琉球大学学術リポジトリ

沖縄本島北部の地表面温度観測と水収支の予備解析

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学理学部 公開日: 2008-03-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 石島, 英, 木村, 玲二, 横山, 拓哉, 下瀬, 龍, 吉永, 安俊, Ishijima, Suguru, Kimura, Reiji, Yokoyama, Takuya, Shimose, Ryu, Yoshinaga, Anshun メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/5430

沖縄本島北部の地表面温度観測と水収支の予備解析

石島　英*・木村玲二*・横山拓哉**・下瀬　龍***・吉永安俊****
*琉球大学理学部物質地球科学科　**読谷村立読谷中学校
***琉球大学理工学研究科生　****琉球大学農学部生産環境学科

Suguru ISHIJIMA*, Reiji KIMURA*, Takuya YOKOYAMA**, Ryu SHIMOSE*** and Anshun YOSHINAGA****

Observations of the surface temperature of the northern region of the Okinawa Island with a preliminary analysis of therein water balance

Abstract

Measurements of the surface temperature of the northern region of Okinawa Island was performed with the air borne INFRA IMAGER on the days in three seasons, on 7 February, 13 July, and 10 December, 1999. The region averaged measured surface temperature are 18.0 ℃, 30.4 ℃ and 19.5 ℃ with the maximum regional changes of 6.3℃, 8.3℃ and 7.6℃. Surface temperature obtained after making correction for the air transmissivity and the emissivity of the surface covering substances underlying the flying aircraft is found to be 3 to 4 degree higher.

A case study of 1997 water balance in the same setup region demonstrated that the averaged annual rainfall and evapotranspiration amounts are 2220 and 1070 mm, respectively, resulting in the discharge of water being about 50 % of the rainfall amount.

はじめに

天から賜った降水量（P）は地面を潤すが，一部は地表被覆形態によって異なる蒸散量または蒸発量（E）となって天空へもどり，残部は地表流出量（f）となって海岸にでるかまたは陸地面から地中に浸透（G）する．この水収支の概念は，水文学や水資源の分野においてあまねく知られた基礎概念であるが，複雑地形で多様な被覆構造をもった陸面過程を含む沖縄本島北部のような地域については，この中味が十分な精度で評価解明されていないのが学術的現状である．

沖縄本島北部領域を研究対象域とするのは，島嶼全般に共通して飛行観測の容易性という研究上のメリットがあるからである．また，沖縄本島全域の水源地として渇水や水収支問題に住民の関心が深いことがある．その点にかんがみ，本研究では，飛行観測による情報を有効に導入した地表面データの解析処理を研究の主体とし，次ぎの項目に力点をおいた研究を行ったので報告する．

1．小型飛行機を借用利用し，北部森林地，臨海市街地，沿岸海域の地表面被覆状態と熱的ポテンシャルを観測評価，

2．対象地域について予備的な降水量、河川流量、地表流出量、水収支の解析評価．

1　飛行観測による遠隔式地表面温度測定

（1）観測測定機器システムの構成

受理:2000年6月30日

*Department of Physics and Earth Sciences, Faculty of Science, University of the Ryukyus, Nishihara, Okinawa 903-0213, Japan
** Yomitan Junior High School, Yomitan, Okinawa 904-0321, Japan
*** Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyus, Nishihara, Okinawa 903-0213, Japan
**** Department of Environmental Sciences and Technology, Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus, Nishihara, Okinawa 903-0213, Japan

本観測に用いた赤外線放射温度計は，千葉大学環境リモートセンシング研究センター（CEReS）所有の，日本電子（JEOL）製 JTG－6300 である．本温度計のセンサーは水蒸気による吸収の少ない「大気の窓領域」の波長 8 ～ 13 μm の範囲の放射エネルギーに感応する．赤外線放射温度計 JTG－6300 を用いると，自動的に測定対象物の広い面積を走査して，地表面温度の空間的分布を画像（熱画像）として得られる．本温度計は赤外放射検出カメラ部分（以後，赤外放射カメラと呼ぶ）と，カメラによって取り込まれた放射エネルギーを温度に換算し熱画像を表示する画像処理部分（以後，サーマルイメージャーと呼ぶ）から構成されている．

また，今回の観測では，沖縄エアードルフィン株式会社の測量・観光遊覧用セスナ機を借用した（写真 1）．観測機の中央床部分には，測量時に用いられる既設のカメラ撮影用直径約 60cm の円形開口部がある．そこへセンサー設置盤を架設し，その上に赤外放射カメラの窓が地表面の法線方向と一致するように設定した．設置盤には，赤外放射カメラと同時にデジタルビデオカメラレコーダー（DCR－PC7，SONY）を設置し，赤外放射カメラの撮影する熱画像領域とほぼ同じ領域の可視映像を撮影した．これは，赤外放射カメラの熱画像だけでは判定が難しい地表被覆物質（森林，土壌，海など）の存在位置を確認特定するためである．写真 2 は観測機中央床部分における赤外放射カメラやサーマルイメージャー等の地表面温度観測機器設置状況を示す．

飛行高度において観測地域の上空気温を測定するため観測用飛行機の前方左翼下部にサーミスタ温度センサ（KDC－S1，コーナシステム）を設置した．温度センサによって測定された気温は観測機内に設置したデータ記録装置（KADEC－U II，コーナシステム）へ 5 秒に一回記録するように設定した．温度センサは観測機左翼下部に風の摩擦による昇温をさけるために設置した流線形筒状箱の中に固定した．

