}^2$ 、裸地と施肥地がやや大きくそれぞれ  $133$ ,  $140 \text{ W/m}^2$ 、コンクリートとアスファルトは大きな値を示し、それぞれ  $216$ ,  $244 \text{ W/m}^2$  であ



第9図 潜熱フラックス密度のヒストグラム。地表状態ごとに、どのような潜熱フラックス密度を示す画素が、どれくらいの割合あるかを表す。縦軸は便宜的に図の上限を100としてある。TOTALには集落を含む。破線は潜熱フラックスが0以下の部分を示し、ピークは主にアスファルトとコンクリートによるものである。

った。

対象地域の平均  $H$  を100とすると、水面-31、森林-8、草地115、裸地146、施肥地154、コンクリート237、アスファルト268となる。

地表状態別に  $d$ 、 $Z_0$  を一定としたことや、拡散を1次元と仮定したこと等により、これらの仮定にそぐわない場所での計算値には、かなりの誤差があると考えられる。しかしながら  $d$ 、 $Z_0$  の代表性が良ければ、地表状態別平均値の誤差は、それほど大きくなると推察される。当解析では地表状態別フラックスの地上測定がないため、地表状態別平均値の誤差を算定するのは困難であるが、後述する気象研鉄塔でのボーエン比が正しいと仮定すると、 $H$  の対象地域平均値の相対誤差は、約5%となる。

森林の顕熱フラックスは小さいながら負であり、森林面積もかなりあることから、この時期の日中、当地方の平地に散在する森林は、大気との熱交換において、顕熱の吸源になると考えられる。

#### 4.5 ボーエン比

気象研究所鉄塔の上部二高度 (150, 100m) の平均温湿度と下部二高度 (50, 25m) の平均温湿度から、当日のボーエン比の日変化が求められた。MSS 測定時刻のボーエン比は約0.4であった。

一方、MSS データから求めた、対象地域からの全顕熱フラックスと全潜熱フラックスの比は0.38と計算され、0.4にはほぼ等しかった。

地表状態別ボーエン比は、水面-0.06、森林-0.02、草地0.39、裸地0.75、施肥地1.76となった。

#### 4.6 潜熱フラックスの分布

第9図に対象地域全域および地表状態別の潜熱フラックス密度 ( $LE$ ) のヒストグラムを示す。対象地域の平均  $LE$  は  $244 \text{ W/m}^2$  であった。地表状態別では、水面と森林が大きく、ともに  $447 \text{ W/m}^2$ 、草地は平均値に近く  $265 \text{ W/m}^2$ 、裸地は平均値より小さく  $175 \text{ W/m}^2$ 、施肥地は特に小さく  $77 \text{ W/m}^2$  であった。

$LE$  は他のフラックス項の残差として求めているので、誤差の集積の問題がある。(7)式の右辺3項の内、最も絶対誤差が大きいのは  $H$  と考えられ、 $LE$  の絶対誤差の大きさは  $H$  の絶対誤差の大きさに左右される。また(7)式の右辺3項の内、最も絶対値が大きいのは  $R_n$  であり、 $R_n$  の絶対誤差が小さければ、 $LE$  の相対誤差は  $H$  の相対誤差より小さくなることもありえる。

対象地域の平均  $LE$  を100とすると、水面と森林183、草地109、裸地71、施肥地31となる。また比  $LE/R_n$  は対象地域全体0.61、水面0.84、森林0.93、草地0.64、裸地0.45、施肥地0.28となる。第10図に  $LE$  の分布図を示す。  $100 \text{ W/m}^2$  きざみで色を変えて表示した。

裸地、草地、森林の3つのカテゴリについて、次のことがわかった。

(1) 裸地の  $LE$  は、落花生収穫後の畑地の一部や表面の乾燥した耕起畑で  $100 \text{ W/m}^2$  以下、落花生や陸稲収穫後の畑地などで  $100\sim 200 \text{ W/m}^2$ 、表面の湿った畑地や稲刈後耕起した水田用地で  $200\sim 300 \text{ W/m}^2$ 、特に湿潤な水田用地で  $300 \text{ W/m}^2$  以上の値を示した。

