水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 15, No. 1 (2002) pp. 51-59

沖縄本島都市域における熱収支の季節変化

Seasonal Variation of the Heat Balance in the Urban Area of Okinawa Island

下瀬 龍* (琉球大学大学院理工学研究科)

Ryu SHIMOSE *Master of Engineering and Science in Physics and Earth Sciences, University of the Ryukyus.*

木村玲二** (鳥取大学乾燥地研究センター)

Reiji KIMURA *Arid Land Research Center, Tottori University.*

石島 英*** (琉球大学理学部物質地球科学科)

Suguru ISHIJIMA *Department of Physics and Earth Sciences, University of the Ryukyus.*

In this study, the seasonal variation of the heat balance in the urban area of Okinawa Island is evaluated. First, the validity of a calculation method of the heat balance was examined by the comparison of surface temperature using an infrared thermometer and a calculation of the heat balance during winter, summer and early winter. The root-mean-squared error between the observed and calculated values of surface temperature was 1.1°C.

The annual evaporation was estimated using an observational data of the measurement of flow rate of Hijiya River basin in which the urban area occupies about 90% of the river basin. The annual evaporation from the year of 1984 to 1997 was 280 ± 25 mm, while the average annual rainfall was 1877mm. Also, the annual evaporation and the heat balance components were estimated using a calculation method of the heat balance in the urban area of Okinawa Island. The averaged annual evaporation obtained for the years from 1989 to 1999 was 368 ± 42 mm, for which the average annual rainfall was 1988mm. The result of these estimations indicated that the annual evaporation in the urban area of Okinawa Island almost closed to constant value within the observed value of annual rainfall examined in this study. The averages of the annual surface temperature, sensible heat flux, and latent heat flux was 25.6°C, 52.3 Wm^{-2} and 28.5 Wm^{-2} , respectively.

Key words : Heat balance, Urban area, Water balance

本研究では沖縄本島都市域における熱収支の季節変化について検討した。まず初めに、熱収支計算の妥当性を冬、夏、初冬に行われた赤外線放射温度計による地表面温度の観測値で検証した。地表面温度の計算値のRMS誤差は1.1°Cであった。

流域面積の約90%が都市で構成された比謝川流域の流出量データを用いて、年蒸発量の算定をした。1984年から1997年までの年蒸発量は平均年降水量1,877mmに対して 280 ± 25 mmであった。さらに、熱収支計算による沖縄本島都市域の年蒸発量と他の熱収支成分を推定した。1989年から1999年までの年蒸発量の計算値は平均年降水量1,988mmに対して 368 ± 42 mmであった。これらの推定結果より、沖縄本島都市域における年蒸発量は本研究で扱った年降水量の範囲内ではほぼ一定値に近づくことが示唆された。平均年地表面温度、顕熱フラックス、潜熱フラックスはそれぞれ25.6°C, 52.3 Wm^{-2} , 28.5 Wm^{-2} であった。

キーワード：都市域、熱収支、水収支

I. はじめに

日本の水文気象について、水面、森林、芝生地で

の熱収支の研究が過去に行われている(近藤・桑形, 1992; 近藤ら, 1992; 近藤・中園, 1993)。これらの研究を進める目的として、広域陸面の熱収支の評

*琉球大学大学院理工学研究科 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1

Master of Engineering and Science in Physics and Earth Sciences, University of the Ryukyus, Senbaru 1, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

**鳥取大学乾燥地研究センター 〒680-0001 鳥取市浜坂1390

Arid Land Research Center, Tottori University, Hamasaka 1390, Tottori, 680-0001 Japan

***琉球大学理学部物質地球科学科 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原 1

Department of Physics and Earth Sciences, University of the Ryukyus, Senbaru 1, Nishihara, Okinawa, 903-0213 Japan

価方法を確立するということがあげられよう。地表面には水面、裸地面、植生面、積雪面等があるため、各地表面の熱収支特性を把握すべく研究が蓄積されている。

しかしながら、都市における熱収支、特に季節変化を再現する際には問題点を多く残している。理由として、都市特有の凹凸状態や熱容量等の複雑さが熱収支計算の扱いを困難にしていることや、計算値をどのような方法で検証すればよいか、つまり、都市域における熱収支の観測方法が確立されていないことなどがあげられよう。しかし、近年では神田ら(2000)によるシンチロメーターを利用した観測方法が提案されている。