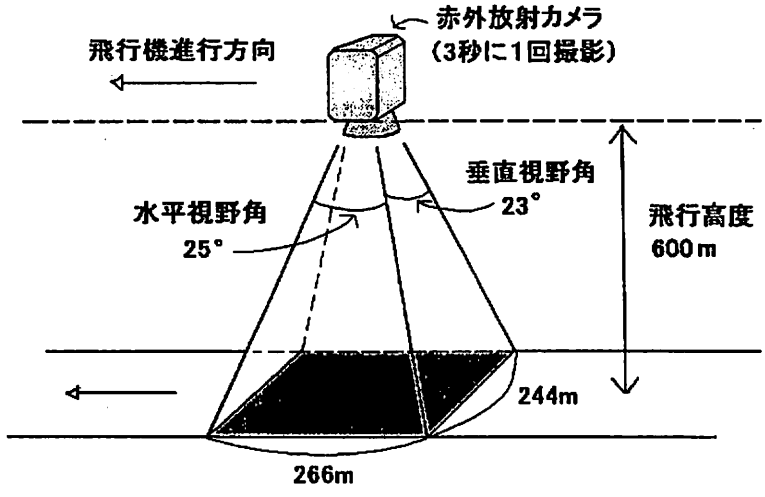


図 1. 赤外放射カメラの視野角（熱画像フレームの領域）

赤外放射カメラの視野角に収められる地面領域を図 1 に示す．垂直視野角が 23 度，水平視野角が 25 度であり，観測機の飛行高度は 600m であったので，1 つの熱画像に収まる地面領域は，海抜が 0 m の場合，垂直方向に 244m，水平方向に 260m である．また，その地面領域に対応する

熱画像フレームの画素数は縦480×横512である．

（2）観測対象域の飛行経路と植物被覆状態

沖縄本島北部地域の全域的な地表面温度分布および比較的狭い領域における地面被覆状態の温度場構造に及ぼす影響を評価するため，対象域上に図2に示すような18の格子地点を設けた．この格子地点は飛行経路1から6の各経路上（図3）に等間隔に設定された．各ポイント間の間隔は約3kmである．対象域の最高標高は約600m，水平空間的広がりは経路1から経路6までの幅が約15km，各経路の長さが約51kmである．これら108地点を各物理量の解析地点とした．

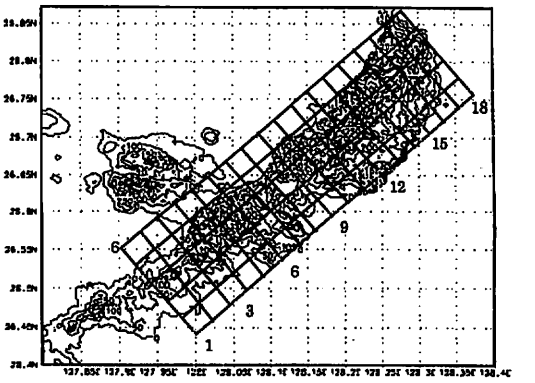


図2. 観測対象域に設定した解析用の格子地点

地表面被覆状態を支配率の高かった8つの地表面物質に分類した．分類する地表面被覆物質は海，ダム，森林，草地，農耕地，裸地砂地，市街地の8種類とした．各地面物質の特徴は次のとおりである．

1）海は，海岸沿いの水深が浅くサンゴ礁が下に存在するような地点を含んでいる，

2）森林，山脈の起伏が大きい地域では，山の斜面に伴う日陰部を含んでいる，

3）裸地は，沖縄（北部）の特徴である赤土の土壌である場合が多い，

4）砂地は，ほとんど海岸沿いの砂浜である，

5）市街地は，建物，アスファルト，コンクリート，ビニールハウス等が混在した地域を含んでいる．

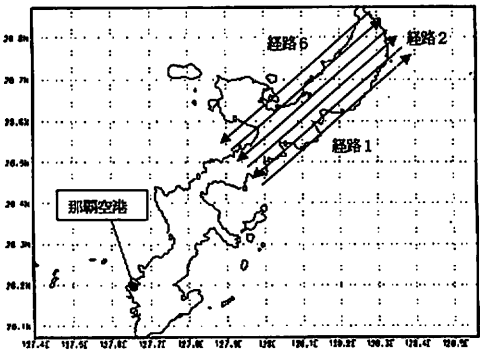


図3. 観測対象域上空の飛行経路

図4に被覆種目別占有率の例として経路1（沖縄本島北部太平洋側の海岸沿い）7地点目の場

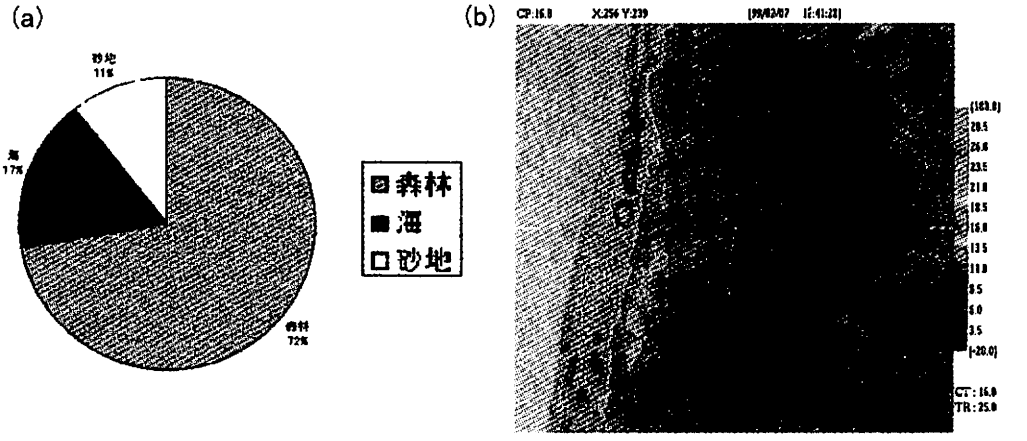


図4. 2月7日の観測対象域上空の飛行経路1の7地点目についての地表被覆占有率(a)および赤外熱画像(b)の例.

