

41. ジャカルタにおける土地利用変化が地表面温度および顕熱の空間分布に及ぼす影響

吉田 貢士^{1*}・安瀬地 一作¹・原科 幸爾²・栗原 伸治³・村上 暁信⁴

¹茨城大学農学部（〒300-0393茨城県稲敷郡阿見町中央3-21-1）

²岩手大学農学部（〒020-8550岩手県盛岡市上田3-18-8）

³日本大学生物資源科学部（〒252-0880 神奈川県藤沢市亀井野1866）

⁴筑波大学システム情報系（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1）

* E-mail: ayoshid@mx.ibaraki.ac.jp

世界各地のメガシティでヒートアイランド現象が深刻な問題となっている。その原因の一つとして、緑地や農地の減少に伴い、舗装道路やビルなどの人口構造物が増加する、いわゆる都市化が挙げられる。本研究ではインドネシア国ジャカルタ中心部を対象として、地表面の熱特性が異なる土地利用別の1次元熱収支モデルを構築し、衛星画像から得られる地表面温度の情報と組み合わせることにより、都市からの排熱の大部分を占める顕熱フラックスの広域的な空間分布を推定し、1930、1960、2000年の土地利用データを用いて当時の顕熱フラックス量を推定した。本研究の対象地域においては宅地面積率は1930年の16%から2000年の52%に増加した。それに伴い、顕熱フラックスは0.48から0.58 (MJm²/hr) に増加した。

Key Words : heat island, urban thermal condition, land use, satellite image, Jakarta

1. はじめに

1930年代にアメリカのニューヨークが世界で初めてのメガシティとなって以降、世界各地でメガシティが誕生している。また近年、発展途上国における開発が目覚ましく、それら途上国においてもメガシティが多く誕生している。メガシティの定義については諸説あるが、国際連合統計局の定義によると人口建造物や居住区、高人口密度地域が連続する都市化地域、つまり都市的集積地域の居住者が1000万人を超える都市のことである。このような都市で問題となっているのが、ヒートアイランド現象である。ヒートアイランド現象とは都市部の気温が郊外に比べて島状に高くなる現象のことで、これにより熱中症等を引き起こし、人間の健康に影響を及ぼすことが知られている。また、気温の上昇に伴い、エアコンの使用が増加する等エネルギー消費量の増加が問題となっている。ヒートアイランド現象の原因として考えられるのが、自動車やエアコンの室外機からの人工排熱、土地被覆の変化、気象・気候的また地理的な地域特性である。特に緑地や農地の減少に伴い、舗装道路やビルなどの人

口構造物が増加する、いわゆる都市化が、ヒートアイランド現象の温床であることは広く認識されている¹⁾。

ヒートアイランド現象により、大都市部の平均気温が上昇するといった気候の問題以外に、局地的な集中豪雨の発生や大都市周辺の大気汚染を招く可能性が指摘されている。このような開発に伴う居住区の温熱環境の悪化を防ぎ、または緩和するためには、地表面の被覆状況の変化が、地域の温熱環境に及ぼす影響を空間的に把握することが重要となる。また、緑地帯や水辺環境の効率的な配置等の都市計画に資する情報や技術の整備が、今後の急激な都市化が予測されているアジア諸国において求められている。近年、衛星リモートセンシング技術の発展によって、土地利用や土地被覆の状況および地表面温度等を広域的に把握し、評価する研究が多数試みられている。例えば、大西ら（2008）はLandsat（ETM+）とIKONOSを用いて地表面温度と詳細土地被覆情報の関係について研究を行った²⁾。また、熱収支モデルによる地表面温度の算出に関する研究も行われており、木村ら（2001）は1次元熱収支モデルにより算出した地表面温度と赤外線放射計による地表面温度を比較し、1次元熱