本研究の目的は熱収支式にバルク式を組み合わせた計算方法(1次元モデル)を用いて、都市域における熱収支の季節変化を算定することである。まず初めに、熱収支の計算方法が都市域に適用できるかどうか考察を行った。その際、計算結果を検証する値として、(1)沖縄本島北部の都市域を対象にした赤外線放射温度計による地表面温度、(2)沖縄本島中南部に位置する都市河川流量観測値による年蒸発量を使用した。沖縄本島に注目した理由として、(1)では本島北部の都市域の構造がそれほど複雑ではなく、熱収支計算の検証が比較的しやすいこと、(2)では、本島中南部の都市河川が特徴的であることがあげられる。本研究で対象とした河川は沖縄本島中南部に位置する都市河川で、流域面積の約91%は市街地である。この河川のように流域が都市で始まるのは非常に稀なので、流出量がほぼ都市域だけによるものとして信憑性があると考えられる。次に、熱収支計算方法の検証結果を鑑み、沖縄本島都市域における熱収支の季節変化を考察する。

II章では過去の研究で蓄積されてきた都市特有のパラメーターを参考にした熱収支の計算原理および方法について述べる。IV章では冬、夏、初冬に行われた航空機観測による地表面温度と熱収支計算による地表面温度との比較、そして都市河川の流量観測によって得られた年蒸発量と熱収支計算による年蒸発量の比較を行い、熱収支計算法の有用性について考察する。V章では、検証を行った熱収支計算法による沖縄本島都市域での熱収支の季節変化、VI章では沖縄本島都市域での人工排熱量の影響について考察する。

II. 都市域における熱収支量の計算方法

1. 計算原理

地表面における熱収支は次式で表される。

$$(1 - \text{ref})S^{\downarrow} + \epsilon L^{\downarrow} = \epsilon \sigma T_s^4 + H + IE + G \quad (1)$$

ここに、 ref はアルベド、 $S^{\downarrow}$ は日射量(Wm^{-2})、 ϵ は地表面の射出率、 $L^{\downarrow}$ は大気放射量(Wm^{-2})、 σ はステファンボルツマン定数($=5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 T_s は地表面温度($^{\circ}\text{C}$)、 H は顕熱フラックス(Wm^{-2})、 IE は潜熱フラックス(Wm^{-2})、 G は地中伝導熱(Wm^{-2})である。都市域の熱収支を考える場合、(1)式には人工排熱量が考慮されるが、正確な値を導き出すのが困難なため、本研究ではまず考慮しないで熱収支計算を行う。人工排熱量の影響についてはVI章で考察する。

H と IE は次のバルク式で表される。

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (2)$$

$$IE = l \rho C_H U \beta \{q_{\text{sat}}(T_s) - q\} \quad (3)$$

ここに、 c_p は空気の定圧比熱($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)、 ρ は空気の密度(kgm^{-3})、 U は風速(ms^{-1})、 T は気温($^{\circ}\text{C}$)、 l は潜熱(Jkg^{-1})、 β は蒸発効率、 q は比湿(kgkg^{-1})、 $q_{\text{sat}}(T_s)$ は T_s に対する飽和比湿、 C_H は顕熱に対するバルク係数で、大気安定度が中立の場合は次式で表される。

$$C_H = \frac{k^2}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \ln\left(\frac{z-d}{z_r}\right)} \quad (4)$$

ここに、 k はカルマン定数($=0.4$)、 z は U の観測高度(m)、 d は地面修正量(m)、 z_0 、 z_r は風速および気温に対する粗度長(m)である。安定度が中立でない場合は(4)式に安定度の関数を考慮する。

計算では日射量、気温、比湿、風速、降水量データ(本研究では気象官署およびアメダスのデータ)をインプットし、地表面温度、顕熱フラックス、潜熱フラックスを同時に求める。

2. 計算方法

木村ら(2001)は沖縄本島の各土地被覆(植生地、水面、裸地面、都市域)に上述の方法を適用し、詳細な日変化計算を行っている。本研究でも、航空機観測による地表面温度と熱収支計算による地表面温度との比較を行う際に、各気象要素の日変化データ(1時間おきのデータ)をインプットし、詳細な日変化計算を行った。ただし、解析の対象日は晴れた日であり、降雨日は対象としていない。

熱収支量の日平均値は前節で得られた1時間おきの計算値を平均すればよいが、本研究では日平均気象データを利用する簡便な方法について提示する。理由として、都市河川の流量観測によって得られた年蒸発量と熱収支計算による年蒸発量の比較を行う際に、熱収支の日変化計算に用いる流域の降水量の日変化を詳細に推定できないことがあげられる。日降水量データによる計算誤差については後述する。