合を示す．

（3）観測実施日の天候条件

観測は1999年2月7日（冬日），1999年7月13日（夏日），12月10日（初冬日）の3回実施した．赤外放射カメラにより3秒に1回の割で熱画像がえられ，サーマルイメージャーに記録された．全飛行経路でサーマルイメージャーが記録した熱画像数は2月7日，7月13日，12月10日ともほぼ1600画像であった．飛行観測には，パイロット席にGPS装置を設置し，3回の観測実施とも同じ位置（緯度と経度）を目標に飛行できた．その結果，各観測毎の画像位置（撮影された領域）のずれは最小限に抑えることができた．

各回ともほぼ同じ観測対象域，観測時間帯，天候条件（雲がない日）に行なわれた．7月13日のみは、沖縄東方の熱帯低気圧の影響をうけ、やや雲があった．表1に観測時間帯，図5に地上気圧分布図をあげる．那覇空港を飛び立って，約20分後に観測対象域に到着，表1の時間帯の観測を行い，那覇基地に戻った．観測機の飛行高度は約600 m，経路1本の所要時間は約15分であった．

2月7日	観測開始時刻	観測終了時刻
経路1	12:36:31	12:50:46
経路2	12:56:01	13:09:09
経路3	13:13:07	13:27:00
経路4	13:31:03	13:43:25
経路5	13:47:38	14:01:35
経路6	14:05:37	14:17:45

7月13日	観測開始時刻	観測終了時刻
経路1	12:23:17	12:35:43
経路2	12:40:56	12:54:50
経路3	12:59:19	13:12:04
経路4	13:17:07	13:31:04
経路5	13:35:07	13:47:31
経路6	13:52:19	14:08:12

12月10日	観測開始時刻	観測終了時刻
経路1	12:24:27	12:38:28
経路2	12:47:42	13:00:12
経路3	13:04:58	13:18:31
経路4	13:22:41	13:34:58
経路5	13:40:27	13:52:50
経路6	13:56:50	14:09:25

表1．観測実施日（2月7日，7月13日，12月10日）の飛行経路別の観測時間

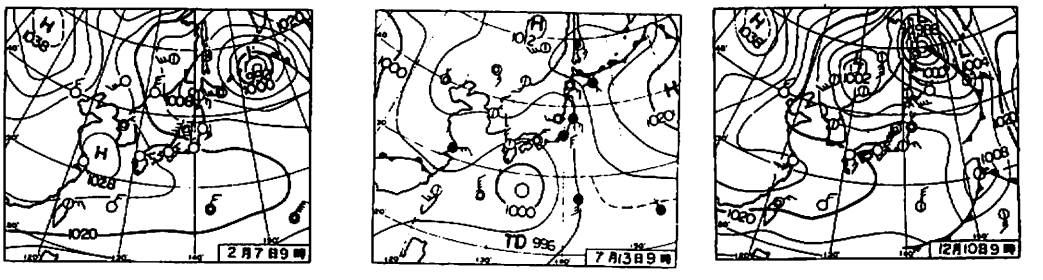


図5．観測実施日（2月7日，7月13日，12月10日）の地上気圧分布

2　地表面温度解析手法

（1）飛行機搭載赤外放射温度計による地表面温度の推定

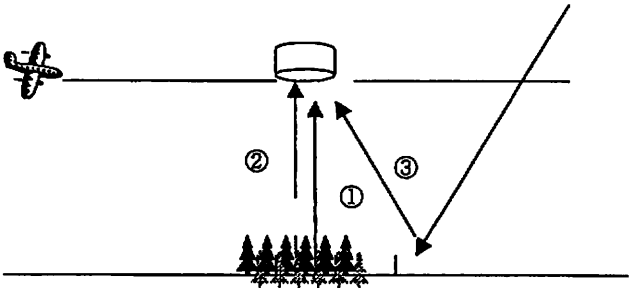


図6．赤外放射温度計カメラに入射する赤外放射エネルギー
①は地面赤外放射で大気を透過する部分，
②は大気放射，
③は反射天空放射で大気を透過する部分（本文（1）式の1，2，3項）

晴天の場合にセンサーが受ける放射（赤外線）R_{of}は，図6を参考に，

$$Ro_f = \varepsilon_s R_g t + R_a (1-t) + (1-\varepsilon_s) R_s t \qquad (1)$$

ここで，

Ro_f＝放射計に入る放射エネルギー＝$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \pi B_\lambda(T_m) d\lambda$

R_g＝地面からの上向き放射エネルギー＝$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \pi B_\lambda(T_g) d\lambda$

R_a＝大気からの上向き放射エネルギー＝$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \pi B_\lambda(T_a) d\lambda$

R_s＝天空からの下向き放射エネルギー＝$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \pi B_\lambda(T_s) d\lambda$

である．tは大気の飛行高度の透過率，ε_sは地表面の放射率，T_mは放射温度計の示す温度，T_gは地表面温度，T_aは飛行高度と地表面間の大気の平均温度，T_sは上空大気温度である．$\lambda_1 = 8$ μm，$\lambda_2 = 13$ μmで，センサーの感度波長域の上限値と下限値である．$B_\lambda(T)$ は Plank の関数で，

$$B_\lambda(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} \qquad (2)$$

である．c_1，c_2は Plank の定数．

（2）飛行高度と地表間大気透過率および地表面放射率の補正

放射温度計を実験室内で利用する場合はカメラ窓と測定対象物が接近しており，その間の大気の存在が無視できる．しかし，飛行機に搭載して用いる場合は，放射温度計のセンサーと測定対象表面との間にある大気の影響が無視できないので，それを補正する必要がある．

a．放射率・透過率の補正法

上記の大気は，前節の（1）式と図6で示されるように，大気の透過率と測定対象物表面の放射率に関係する．（1）式は，

$$\overline{R_{of}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\pi c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T_m)} - 1} d\lambda$$

$$\overline{tR_g} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} t \frac{\pi c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T_g)} - 1} d\lambda$$

$$\overline{(1-t)R_a} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1-t) \frac{\pi c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T_a)} - 1} d\lambda$$

$$\overline{tR_s} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} t \frac{\pi c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T_s)} - 1} d\lambda$$

とおいて，

$$\overline{tR_g} = \{\overline{R_{of}} + \overline{(1-t)R_a} + \overline{tR_s}\} / \varepsilon_s + \overline{tR_s} \equiv A \qquad (3)$$

を得る．したがって，次の積分方程式：

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} t \frac{\pi c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T_g)}-1} d\lambda \quad = \quad A \qquad (4)$$

になる．（4）式をといて T_g を得れば，それが地面被覆物質の放射率と地面と飛行高度間の大気による吸収を受け透過する率（大気の透過率）を補正した地表面温度である．（4）式から T_g を得るには ϵ_s, t の情報が必要である．それについて次に述べる．

b．地表面放射率

1章で述べたように北部地方の地表面は種々の物質で覆われている．主要な被覆状態は8種の被覆種にわけることができる．それらの被覆種の占有率で加重した平均の放射率を解析対象地点（格子地点）の放射率として使用する．放射率は全波長域であたえられたOke (1978), 菅原・近藤(1995)などの値(放射率Bとする)と赤外域帯(8－13μm)に対して与えられたCogan (1985), Luis and Ishijima(1997)の値(放射率A)を参考にした．今回用いた8つの地表面物質の放射率を表2に示す．