(2) 草地の  $LE$  は、枯れた芝地で  $200 \text{ W/m}^2$  以下、芝地と丈の低い雑草で  $200\sim 300 \text{ W/m}^2$ 、稲刈後の水田の植生などで  $300\sim 400 \text{ W/m}^2$ 、葉菜類の畑で  $400 \text{ W/m}^2$

以上の値を示した。

(3) 小さな森や植生の粗な林では  $450 \text{ W/m}^2$  以下、 $10 \text{ a}$  以上の森では  $550 \sim 700 \text{ W/m}^2$  の  $LE$  を示した。

気象研究所鉄塔のデータから求めたボーエン比は、測定当日 9 時から 15 時の間  $0.3 \sim 0.4$  の値を示し、特に  $LE$  が大きい 10 時から 14 時の間はほぼ一定の値 ( $0.4$ ) を示した。そこで日中 (9 時~15 時) ボーエン比が地表状態別に一定と仮定し、この 6 時間の地表状態別蒸発散量を求めた。その際、純放射フラックス密度の日変化を正弦曲線で近似した。計算された蒸発散量は、水面と森林  $3.4 \text{ mm}$ 、草地  $2.0 \text{ mm}$ 、裸地  $1.3 \text{ mm}$ 、施肥地  $0.6 \text{ mm}$  である。ここで求めた草地の値は、古藤田 (1984) による当地方の草地での実蒸発散量 (10 月の日中平均値) の観測結果と符合する。

## 5. まとめ

航空機 MSS データを用いて、小地域の地表面熱収支分布を求める方法と、その適用結果について述べた。茨城県南部における 10 月下旬日中の測定データを解析して、次の結果を得た。

1. 地表面温度は、対象地域の平均が  $19.1^\circ\text{C}$  を示し、これを基準にした温度差は水面  $-11.6^\circ\text{C}$ 、森林  $-6.0^\circ\text{C}$ 、草地  $+0.5^\circ\text{C}$ 、コンクリート  $+3.4^\circ\text{C}$ 、アスファルト  $+3.8^\circ\text{C}$ 、裸地  $+3.9^\circ\text{C}$ 、施肥地  $+4.8^\circ\text{C}$  であった。
2. 純放射フラックス密度は、対象地域の平均が  $398 \text{ W/m}^2$  となり、これを 100 とすると、地表状態別純放射フラックス密度は、水面 135、森林 121、草地 104、裸地 96、アスファルト 95、コンクリート 77、施肥地 68 であった。
3. 顕熱フラックス密度は、対象地域の平均が  $91 \text{ W/m}^2$  となり、これを 100 とすると、地表状態別顕熱フラックス密度は、水面  $-31$ 、森林  $-8$ 、草地 115、裸地 146、施肥地 154、コンクリート 237、アスファルト 268 であった。
4. 潜熱フラックス密度は、対象地域の平均が  $244 \text{ W/m}^2$  となり、これを 100 とすると、地表状態別潜熱フラックス密度は、水面と森林 183、草地 109、裸地 71、施肥地 31 であった。
5. 日中 (9 時~15 時) の地表状態別蒸発散量が水面と森林  $3.4 \text{ mm}$ 、草地  $2.0 \text{ mm}$ 、裸地  $1.3 \text{ mm}$ 、施肥地  $0.6 \text{ mm}$  と計算された。