都市域における日蒸発量を E_{day} (mm)とすると、 E_{day} は次式のように降水中における蒸発量 E_i (mm)、降水後の地面に保水された分の蒸発量 S_A (mm)、前日に蒸発しきらなかった保水分の蒸発量 R_E (mm)に分けられる。

$$E_{day} = E_i + S_A + R_E \quad (5)$$

降水中における蒸発量 E_i は、蒸発効率 β を1日中1としたときの日蒸発量を E_{max} (mm)とすると、

$$E_i = E_{max} \left(\frac{\tau}{24} \right) \quad (6)$$

で表される(近藤ら, 1993)。ここに、 τ は降雨継続時間(hr)で、日降水量を Pr (mm)とすると、

$$\tau = 18 \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{Pr}{12} \right) \right\} \quad (7)$$

である(近藤ら, 1992)。

降水後の地面に保水された分の蒸発量 S_A は、地面の最大保水量を S_{max} (mm)とすると、

$$S_A = S_{maxd} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{Pr}{S_{maxd}} \right) \right\} \quad (8)$$

$$S_{maxd} = S_{max} - R_E \quad (9)$$

で表せる。 S_{maxd} は最大保水量から前日に蒸発しきれずに残った保水量を差し引いた値である。したがって、 R_E の有無に関わらず、 $S_A + R_E$ の最大値は S_{max} となる。 S_{max} は近藤ら(1993)により2 mmとした。

しかし、地表面に遮断された降雨は気象条件により蒸発しきれないで地表面に残る可能性がある。1日に蒸発し得る蒸発量の限界値は、蒸発効率 β を1日中1としたときの日蒸発量 E_{max} である。そのため(5)式での日蒸発量 E_{day} が E_{max} を上回ったときは、

$$E_{day} = E_{max} \quad (10)$$

とし、その際、蒸発しきれなかった残り R_E は

$$R_E = E_{day} - E_{max} \quad (11)$$

とし、翌日に残るとする。

以上の方法で日蒸発量を決定したのち、熱収支式を解くことによって各熱収支成分(地表面温度、顕熱フラックス)の日平均値を算定した。なお、計算には名護気象官署および沖縄気象台のデータを用いた。

表一 熱収支計算に用いるパラメーター

Table 1 Parameters required for a calculation method of the heat balance

Parameter	Value	Unit
Albedo ref	0.11	
Moisture availability β	0 or 1	
Thermal coefficient of the surface $c_p \lambda$	2.3×10^5	$J^2 s^{-1} K^{-2} m^{-4}$
Zero plane displacement d	5.42	m
Roughness length for momentum z_0	1.11	m
Roughness length for sensible heat z_r	0.001	m

3. 都市域におけるパラメーター

表一1に都市域の熱収支計算で使われるパラメーターについて示す。アルベド ref の値は神田ら(2000)を参考にし、0.11とした。 ref は太陽高度の関数であるが平均的に一定値を用いた。蒸発効率 β は降雨中やアスファルト、建物等による遮断水の蒸発に要する時間の間は1とし、それ以外は0とした。

熱物理係数 $c_p \lambda$ はコンクリートとアスファルトを平均したものを想定した。しかし、熱物理係数の計算に対する敏感度は比較的小さく、たとえその値が $1 (\times 10^5 J^2 s^{-1} K^{-2} m^{-4})$ 、アスファルトを想定)から $3 (\times 10^6 J^2 s^{-1} K^{-2} m^{-4})$ 、コンクリートを想定)まで変化しても、観測を行った時間帯での変動幅は約1℃(地中伝導熱では $41 W m^{-2}$)である。

地面修正量 d や風速に対する粗度長 z_0 はMacdonald *et al.*(1998)による以下の算定式を用いて算出した。

$$d = h \{ 1 + 4^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1) \} \quad (12)$$

$$\lambda_p = \frac{A_p}{A_d}$$

$$Z_0 = 0.5 h \frac{A_r}{A_d} \quad (13)$$

ここに、 h は建物の平均的高さ(m)、 A_p は対象領域内にある建物の床面積、 A_r は対象領域内にある建物の主風向に対する垂直方向の投影面積、 A_d は対象領域内の面積である。本研究では解析する都市域(名護市付近および都市河川流域内の市街地)の平均的な h を7 mとし、 A_p も住宅地図より平均的な値を算定した($A_p/A_d=0.5$)。 A_r はPetersen(1997)と同様に $0.6 A_p$ とした。気温に対する粗度長 z_r は不明確なパラメーターの1つであるが、木村ら(2001)によると、 z_r の都市域熱収支計算に対する敏感度はそれほど大きくないことから、表に示した値を用いた。