地表被覆物質	放射率A	放射率B
森林	0.935	0.98
ダム水面	0.992	0.945
海	0.985	0.945
砂地	0.91	0.94
裸地	0.96	0.94
草地	0.98	0.925
農耕地	0.935	0.925
市街地	0.965	0.9

表2．8つの代表的地表被覆物質の文献による放射率

上記8つの地表面物質の占有率を考慮して求めた2月7日の観測対象域の放射率の地域分布を図7に示す．左，右の図はそれぞれ表2の放射率A，放射率Bを使用して求めたものである．沖縄北部はほぼ常緑樹林帯におおわれ，季節による（観測実施日の違いによる）被覆状態の変化はなかった．

c．大気の透過率および下向赤外放射

ここでは，放射伝達理論を基礎としたアメリカ空軍地球物理研究所発行のソフトウェア（Modtran　3）を利用して，2章の（3）式また（1）式に関与する透過率と下向放射フラックスを求める．那覇の観測実施日のゾンデ高層データによる気圧，気温，湿度の鉛直プロファイルを当ソフトウェアに入力して，任意高度の大気透過率や下向大気放射の波長依存を示す関係式を求めた．

図8左に示すように，8～13μm波長帯の透過率は8.5～11μmの完全ウィンドウ域の両側の半透明波長域では透過率（特に水蒸気の多い夏季）が小さくなる傾向がある．9～10μmでオゾンの吸収による透過率の減少がある．図8右は下向天空放射の波長依存性を示す．地表面温度の透過率・下向き天空放射の補正をするために，図8の波長依存性の傾向を2次（または4次）のパワー級数で近似表現した．そして2章の（4）式の解として補正地表面温度を求める際に使用した．

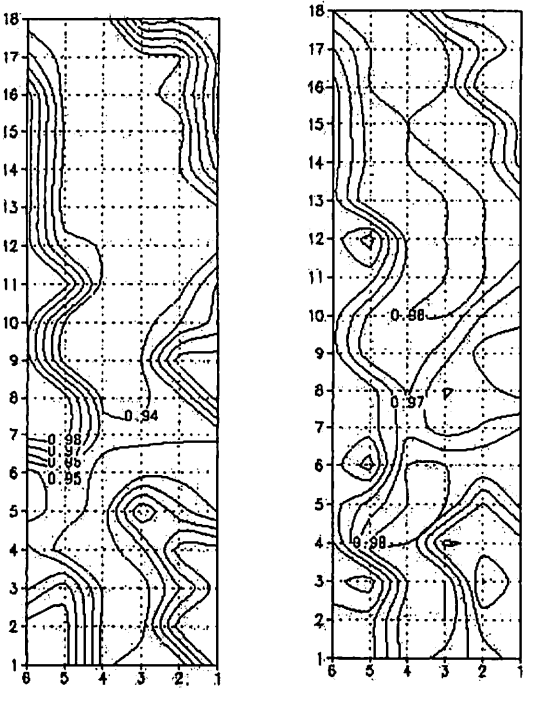


図7．2月7日の観測対象域の放射率の地域分布
左は放射率A，右は放射率Bを使用したもの

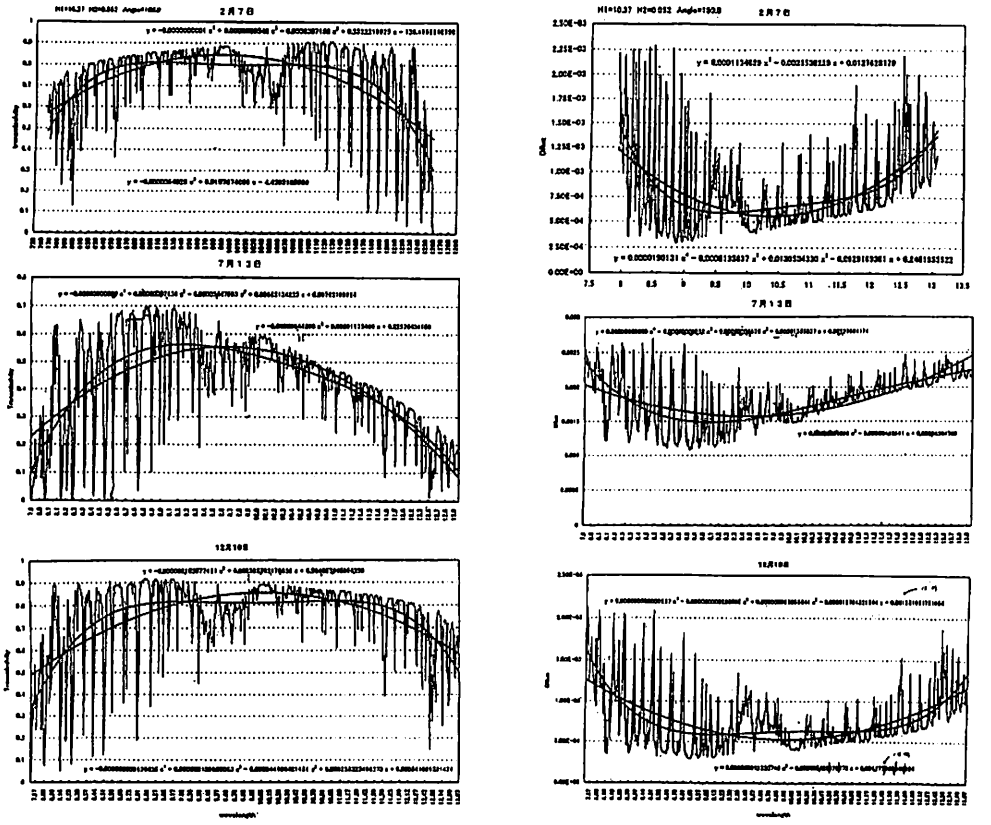


図8．大気透過率tの波長（8～13μm）範囲の波長特性（左），
下向き天空放射Rsの波長（8～13μm）範囲の波長特性（右）

（3）熱収支に関するフラックスの推定

入力放射フラックス$R^{\downarrow}$は次で算定できる、

$$R^{\downarrow} = (1 - ref)\ S^{\downarrow} + L^{\downarrow} \qquad (5)$$

ここで，$S^{\downarrow}$は日射量，refは地表面のアルベード，$L^{\downarrow}$は下向赤外放射である．一般に$L^{\downarrow}$の時間変化は晴天日においては小さいので時間変化しないと仮定した．日射量の日変化は次式で表した．tを時間，ωを地球自転の角速度とすると，

$$S^{\downarrow}(t) = S_M^{\downarrow}\ [1 - 1.503\cos(\omega t) - 0.584\cos(2\omega t) - 0.058\cos(3\omega t) - 0.023\cos(4\omega t)] \qquad (6)$$