収支モデルにおいても比較的良好に地表面温度を再現できると結論付けている³⁾。また大西ら（2011）は空間地緑化が都市熱環境に与える影響についてシミュレーションを行い、その結果名古屋市の空間地緑化により最大で平均地表面温度を0.56℃下げる効果があると報告している⁴⁾。白木ら（2011）は、東京・大阪・ソウル・台北・ジャカルタ・バンコクと、それぞれ開発段階の異なる大都市の熱環境と土地利用を比較し、開発の段階により地表面温度ヒストグラムの傾向に違いが生じると報告している⁵⁾。これら既往の研究により、衛星画像と熱収支モデルを組み合わせた温熱環境の空間分布推定は有用な手法であることが示されている。よって本研究では衛星画像を用いて地表面温度の空間分布を把握し、熱収支モデルを利用することにより地表面被覆と温度の関係性を評価する。人工衛星は広域にわたって均質な空間精度で都市とその周辺地域を同時に観測することができる。また、熱収支モデルと衛星データをリンクさせることで広域にわたる詳細な熱環境を把握することができる。本研究では、インドネシア・ジャカルタにおいて、土地利用変化と地表面温度および顕熱の関係性を明らかにすることを目的とし、具体的には、地表面の熱特性が異なる土地利用別の1次元熱収支モデルを構築し、衛星画像から得られる広域の地表面温度情報と組み合わせることにより、顕熱量の空間分布を推定する。また、過去の土地利用データをリンクさせ、現在と過去の広域的な地表面温度と顕熱フラックスの空間分布を作成する。

2. 対象地域

研究対象地であるインドネシア共和国ジャワ島に位置するジャカルタ首都特別州（人口959万人、中央統計局2010）を中心とする都市域（ジャボタデベック）は、人口2000万人以上を有する世界屈指のメガシティである

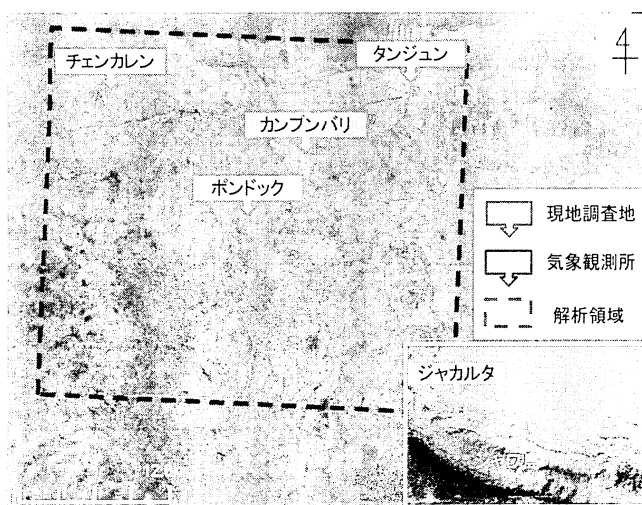


図-1 ジャカルタ概要図

（図-1）。近年の経済発展により都市域が急速に拡大したため、富裕層が居住する地区と貧しい人々が暮らすスラムが隣接して位置し、都市計画がいきとどかない無秩序な開発が進みつつある。一般に、都市化に伴う利便性や快適性を享受するのは主に富裕層である。先進国と異なり、途上国のメガシティでは気温の上昇に対してエアコン等の空調設備を持たない貧困層が、温熱環境の厳しい居住区に住むことを余儀なくされ、先述の局所豪雨や大気汚染の直接的な影響にさらされることになる。2012年9月8日から11日にインドネシア・ジャカルタのカンプンバリにおいて現地調査を行った。ミレニウムホテルの屋上（地上約50m）から赤外線サーモグラフィカメラ（FLIRシリーズi7）で日の出後の6時30分から日の入り前の17時30分まで1時間毎に各土地被覆の撮影を行った（図-2）。使用した赤外線サーモグラフィカメラの解像度は140×140ピクセルである。同時刻に携帯型赤外線放射温度計を使い、地上0.5mから同様の土地被覆の表面温度を計測した。ホテルの屋上に観測器を設置し、温湿度・風速・日射量を30分毎に計測した。ホテルの屋上から各観測点までは約50m離れている。赤外線サーモグラフィカメラで計測した地表面温度の精度を確かめるために、放射温度計で近接計測した地表面温度との相対誤差を求めた結果、各地表面において相対誤差が10%以下となり、赤外線サーモグラフィカメラの値は信頼できる精度を有することを確認した。また、サーモグラフィカメラの熱画像より、カンブンバリ地区の屋根やプール等の温度についても抽出を行った。川とアスファルトについて撮影した時系列画像を図-3に示す。