Ⅲ. 観測方法

1. 航空機に搭載した赤外線放射温度計による地表面温度の観測

本観測(平成10年度文部省科学研究費, 課題番号10660235)は沖縄本島北部全体の地表面温度を測定することを目的に行われた。観測の詳細は木村ら(2001)を参照していただきたい。

観測は1999年2月7日(冬), 1999年7月13日(夏), 1999年12月10日(初冬)の3回実施した。観測時間は, 2月7日は12時36分~14時18分, 7月13日は12時23分~14時06分, 12月10日は12時23分~14時11分である。3日ともに概ね晴天であったが, 時おり直達日射が雲で遮られている時間帯もあった。1画像のスケールは $244 \times 260\text{m}$ (画素は 480×512 メッシュ)であり, 3日ともに計108画像が解析対象である。

しかしながら, すべての画像に市街地(アスファルト, コンクリート等人工物も含む)が含まれているわけではなく, さらに航空機による観測は風の影響などにより, 毎回まったく同じ場所を飛ぶことはできないので, 3日間の観測データ数には違いがある。したがって, 2月7日, 7月13日, 12月10日のデータ数はそれぞれ18, 12, 21(1つの熱画像内に存在する市街地を抽出し, その平均値を1つのデータとしている)であった。解析対象市街地は, 本島北部の嘉陽, 川田, 辺野古, 名護, 与那, 呉我であるが, 平均的に見ると建物の閉める割合はそれほど小さくなく, 建蔽率は50%程度であった(前節参照)。

観測値には大気透過率および地表面の射出率補正を施した(木村ら, 2001)。

2. 都市河川流量観測について

本研究では流域のほとんどが市街地である都市河川の比謝川に注目した。比謝川では沖縄開発庁による流量観測が1976年から行われており, 河川開発調査水文観測報告書としてデータが残されている。

図-1に比謝川の位置, 流量観測場所, 流域面積及び土地被覆状況を示す。沖縄中部を流れる比謝川は沖縄市にその源流をもち, 東シナ海へと流れ出る。流量観測場所は比謝川中流部に位置し, 流域面積は 15.87km^2 である。流域面積の約91%は市街地(アスファルト, コンクリート等人工物も含む)で, 残りの約9%は畑, 森林, 荒地である。比謝川のように流域が都市で始まる河川は非常に稀なので, 流出量がほぼ都市域だけによるものとして信憑性があると考え

られる。

流域からの年蒸発量は年降水量から年流出量を差し引いて求めた。年流出量データは, 河川開発調査水文観測報告書により, 観測機器が携帯型電磁流速計(横河電子機器株式会社製, ES-7602・7603)を主に使うようになった1984~1997年のものである。ただし, 高水時には浮子測法による観測をしている。用いたデータは測得率が99%以上の年である。1990年, 1991年, 1995年に関しては測得率が低いため解析から除外した。

比謝川に人為的な水の流出があると, 比謝川流域での正確な年流出量が把握できない。そのため, 比謝川での人為的な流出となっているものを年流出量から差し引かなければならない。流域内の下水道について調べた結果, 家庭からの汚水は污水管を通じて具志川市にある浄水場まで運ばれ海に流されているため, 流出量データには直接関係しない。また, 污水管と雨水管は別となっており, 雨水は直接比謝川に放流されている。ただし, 1箇所だけ小さな汚水処理場があったので, この汚水処理場からの年流

図-1 比謝川流域と流域内の土地被覆
Fig. 1 The location of Hijya river basin and the land use classification within the river basin

出量を差し引いたものを比謝川の年流出量とした。なお、污水处理場からの流出量は年流出量に換算すると3.9mmであり、さほど大きな値ではない。流域外からの下水管による雨水の給水はこの流域ではなかった。この流域は下水道普及率が低いという点でも研究対象として興味深い。