$S_M^{\downarrow}$は近藤（1994）による日照時間との関係式で算出した．

乱流熱フラックスである顕熱フラックス，潜熱フラックスをバルク法で表現すると，

$$H = c_p\, \rho\, C_H\, U\ (T_s - T) \qquad (7)$$

$$\ell E = \ell \rho C_E U \ \{q_{sat}(T_s) - q\} \qquad (8)$$

$$C_H = \frac{k^2}{\ln[(z-d)/z_o]\ln[(z-d)/z_T]}$$

$$C_E = \frac{k^2}{\ln[(z-d)/z_0]\ln[(z-d)/z_q]}$$

kはカルマン定数，z_0 (m)，z_T (m)，z_q (m) はそれぞれ 風，気温，湿度に対する粗度長，d (m) は地面ゼロレベル修正量である．

地中伝導熱 $G(t)$の推定には，次の 4 次式による地表面温度時間変化 $Tg(t)$

$$T_g(t) = T_{gM} + \sum_1^4 A_n \cos(n\omega t - \phi_n) \qquad (9)$$

を用いる．ここで，$\omega = 0.727 \times 10^{-4}\,s^{-1}$，$T_{gM}$は日平均地表面温度，$A_n$ と ϕ_n は変化の振幅と位相で，気温時間変化 T（t）：

$$T(t) = T_M + B_1 \cos(\omega t - \alpha_1) + B_2 \cos(2\omega t - \alpha_2) \qquad (10)$$

から解析的に求める．ここで，

$$B_1 = -\ (T_{Max} - T_{Min})\ /2.09$$

$$B_2 = -\ 0.2 B_1$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\pi}{4}$$

したがって，地中伝導熱 $G(t)$は

$$G(t) = \sum_1^4 G_n \cos(n\omega t - \phi_n + \frac{\pi}{4}) \qquad (11)$$

$$G_n = A_n (n\omega c_G \rho_G \lambda_G)^{0.5}$$

$$c_G \rho_G = (1 - \theta_{sat})\ c_s \rho_s + c_w \rho_w \theta$$

$$\lambda_G = 0.25 + 0.5\ \theta^{\frac{1}{3}}$$

ここで，θ，θ_{SAT}はそれぞれ土壌体積含水率，飽和体積含水率；$c_s\ \rho_s$, $c_w\ \rho_w$はそれぞれ土壌と水の体積熱容量である．

地表面における熱収支は次式で表される．

$$R^{\downarrow} - G = \sigma T_g^4 + H + \ell E \qquad (12)$$

ここで，$R^{\downarrow}$，H，ℓE，G はそれぞれ(5)，(7)，(8)，(11)式からもとめ，地表面温度 $T_g(t)$ を未知数として，(12) 式の解をもとめる．

3　結果

(1) 地表面温度場構造

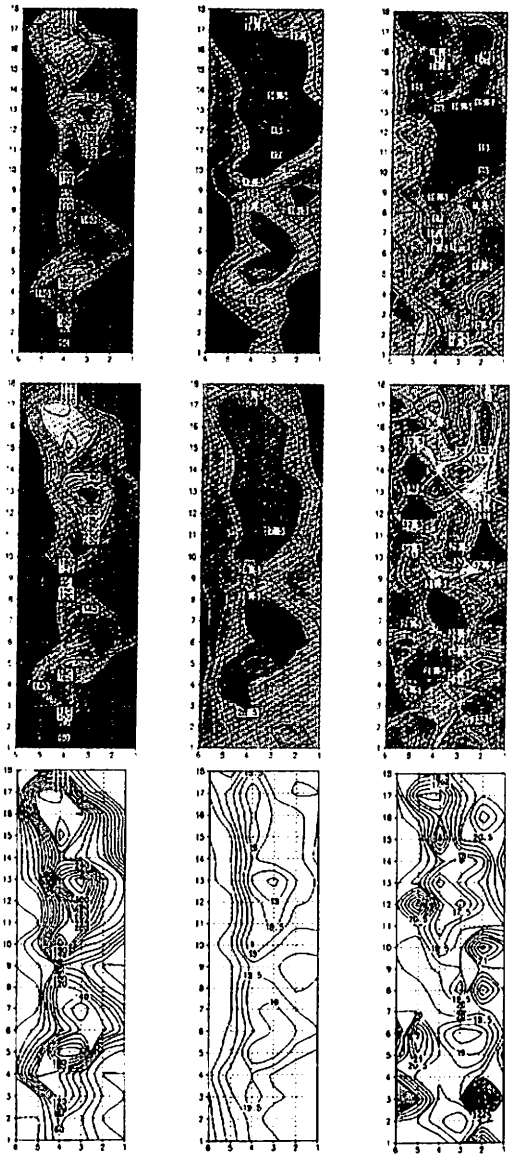


図 9. 観測対象域の標高(m)および2月7日の地上気温(℃)と補正前の地表面温度(℃)(上段)、観測対象域の標高(m)および7月13日の地上気温(℃)と補正前の地表面温度(℃)(中段)、観測対象域の標高(m)および12月10日の地上気温(℃)と補正前の地表面温度(℃)(下段)

a 地表面温度場

観測対象域の標高，地上気温，地表面温度(補正前)の地域分布をそれぞれ図9の左，中央，右に上，中，下の3段に分けて示す．観測対象域である沖縄北部一帯の地形は，沖縄本島のくびもと(格子地点の9～10地点の部分)にあたる西海岸の大宜味村から東海岸の東村にいたる低地帯で大きく2分されている．北側には最高地の与那覇岳や西銘岳を中心にした300～400 mの山岳地があり，南側には多野岳を中心に200 m程度の山地がある．