3. 1次元熱収支モデルの適用

各土地被覆の地表面温度から顕熱や潜熱フラックスを知ることは、都市の熱環境を明らかにするために重要で

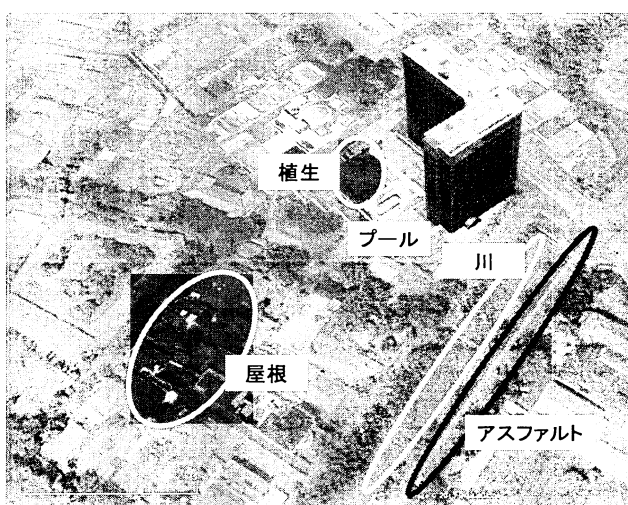


図-2 観測対象とした土地被覆

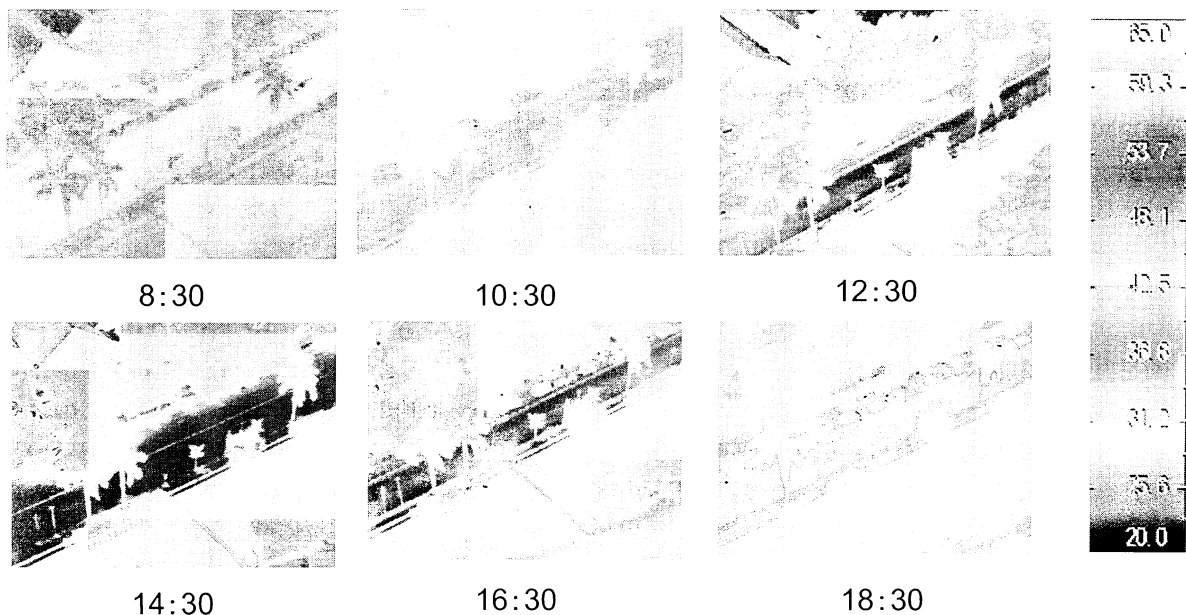


図-3 川およびアスファルトにおいて撮影した熱画像の時系列変化 (2012年9月10日)