従来、地表面での熱収支は 1 次元的に観測されることが多く、面的分布を把握するのは困難であった。本報告

では、局地的気象状態を、リモートセンシングにより面的にとらえるための一方法について述べた。今後とも、局地気象現象等の解明において、気象データを多点でとること、グラウンドトゥルースの方法を改良することなどとともに、リモートセンシング技術の一層の活用が期待される。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、中日本航空の方々に高品質な MSS データならびに関係資料を提供していただいた。また気象研究所鉄塔のデータについて、同研究所の松岡氏にお世話になった。データの解析にあたっては、農業環境技術研究所の福原道一主任研究員に度々お世話になった。各位に対して厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- Brown, K.W., 1974: Calculations of evapotranspiration from crop surface temperature, *Agric. Meteorol.*, 14, 199-209.
- Brutsaert, W., 1982: Evaporation into the atmosphere, D. Reidel Pub. Co., 145-152.
- Camillo, P.J., R.J. Gurney and T.J. Schmugge, 1983: A soil and atmospheric boundary layer model for evapotranspiration and soil moisture studies, *Water Resour. Res.*, 19, 371-380.
- Carlson, T.N., J.K. Dodd, S.G. Benjamin and J.N. Cooper, 1981: Satellite estimation of the surface energy balance, moisture availability and thermal inertia, *J. Appl. Meteor.*, 20, 67-87.
- Gurney, R.J. and D.K. Hall, 1983: Satellite-derived surface energy balance estimates in the Alaskan sub-arctic, *J. Climate and Appl. Meteor.*, 22, 115-125.
- 古藤田一雄, 1984: 草地の熱収支と蒸発散, *地理評*, 57, 611-627.
- ・甲斐憲次・中川慎治・吉野正敏・星仰・武田 要・関 利孝, 1984: ランドサットデータによる土地利用区分と広域蒸発散量算定手法の開発に関する研究, 筑波大学水理実験センター報告, 8, 57-66.
- Maki, T., 1976: Aerodynamic characteristics of wind within and above a plant canopy, *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci., Ser. A-23*, 1-67.
- Monteith, J.L., 1973: Principles of environmental physics, Edward Arnold, London, 60-71.
- 成田健一・関根 毅・徳岡利一, 1984: 都市地表面物質の熱特性, アスファルト舗装面における熱収支の研究, *地理評*, 57, 639-651.
- Paltridge, G.W. and C.M.R. Platt, 1976: Radia-

- tive processes in meteorology and climatology, Elsevier, Amsterdam, 134-136.
- Paszyński, J., 1964: Topoclimatological investigations on heat balance, *Polonica*, 2, 70-77.
- Price, J.C., 1980: The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation, *Water Resour. Res.*, 16, 787-795.
- Rosenberg, N.J., B.L. Blad and S.B. Verma, 1983: *Microclimate*, John Wiley & Sons, 134-139.

- Simiu, E. and R.H. Scanlan, 1978: Wind effects on structures, John Wiley & Sons, 45-47.
- Sutton, O.G., 1953: *Micrometeorology*, McGraw-Hill, 232-233.
- Swinbank, W.C., 1963: Long-wave radiation from clear skies, *Q.J. Roy. Met. Soc.*, 89, 339-348.
- 竹内清秀・近藤純正, 1981: 大気科学講座 1 地表に近い大気, 東大出版, 4章.
- 坪井八十二編, 1977: 新編農業気象ハンドブック, 養賢堂, 東京, 81-87.

## NEWS

### 世界の異常天候とその影響評価 (27)

(Climate Impact Assessment, May, 1986, NOAA/NESDIS)

#### 1. 合衆国一干ばつ

5月後半の大雨は、ミシシッピ、アラバマ、テネシー、ジョージア等合衆国南東部の厳しい干ばつ状態を緩和した。これにより、穀物は救われ、火災の可能性が減じた。しかしながら、いくつかの地域では多くの雨がもっと必要である；ヴァージニア北部は今世紀最も乾燥した春であった。

#### 2. イラン一大雨

5月3日から6日にかけての大雨はイラン中央部に洪水をもたらした、これによる死者は26名、損害は3,000万ドルと報じられている。

#### 3. タイ一大雨

2日間で400 mm という豪雨は、バンコクの都心部に大洪水をひきおこした。しかしながら、被害は都市域に限られ、主要穀物の被害は無かったものと思われる。

#### 4. ヴェトナム一大雨

北部では雨の多い天候が続き、穀物に被害があった。丘陵地域の大雨は局地的な洪水をひきおこし、より広範囲な5月末頃の大雨は北部デルタ地域に被害をもたらした。



#### 5. フィリピン一干ばつ

主要穀物であるトウモロコシに好ましくない乾燥した天候が続き、南部で植え付けを遅らせ、植え付けの終わった畑に影響を与えた模様である。トウモロコシの植え付け時期は月末には半ばが過ぎており、今のところ救い難い。

#### 6. ソロモン諸島一台風

台風 Namu が5月19日襲来し、死者71名、91,000名が家屋を失ったと報告されている。総降水量は350 mm (14インチ) に達した。

注：上記各項目の番号は図中の番号に対応している。  
(気候変動対策室 田宮兵衛)