地上気温（飛行高度と地表面間の気温低減率および飛行高度の気温から推定）は標高による高地で低温，低地で高温の一般的傾向を示している．赤外放射カメラによる補正前の観測値は，おおまかには高地で低温傾向を示しているが，特に，夏の観測日（7月13日）の地表面温度分布（図9の中段右）には微細な変化がみられる．

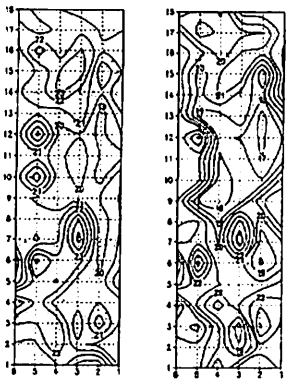


図 10. 冬日(2月7日)の放射率・透過率補正後の地表面温度．左は表2の放射率A，右は放射率Bを使用した場合

次に，(4)式による放射率・透過率補正を行ってえられた補正後の地表面温度の地域分布を冬の観測日（2月7日）について図10に示す．図10の左、右はそれぞれ表2の放射率A，放射率Bを用いて補正した場合である．図9に示した補正前地表面温度との違いが次の点に見られる．表2で示したように森林は放射率Aでは0.935に対し放射率Bでは0.985、海は逆に放射率Aでは0.985に対し放射率Bでは0.935と設定した影響があらわれている。放射率Aを使用した場合の補正後の地表面温度は，放射率Bを使

用した場合より全般的に山岳地（海側）で高温（低温）傾向を示している．

補正前の地表面温度（図９上段右）と補正前の地表面温度（図10左）の比較からわかるように，補正後地表面温度は補正前より１～３度高くなっている．　表２の８つの代表的地表被覆物質の放射率の値のとりかたによって，　格子地点平均（熱画像フレーム内の）放射率は変わり，従って補正後の地表面温度の地域分布も変わってくる．したがって，地表面温度の地域分布は代表的地表被覆物質の放射率として表２に示した全波長域の放射率を用いるか、センサーの感度波長領域の放射率を使用するか、さらには個々の地表被覆物質の放射率の値の違いに大きく依存していることがわかる．

b 熱収支成分フラックスの日変化

前節で示した熱収支計算法に従い、観測実施当日について日射フラックス，北部地域全体を森林と仮定したときの顕熱フラックス，潜熱フラックス及び地下浸透熱フラックスの日変化を

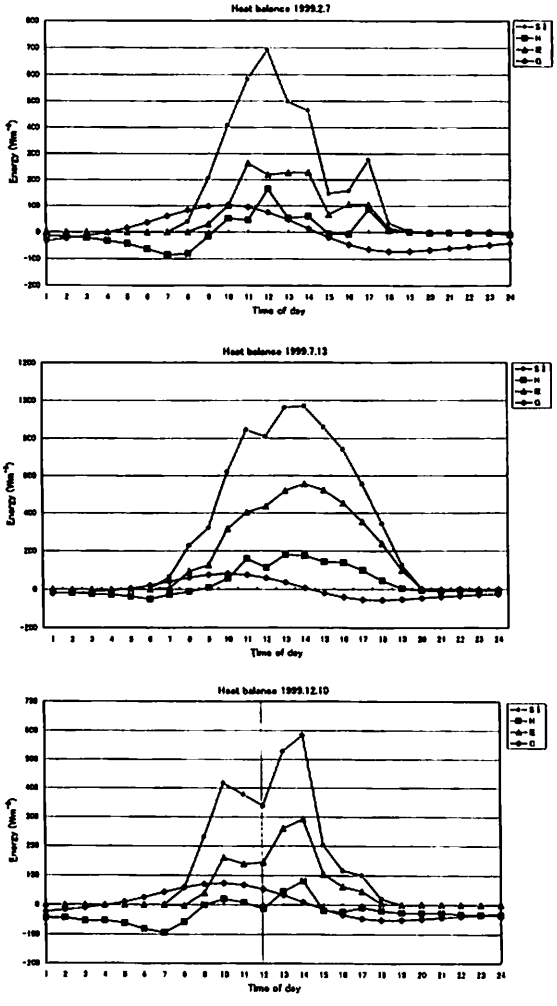


図11. 地表面における各種の熱フラックスの日変化. 上は２月７日, 中は７月13日, 下は12月10日のもの. S↓, H, LE, G はそれぞれ日射, 顕熱, 潜熱, 地下浸透熱のフラックス.

もとめた（図 11）．利用したデータは沖縄気象台（那覇および名護）提供のものである。

冬日，夏日，初冬日の実施日について，観測時間帯（12：00 から 13：30）の日射フラックスはそれぞれ 700，1000，600 W/m^2 であった．夏日の 7 月 13 日では，日の出（入り）が速（遅）く昼間の長さが長いので、午前 7 ～ 8 時や午後 6 ～ 7 時でも約 100 ～ 200 W/m^2 の日射があった．夏日の天候は正午 12 時頃にやや高層雲があった以外は終日晴れていたことが日射の時間変化からわかる．冬日には午後にやや雲があり，初冬日には正午頃にやや雲があった．

顕熱フラックスは午前 8 ～ 9 時頃まで負（下向き）であるが，その後正（上向き）になる．日が上がるにつれて，潜熱フラックスも活発になり，夏日で 550 W/m^2，冬日で 230 W/m^2，初冬日で 300 W/m^2 程度になり．潜熱フラックスの最高値は夏日と初冬日には午後 2 時に，冬日には午前 11 時におきている．地中浸透熱フラックスは午前 4 時頃から下向きに変わり，午前 10 時頃をピーク（約 100 W/m^2）に午後 2 ～ 3 時頃まで下向き浸透が続く．午後の遅い時間帯から早朝 4 時までは上向きになる．