ある。しかしながら、たとえ地表面温度が同じであっても、地表面の材料や乾湿条件によって、それらの値や割合は変化する。そこで、本研究ではペンマンモンティス法により得られた可能蒸発散量と地表面の材料や乾湿条件を表す蒸発散効率 β を用いて、気象データから地表面温度を求める1次元熱収支モデルを構築した。ペンマンモンティス法は、Daltonの輸送式と熱収支式を組み合わせたペンマン法に、熱伝達に対する空気力学的抵抗、水蒸気伝達に対する拡散抵抗を盛り込み、空気力学的抵抗に植物の群落抵抗を加えることによって植生からの蒸発散量の算定が可能となるよう修正されたものである。本研究ではFAOの推奨するペンマンモンティス式を用いて可能蒸発散量を計算した⁶⁾。この式は草丈0.23mのアルフalfaが一様に広がっており、土壤に十分な水分がある地表面を想定して導かれたものである。

$$ET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_a + 273} U [e_s(T_a) - e_a]}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U)} \quad (1)$$

ここで、ET：蒸発散量 (mm/hr)、 Δ ：温度飽和水蒸気曲線の勾配 (kPa/°C)、 R_n ：純放射量 (MJ/m²/hr)、 γ ：乾湿計定数 (kPa/°C)、 G ：地中熱伝導 (MJ/m²/hr)、 U ：風速 (m/s)、 e_s ：飽和水蒸気圧 (kPa)、 e_a ：水蒸気圧 (kPa)、 T_a ：気温 (°C) である。

地表面の熱収支は (2) 式で表すことができる。純放射は、地表面材料の熱特性や水分状態に応じて顕熱フラックス H 、潜熱フラックス IET および地中熱伝導 G に分配される。なお、 l は水の気化潜熱 (MJ/kg) である。

$$R_n = H + \beta \cdot IET + G \quad (2)$$

ここで、 β は地表面材料の熱特性や水分状態で変化するパラメータであり、土地利用の地目毎に異なる値を持つ。

純放射 R_n および顕熱放射 H は以下のように表される。

$$R_n = (1 - \alpha_s) R_s + \varepsilon_a \sigma T_{a,K}^4 - \varepsilon_s \sigma T_{s,K}^4 \quad (3)$$

$$H = F(T_s - T_a) \quad (4)$$

ここで、 α_s ：アルベド、 R_s ：全天日射量、 ε ：射出率、 σ ：ステファン・ボルツマン係数、 T_K ：ケルビン温度、 T_s ：地表面温度、 T_a ：気温、 F ：顕熱伝達係数であり、 F はフィッティングパラメーターとした。

地中伝導熱 G は次の式で表した。

$$G = \frac{K_g}{h_g} (T_s - T_g) \quad (5)$$

ここで、 K_g ：地中熱伝導率 (MJ/K/m/hour)、 h_g ：地温計測深さ (m)、 T_g ：地温 (°C) である。また地温 T_g は次の熱拡散方程式を差分法で計算した。

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \alpha_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \quad (6)$$

ここで、 z ：深さ (m)、 α_g ：地中熱拡散係数 (m²/s) で本研究では $\alpha_g = 3.98 \times 10^{-7}$ を用いた。計算の深さ刻みを0.2mとし、深さ10層つまり2mまで計算した。深さ2mにおける境界条件として、ジャカルタの年平均気温である $T_{(2m)} = 28^\circ\text{C}$ と設定した。

上記の式(1)から(6)を連立して解けば地表面温度 T_s が計算される。なお、地目別のアルベド α_s や射出率 ε は木村ら(2001)をもとに設定した²⁾。まず、水面における潜熱 IET はペンマンモンティス式から得られる可能蒸発散量に相当する熱量に等しいとし $\beta = 1$ と仮定する。また、表面が乾燥したアスファルトは、水分が全く存在しないため潜熱をゼロとし $\beta = 0$ と仮定する。この条件で現地調査で観測された気象データをインプットし、算出された地表面温度と実測値との値が最も近くなるように最小二乗法により計算した結果、顕熱伝達係数 $F = 9.9$ とな