比謝川流域における年降水量は金武、読谷、胡屋(コザ)、那覇、糸数の5地点の気象官署(またはアメダス)での年降水量を距離による加重平均で算定した。その場合の基準点は流域の中心とした。本島中部(金武、読谷、胡屋)と南部(那覇、糸数)の年降水量の差は約30mm(10年平均)程度であり、また中南部の標高は高くても100m程度であるので地形の影響もさほど大きくはない。なお、中南部と北部の年降水量の差は500mm程度あるので北部地帯の年降水量については解析から除外してある。

IV. 熱収支計算法の検証結果

1. 赤外線放射温度計による地表面温度と熱収支計算による地表面温度との比較

赤外線放射温度計による地表面温度の観測値と熱収支計算による計算値の比較を図一2に示す。

観測値について見てみると、地表面温度の平均値は2月7日、7月13日、12月10日でそれぞれ24.8℃、46.5℃、28.2℃で、平均値からのばらつきの標準偏

図一2 赤外線放射温度計による観測値と熱収支計算による計算値との比較

Fig. 2 A comparison between the observed and calculated surface temperature using an infrared thermometer and a calculation method of the heat balance

差はそれぞれ±1.4℃、±3.1℃、±1.4℃であった。ばらつきの要因は、建物の占める割合や人工物の構成の違いによるためである。

熱収支計算による地表面温度は観測時間に近い13時、14時の計算値を平均したものである。地表面温度の計算値は2月7日、7月13日、12月10日でそれぞれ25.7℃、46.7℃、29.9℃であった。なお、これらの値は建物の建蔽率50%、平均高さ7m、表一1に示した粗度長等のパラメーターによって計算された、全市街地を平均化したような値である。

2月7日、7月13日の計算値は誤差の範囲内でよく対応しているが、12月10日に関しては計算値より観測値が若干低くなっている。理由として、本研究ではアルベドの値を年間一定として扱っていることなどが考えられるが、全体的に見ると季節を通して熱収支計算による地表面温度の計算値は観測値を比較的よく再現している(誤差1.1℃)。なお、ここでは日中の地表面温度の観測値だけで本計算方法の検証を行ったが、今後は日変化スケールの観測値で詳細な検証を行う必要がある。

2. 流域観測による年蒸発量と熱収支計算による年蒸発量との比較

図一3に流域観測(1984年から1997年)による比謝川流域の年降水量と年流出量、年蒸発量の関係について示す。年降水量 Pr_y と年流出量 Q の関係は、

$$Q = 1.0903Pr_y - 449.6 \quad (14)$$

で表され(相関係数0.85)、1:1の直線とほぼ平行

図一3 比謝川流域の流量観測で得られた年降水量と年流出量、年蒸発量との関係

Fig. 3 Relationships among the annual rainfall, annual runoff, and annual evaporation, which were obtained from the measurement of flow rate of Hijya river basin

図-4 熱収支計算で得られた年降水量と年流出量、年蒸発量との関係

Fig. 4 Relationships among the annual rainfall, annual runoff, and annual evaporation, which were obtained from a calculation method of the heat balance

になっているのが理解できる。一方、年降水量から年流出量を差し引くことで算出した年蒸発量の11年間平均値は280mmであり、平均値からのばらつきの標準偏差は±189mmと非常に大きい。そこで、相関の高い(14)式が適用できると仮定すれば、年蒸発量は、 $280 \pm 25\text{mm}$ となり、ばらつきも小さくなる。つまり、(14)式から判断すると、本研究での降水量の観測値の範囲内では比謝川流域における年蒸発量はほぼ一定値に近づくと考えられる。多雨地域に存在する森林流域ではこのような結果が認められているが、都市流域においても同じような結果が得られたことは興味深い。

次に、図-4に熱収支計算による年降水量と年流出量、年蒸発量の関係について示す(1989年から1999年までの計算結果)。年降水量と年流出量の関係は、

$$Q = 0.9291Pr_y - 227.3 \quad (15)$$

で表される。熱収支モデルで算定した年蒸発量は、年降水量がほぼ同じ時でも違う場合がある。例えば、図-4の降水量2,000mm付近の2つのプロットに注目すると、降水量の差は11mmであるが、蒸発量の差は69mmである。これは、降水日数30日の差に起因すると考えられる。都市地表面が保有できる水の量は限られているので、年降水量が同じ場合、降雨日数が年蒸発量に影響を及ぼすようになる。11年間の蒸発量の平均値は368mmで平均値からのばらつきの標準偏差は±42mmであった。(15)式から、蒸発量の計算値は降水量や降雨日数の増大とともに増加するが、このばらつきの値が示すように、増加の割合は非常