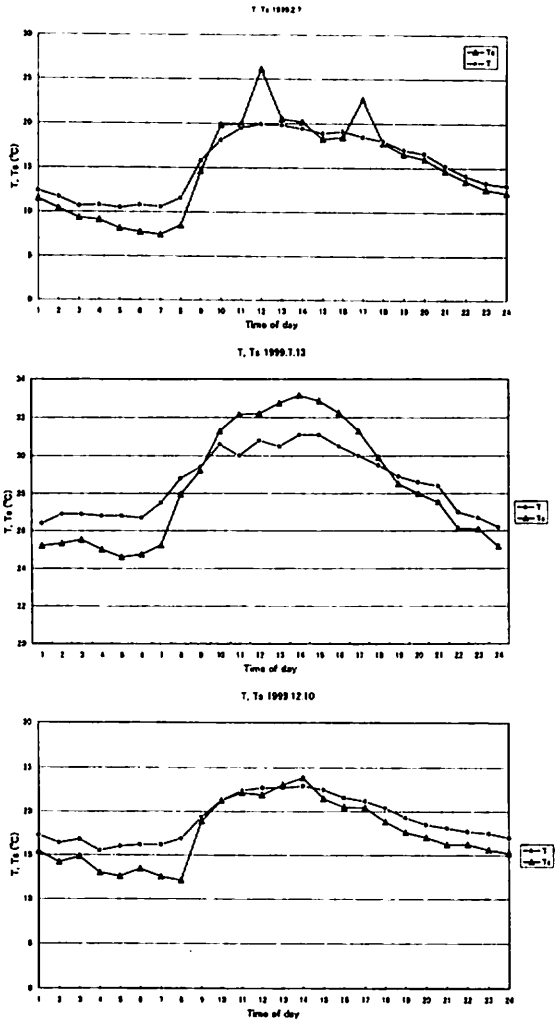


図 12. 地上気温(T)と地表面温度(Ts)の日変化. 上は 2 月 7 日, 中は 7 月 13 日, 下は 12 月 10 日のもの

気温および地表面温度の日変化を図12に示す．地表面温度が低くなる夜間帯には地中浸透熱フラックスはした下向きで，顕熱は大気から地表面へむかうが，夜明けがたにそれらのフラックスが方向を転じた後，午前9時頃に地表面温度が地上気温より高くなる。特に、夏日はそれがはっきりしている．

c 熱収支法と観測による地表面温度

熱収支法モデル計算式（2節の（5）～（12）式）によってもとめた地表面温度（計算値）を図13に示す．これを飛行機搭載赤外線放射カメラによる観測値を補正して得られた地表面温度（観測値）と比較すると，観測値と計算値は放射率・透過率補正法の違いおよび各種熱フラックスを算定する際の条件設定の違いにより大きく違い，現段階では観測値熱収支法によると計算値のいずれが真の地表面温度をあたえるのか判断はむつかしい．

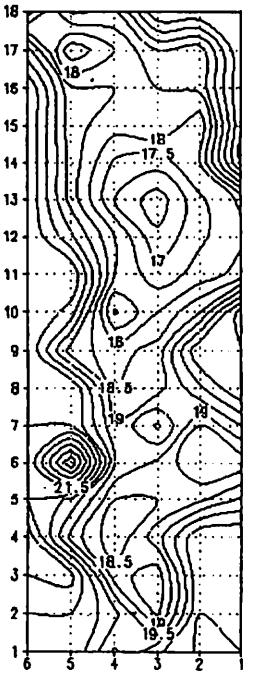


図13. 冬日（2月7日）についての熱収支モデル計算による地表面温度（℃）

（2）　水収支解析例

サンプル年を1997年にとり、飛行機観測を行った観測対象域と同一の北部地域（108個の格子地点）について、水収支の季節変化の解析を行った．沖縄県土木建築部河川課のまとめた沖縄本島の水文観測業務報告資料を用いて、観測対象域の108の解析格子点について月別の降水量を推定した．それらを12ヶ月積み上げて年間の降水量とした．上記の河川課の降水量の資料には，北部の測候所やアメダス等気象官署のほかに5つのダム管理事務所による降雨量観測値も含められている．

蒸発散量の評価にあたっては、2節の熱収支モデルを用い，各解析格子点は1節で述べた占有率を加重した被覆状態をもつものとして蒸発効率などのパラメーターを選定した．また，バルク法に必要な気象変量は名護測候所の観測値を用いて算定した．算定にあたっては，1日当たりの蒸発散量を1ヶ月積み上げ月蒸発散量をもとめ，12ヶ月積み上げて年間の蒸発散量とした．降水量と蒸発散量の差を流出量とした．図14に1月と7月について対象域の月降水量，月蒸発散量，月流出量の地域分布を示した．また，図15には1997年の年降水量，年蒸発散量，年流出量の地域分布を示した．

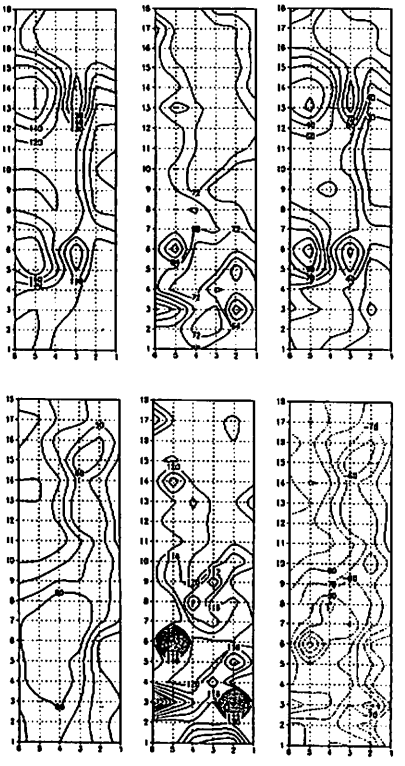


図14. 観測対象域の月降水量，月発散量および月流出量（1月，7月）の地域分布．上段は1月．下段は7月のもの．左は月降水量(mm)，中は月蒸発量(mm)，右は月流出量(mm)．

1997年は，降水量は1月～3月まで約100～150mmであったが，4月はほぼ倍増しさらに沖縄の梅雨にあたる，6月まで　300～400mmの多雨期間がひきつづいた。7月と9月は乾燥し北部平均でみると降雨量50ミリ以下であった．8月は幸い台風で