った。また植生については $\beta = 0.9$ とした際に、実測値と最もよく一致した。各地目別の地表面温度の実測値と計算値を図-4に示す。アスファルトは1日を通じて温度変化の振幅が大きく、14時頃にピークをむかえた。水面(川)は日変化が小さく 30°C 前後を推移している。植生は最高で 40°C を記録したものの、最低温度は 27°C 前後と水面よりも地表面温度が下回る結果となった。

4. 衛星画像を利用した広域推定

先述の地表面温度推定のための1次元熱収支モデルを用いて、衛星画像から得られる広域における地表面温度GISデータをリンクさせて広域的な顕熱の分布を算出した。使用した衛星データはAsterのTIRセンサによって撮影された熱画像である。この衛星の回帰日数は16日で、センサの分解能は $90\text{m} \times 90\text{m}$ である。ジャカルタ付近の撮影時刻は午前11時である。本研究では雲のかかっていない2004年6月21日と2006年6月27日の画像を使用した。

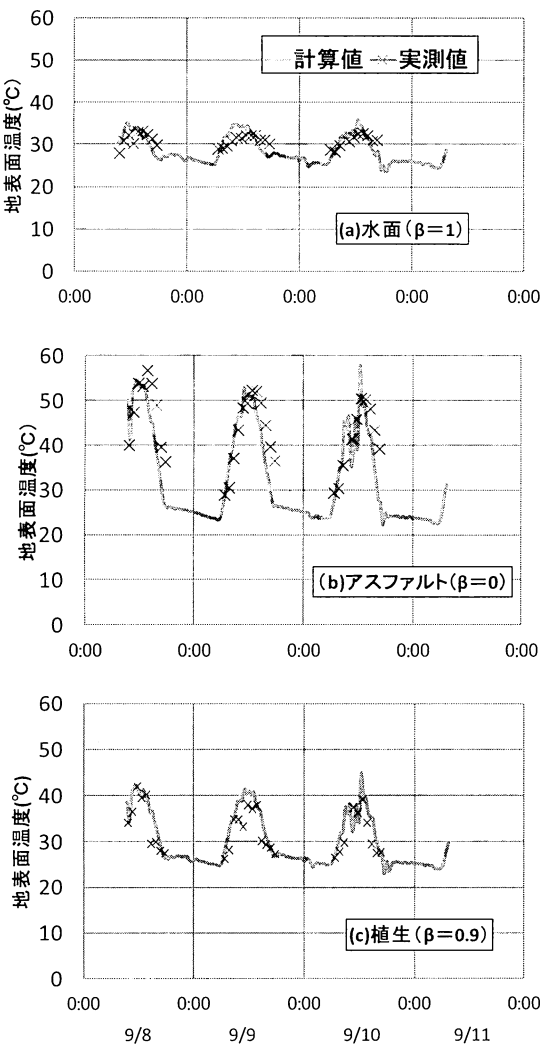


図-4 地目毎の表面温度の実測値と計算値

2004年6月21日撮影されたAsterの熱画像を図-5に示す。気象データはタンジュン、チェンカレン、ポンドックの観測所で観測された2004年6月および2006年6月を解析に用いた(図-1)。気象項目は気温、相対湿度、日照時間、風速で、観測間隔は時間単位である。この3観測所は現地観測を行ったカンブンバリを囲むように位置している。使用した土地利用データは古地図をもとに作成されたものであり1930年、1960年、2000年のデータを使用した。なお、土地利用データは500mメッシュである。各年の土地利用データを図-6に示す。このデータから宅地が大きく拡大し、森林や草が減少している事がわかる。解析範囲内の宅地率は1930年で16%、1960年で20%、2000年には52%に増加した。

1次元熱収支モデルによる地表面温度の計算値と衛星画像による各メッシュの地表面温度が一致するように、蒸発散効率 β の空間分布を計算し、2000年の土地利用図と重ね合わせることで、地目別の蒸発散効率 β の平均値を推定した(表-1)。森林や水域のような自然被覆は蒸発散効率が高い値となり、宅地は低い値となった⁷⁾⁸⁾。推定された各土地利用の β の値を1930年と1960年の土地利用に適用し、2004年6月21日の気象条件において土地利用のみを変化させた場合の顕熱フラックスを計算した(図-7)。なお、値は衛星の撮影時間である