に緩やかである。したがって、熱収支計算においても流域観測同様、本研究での降水量の観測値の範囲内では、比謝川流域における年蒸発量はほぼ一定値に漸近することが示唆された。

流域観測による年蒸発量は熱収支モデルによる年蒸発量より88mm少ない値になった。要因として、

- ①比較している年が若干違うこと。比較する年を揃えると80mmの差、
- ②観測測器の誤差(業者によると±1%。観測値より、最大で23mm程度考えられる。)、
- ③モデル計算では沖縄気象台のデータを用いたこと、

などが考えられる。③については、木村(2001)によると、那覇の年平均気温は比謝川流域の都市の年平均気温に比べて約0.5℃高いことが示されている。実際に気温を0.5℃低くして計算を行った場合、年蒸発量は約20mm小さくなる。これらの要因を総合的に考慮しても、年間37mmの誤差があるが、これは1日あたり0.1mmの量であり、気象データまたは熱収支法の計算誤差の範囲内と考えられる。ここで、蒸発量の計算誤差を見るために敏感度テストを行う。前にも述べたように、降水量推定値を流域付近の中部(金武、読谷、胡屋)のみで算定した場合、南部も含めた推定値よりも年降水量は約30mm(1日あたり0.1mm)小さくなる。そこで、1日あたり0.1mm降水量が多いと仮定して計算すると年蒸発量は34mm増加する。したがって、計算による年蒸発量の誤差は年降水量の誤差と同程度であることが伺える。次に蒸発の計算で用いたパラメーターに注目する。(7)式中の数値18は最大降雨継続時間であるが、これを6時間増加させて計算すると年蒸発量は44mm増加した。また、最大保水容量 $S_{\max}$ を1.5mmとして計算した場合、年蒸発量は43mm減少した。したがって、これら気象データとパラメーターによる年蒸発量の計算誤差は±40mm程度と考えられる。計算による年間37mmの誤差は熱量に換算すると 3Wm^{-2} 程度であり、一般的に言われている熱収支観測の誤差よりも非常に小さいことも考慮すれば、本研究のような簡便な方法でも、ある程度の精度で年蒸発量を計算できることが示された。

さて、本研究で対象とした流域には市街地の他に約7%の緑地が存在するため、流域全体からの蒸発量を考えるうえで、これらの存在を完全には無視できないであろう。このわずかな緑地がもたらす年蒸発量への影響については今後に譲りたい。

V. 熱収支計算法による都市域熱収支の季節変化

ここでは、前章で検証した熱収支計算法を用いて、沖縄本島都市域での熱収支の季節変化について考察する。

図一5に熱収支計算による地表面温度、顕熱フラックス、潜熱フラックスの季節変化(11年間平均)を示す。参考のため、日射量、気温、降水量の観測

図一5 日射量、降水量、気温、地表面温度、顕熱フラックス、潜熱フラックスの季節変化(1989年から1999年までの11年間平均値) 日射量、降水量、気温は観測値、地表面温度、顕熱フラックス、潜熱フラックスは熱収支計算による計算値。

Fig. 5 The seasonal variation of the daily mean values of solar radiation, temperature, surface temperature, sensible heat flux, latent heat flux, and daily amount of precipitation (average values from the year of 1989 to 1999). The solar radiation, precipitation, and temperature are the observed values, while the surface temperature, sensible heat flux, and latent heat flux are the estimated values using a calculation method of the heat balance.

値(沖縄気象台)も示す。

都市域の地表面温度の年平均値は25.6℃で、気温の23.1℃より2.5℃高い。温度差の季節変化をみると夏場が最も大きく(5℃程度)、冬場は小さい。一方、木村・石島(1999)によると、沖縄本島北部森林での地表面温度と気温の差は年間を通してほとんど見受けられない。

都市域での顕熱フラックスの年平均値は52.3 Wm^{-2} であった。北部森林では顕熱フラックスの年変動は小さく(年平均値は14 Wm^{-2})、夏場でも下向きのフラックスがあるのに対し、都市域では冬場のフラックスは小さく、夏場は大きいという季節変化が認められた。また、わずかな期間(主に1, 2月)でしか下向きのフラックスは認められない。