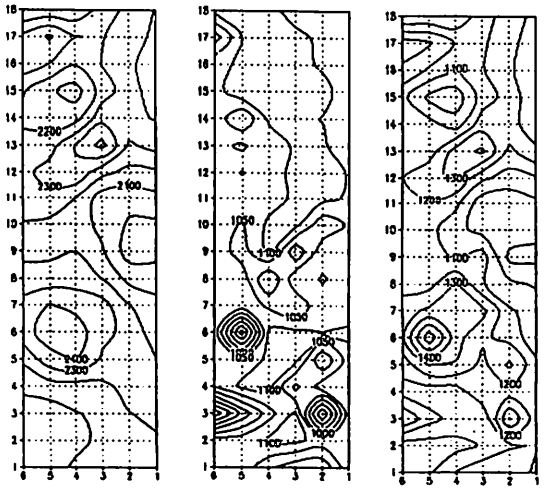


図 15. 観測対象域の年降水量(mm), 年蒸発散量(mm)および年流出量(mm)の地域分布

多量の降雨があった．10，11，12月は平年並みの降雨量であった．7月と9月は蒸発散量が降水量より多くなり，流出量が負になり渇水傾向を示した．

本観測対象域について，年間ベースでみると，年降雨量は2200ミリで，そのほぼ半分の1067ミリが蒸発散し，年流出量は1153ミリであった．

4　まとめと今後の研究

本研究は飛行機を利用した地表面温度観測とその延長上で北部の水収支解明に取り組もうという2段構えの目標からはじめた．前段には赤外放射温度計のあたえる地表面温度は有効な情報をあたえるかという基本的に未解決な問題がある．後段には実用的な水収支についての知見の社会的要請がある．そういう視点から，前段については，大気透過率と放射率補正法の定式化を考えること，熱収支モデル計算で得られる地表面温度との照合から検証すること，の2点に研究の主力をそそいだ．今後は，前段についての詳細な検討考察をくわえ，後段についてはメソスケールの解析手法の確立と解析例を増やした研究を行う予定である．

本研究で得られた暫定的な成果をまとめると，

①赤外放射カメラ搭載飛行観測により得られた1999年の冬日（2月7日），夏日（7月13日），初冬日（12月10日）の3日正午頃の北部一帯の平均補正前地表面温度（変動幅）はそれぞれ，18．0℃（6．3℃），30．4℃（8．3℃），19．5℃（7．6℃）であった．大気透過率・放射率補正後の地面温度は3～4度高い傾向が得られた．

②1997年について水収支の解析を行った結果，北部一帯平均の年降水量は2220ｍｍ、年蒸発量は1070ｍｍであり，約50%が流出量であることがわかった。

謝　辞

本研究は平成10～平成11年度基盤研究(C)（石島英分担部分）による科学研究費補助金援助を受けて実施されたものである。研究計画の実施に当たって，赤外線サーマルイメジャーの借用利用の便をはかっていただいた千葉大学リモートセンシング共同利用センターの高村民雄氏，観測ステーションとしてのセスナ飛行機に観測機器の取り付け作業などの便をはかってくれたエアードルフィン株式会社の上地長栄氏に感謝の意を表したい。

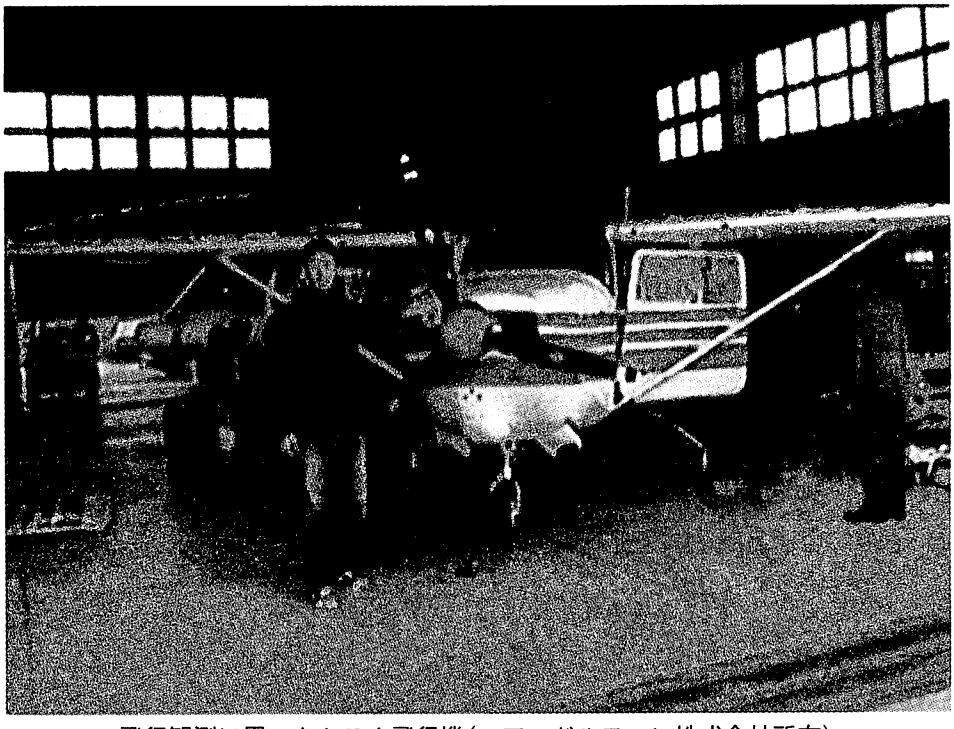
参考文献

Oke, T. R., 1978. Boundary Layer Climates. Methuen & Co.

菅原広文・近藤純正，1995. 都市における各種地表面温度の敏感度解析．天気，42：813-818.

Cogan, J. L., 1985. Remote sensing of surface and near surface temperature from remotely piloted aircraft. Applied Optics, 24, : 1030-1036.

Luis A. L. & S. Ishijima, 1997. Quantification and analysis of thermal energy responses from discrete urban surfaces using air-borne radiometric data. J. Jpn. Soc. Infrared Sci. Tech., 7 : 85-97.



飛行観測に用いたセスナ飛行機（エアードルフィン株式会社所有）

飛行観測機の中央床面開口部に設置した赤外放射カメラ