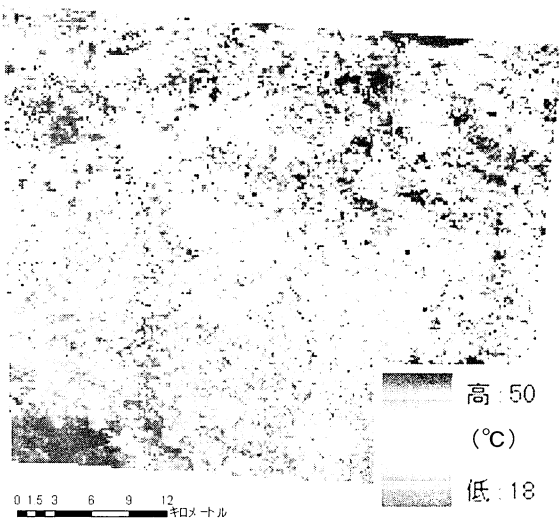


図-5 ジャカルタ解析範囲の地表面温度分布

表-1 土地利用別の蒸発散効率 β の推定値

土地利用	β の値
森林	0.86
水域・湿地	0.71
海	0.69
水田	0.58
その他農地	0.55
草地・荒地	0.49
宅地	0.39

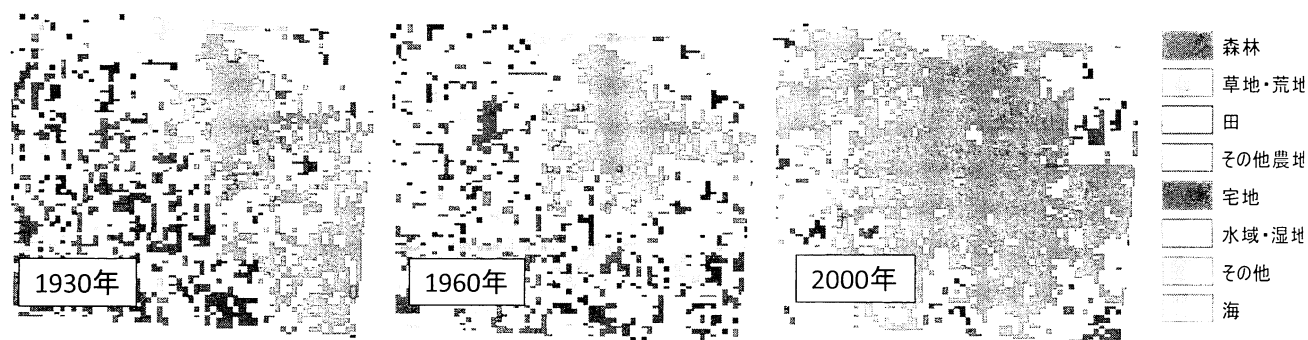


図-6 1930, 1960, 2000 年の土地利用図

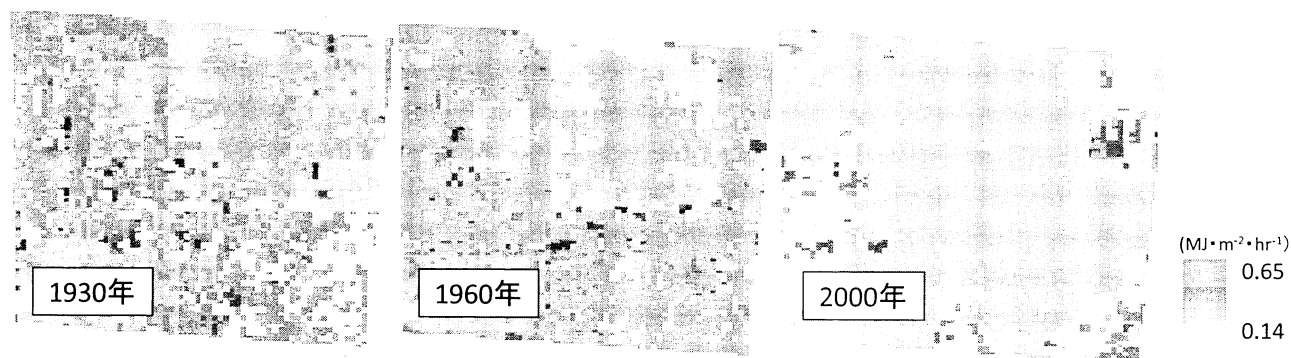


図-7 2004 年 6 月 21 日の気象条件をインプットとした顕熱フラックスの分布 (11:00 の値)