都市域での潜熱フラックスの年平均値は28.5 Wm^{-2} (368 mm^{-1})であった。木村・石島(1999)によると、北部森林での潜熱フラックスの年平均値は86.5 Wm^{-2} (1,115 mm^{-1})で、都市域ではその3分の1程度である。森林の潜熱フラックスは蒸散という生理活動による季節変化があるのに対し、都市域の潜熱フラックスの季節変化はその年の降雨量や降雨日数の季節変化に直接関係するという特徴がある。11年分を平均したため、潜熱フラックスが年間を通じてほぼ一定であるように見える。沖縄本島では、降雨量は主に梅雨期(梅雨入り、梅雨明けの平年日day=131~174)と台風期(8~9月、day=213~273)に集中するが、冬場にも弱い降水があり、降雨日数には季節変化が少ないためである。

ここで、蒸発量の内訳を季節を通して考察する。図一6に蒸発量の計算値の季節変化を示す(1989年から1999年までの平均値)。年蒸発量368mmのうち、降水中の蒸発量 E_i は178mm、降水後の蒸発量 E_a ($=S_a + R_e$)は190mmである。10月から5月は降水中の蒸発量より降水後の蒸発量が大きく、6月から9月はその逆である。これは主に気象状態の違いによると考えられる。すなわち、夏場は日射量や気温などが高いため、蒸発効率 β を1日中1としたときの日蒸発量 E_{max} が大きくなり、そのため降水中の蒸発量が多くなる。また、継続的に降雨がある冬場の方が、集中的に降雨がある夏場より、直接流出が少なくなることも大きな要因である。図一6には前日に蒸発しなかった保水量 R_e を参考のために示している。 R_e が大きいうことは地面が水分を保持している時間が長いことでもある。 R_e の値は1月から6月に大きく、日射量や気温が高くなる夏場では蒸発量のポ

図-6 蒸発量の季節変化 E_{day} は総蒸発量, E_r は降水中の蒸発量, E_A は降水後の蒸発量, R_E は前日に残った保水量。

Fig. 6 The seasonal variation of the evaporation. E_{day} is the total evaporation, E_r the evaporation during the rainfall, E_A the evaporation after the rainfall, and R_E the residual water in the previous day.

テンシャルが大きくなるため、保水された水分はその日のうちに蒸発し、 R_E は小さくなる。また、前にも示したようにこの期間(1月から6月)は降雨日数が多いことも要因の1つであり、夏場に比べると市街地における保水効果があると言える。

以上、熱収支計算方法を用いて沖縄本島都市域での熱収支の季節変化を検討した。現段階ではこれら熱収支の季節変化が本当に実態を表しているのかどうかは確認できない。しかし、都市域での熱収支季節変化の全般的な傾向を見るためにも、計算による補完は今後の都市域での熱収支の研究に必要であると考え。

VI. 人工排熱量の影響

都市域の熱収支を考える場合、(1)式には人工排熱量を考慮するのが一般的である(一の瀬ら, 1994)。ここでは、本研究で対象とした都市流域の人工排熱量について考察する。

木村(2001)は、都市と郊外の年平均気温差 ΔT_{u-r} (K)を用いて都市域の年平均顕熱フラックス H_{y_u} (Wm^{-2})を次式で表した。

$$H_{y_u} = H_y + \Delta H_{y_{u-r}} \quad (16)$$

$$\Delta H_{y_{u-r}} = \frac{1}{2} c_p \rho \frac{u \Delta T_{u-r}^2}{\Gamma L} \quad (17)$$

ここに、 H_y は郊外の年平均顕熱フラックス(Wm^{-2})、 $\Delta H_{y_{u-r}}$ は都市と郊外の年平均顕熱フラックスの差、

c_p は空気の定圧比熱($Jkg^{-1}K^{-1}$)、 ρ は空気密度(kgm^{-3})、 u は都市における風速(ms^{-1})、 Γ は温位傾度(Km^{-1})、 L は都市境界からの風下距離(m)である。詳細な計算方法は木村(2001)を参照されたい。

ここでは、都市流域に近い金武のアメダスデータを用いて H_{y_u} を計算した。 H_y は木村・石島(1999)による北部森林の計算結果から $14Wm^{-2}$ を引用し、郊外の年平均気温は奥のアメダスデータを用いた。奥のデータを用いたのは周囲3kmがほぼ森林で構成されているためである。(16)、(17)式より、都市流域に近い金武における年平均顕熱フラックスは $47Wm^{-2}$ となる。参考程度に示すと那覇では $52Wm^{-2}$ である。

H_{y_u} には人工排熱も含まれていると考えられるが、前章で求めた年平均顕熱フラックスが $52Wm^{-2}$ であることを考慮すれば、沖縄本島の都市域における人工排熱の影響はそれほど大きくないことが伺える。都市で発生する人工排熱は日射量の数十パーセントに匹敵すると言われているが、都市の気温上昇を説明するには問題点が多い(榊原, 2001)。今後は(16)、(17)式のような簡易モデルと詳細な熱収支モデルを組み合わせて、人工排熱の影響を検討することも有効であると考え。

VII. まとめ

都市域における熱収支の季節変化を把握するために、本研究では熱収支式にバルク式を組み合わせた計算方法(1次元モデル)を用い、この計算方法の都市域(沖縄本島都市域)に対する有用性および熱収支の季節変化について考察した。以下に概要を示す。

- (1)熱収支計算による地表面温度を、赤外線放射温度計による観測値と比較したところ、誤差 $1.1^{\circ}C$ で再現できた。
- (2)流域面積の90%以上が市街地で占められる沖縄本島の都市河川である比謝川流域の流量観測によって算定した年蒸発量は $280 \pm 25mm$ であった(1984~1997年)。また、熱収支計算による年蒸発量は $368 \pm 42mm$ であった(1989~1999年)。これらの結果より、本研究で扱った年降水量の範囲内では、年蒸発量はほぼ一定値に漸近することが示唆された。観測値と計算値の差は $37mm$ 程度あるが、敏感度テストにより気象データやパラメーターの誤差で $\pm 40mm$ 程度年蒸発量の計算に誤差が生じることを示した。
- (3)熱収支計算により、沖縄本島都市域における熱収支の季節変化がどのような特徴を持つか検討した。

都市域の地表面温度の年平均値は25.6℃で、気温より2.5℃高い。温度差の季節変化をみると夏場が最も大きく(5℃程度)、冬場は小さかった。都市域での顕熱フラックスの年平均値は 52.3Wm^{-2} であり、北部森林の 14Wm^{-2} に比べて非常に大きいことを示した。都市域での潜熱フラックスの年平均値は 28.5Wm^{-2} (368mm^{-1})であった。顕熱フラックスほどの明瞭な季節変化は見られないが、潜熱フラックスの季節変化は降雨量や降雨日数の季節変化と関係があることを示した。

(4)本研究で対象とした都市流域では、人工排熱の影響は小さいことが示された。

今後は降水量の日変化も考慮した詳細な熱収支の日変化計算も行い、本研究で用いた簡便な方法との比較を行う。そして、日本各地の都市にもこれらの方法を適用し、都市域における熱収支の実態把握に努める必要がある。

参考文献

- 一瀬俊明・花木啓祐・松尾友矩(1994)：細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析，環境工学研究論文集，**31**，263-273。
- 神田学・森脇亮・鈴木譲(2000)：住宅街の接地境界層における乱流フラックスの実測 —シンチロメーターの利用—，天気，**47**，453-462。
- 木村玲二(2001)：沖縄本島における気候の特徴と人工的因子が各地の気温に及ぼす影響について，農業気象，**57**(3)，(印刷中)。
- 木村玲二・石島 英(1999)：沖縄本島北部地域森林地帯からの蒸発散量の試算，琉球大学理学部紀要，**68**，13-21。
- 木村玲二・石島 英・横山拓哉(2001)：赤外線放射温度計による地表面温度と熱収支モデル計算による地表面温度の比較，天気，**48**，371-382。
- 近藤純正・桑形恒男(1992)：日本の水文気象(1)：放射量と水面蒸発，水文・水資源学会誌，**5**(2)，13-27。
- 近藤純正・中園 信・渡辺 力(1992)：日本の水文気象(1)：森林における降雨の遮断蒸発量，水文・水資源学会誌，**5**(2)，29-36。
- 近藤純正・中園 信(1993)：日本の水文気象(4)：地域代表風速，熱収支の季節変化，舗装地と芝生地の蒸発散量，水文・水資源学会誌，**6**(1)，9-18。
- Macdonald, R.W., R.F. Griffiths and D.J. Hall (1998)：An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays, *Atmos. Environ.*, **32**(11), 1857-1864。
- Petersen, R.L. (1997)：A wind tunnel evaluation of methods for estimating surface roughness length at industrial facilities, *Atmos. Environ.*, **31**，45-57。
- 榊原保志(2001)：都市表面からの顕熱供給と都市大気の混合が夜間ヒートアイランド形成に与える影響の比較，天気，**48**(5)，305-311。

(受付：2001年3月26日，受理：2001年10月12日)