2004年6月21日11時の値を出力したものである。解析範囲内における総顕熱フラックスは1930年で6722, 1960年で7309, 2000年で8226 (MJ/hr) と宅地の拡大に伴って大きく増大することが分かる。単位面積当たりでは、それぞれ0.48, 0.52, 0.58 (MJ/m²/hr) であった。カンブンバリでの現地調査では、45件の建物のうち23件の屋根の材料がアスベス/トタンであり、22件が瓦屋根であった。本研究では宅地等の都市的土地利用について表面材量は1930年代も2000年代も変化しないものと仮定して計算を行っている。しかし、1930年代の建造物は木造が主であると考えられることから、上記の顕熱量の差は実際にはさらに大きいものと考えられる。

5. 結論

本研究では、土地利用別の温熱環境を再現する為に現地観測データを基に、1次元熱収支モデルを構築した。この1次元熱収支モデルに気象データをインプットすることで、地表面温度を算出することが可能となった。1次元熱収支モデルにより得られた地表面温度は、水面(川)、アスファルト、植生の各土地被覆において、実測値の傾向を精度よく捉えることができた。また、1次元熱収支モデルと衛星データを組み合わせることで、より広域的な温熱環境の再現を行った。各土地利用の蒸発散効率 β を推定し、過去の土地利用から顕熱フラックス

の空間分布を算出した。これにより、全体の土地利用に占める宅地割合が35%増加すると、顕熱フラックスの総量が22%増加することが示され土地利用変化と顕熱フラックスの関係について定量的に評価することができた。

本研究においては、土地利用ごとに蒸発散効率 β を決定し、過去の土地利用データから温熱環境の再現を行った。しかし、1930年代の家屋は木造であったと考えられ、顕熱フラックス量は、今回算出した値よりも小さいと考えられる。よって、より正確な顕熱フラックスの空間分布を算出するには、さらに詳細な土地利用データや各年代ごとの建築物の建設材料特性に関する調査および情報収集が必要である。

謝辞：本研究を進めるにあたり総合地球環境学研究所プロジェクト「メガシティが地球環境に及ぼすインパクト-そのメカニズム解明と未来可能性に向けた都市圏モデルの提案」および科研費(若手(B):24780228)の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 環境省：ヒートアイランド現象の実体解析と対策のあり方について，2000.
- 2) 大西暁生，森杉雅史，松村伸博，井村秀文，林良嗣：愛知県豊田市における詳細土地被覆情報の取得と熱環境解析への適応に関する研究，地球環境研究論文集，Vol.16, pp.181-190, 2008.

- 3) 木村玲二, 石島英, 横山拓哉: 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, Vol.48(6), pp.371-382, 2001.
- 4) 大西暁生, 森杉雅史: 名古屋市中心部における空地緑化が都市熱環境緩和に与える影響, 社会技術研究論文集, Vol.8, pp.149-158, 2011.
- 5) 白木洋平, 山下亜紀郎, 谷口智雅, 香川雄一, 一ノ瀬俊明, 豊田知世, 吉越昭久, 谷口真人: アジアのメガシティにおける都市の発展が郊外との温度差に与える影響, 地球環境研究論文集, Vol.13, pp.107-113, 2011.
- 6) Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M.: Crop evapotranspiration – guideline for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy., 1998.
- 7) 横張真, 加藤好武, 山本勝利: 都市近郊水田の周辺市街地に対する気温低減効果ランドスケープ研究: 日本造園学会誌, Vol.61(5), pp.731-736, 1998.
- 8) 田中貴宏, 森山正和, 佐川朋子, 山下卓洋: 夏季の大阪市中心部における放射輝度温度分布の詳細な特徴, 日本建築学会環境系論文集, Vol.599, pp.119-126, 2006.