

住宅街における熱収支とCO₂フラックスの年間積算値

ANNUAL TOTALS OF ENERGY AND CO₂ FLUXES IN A RESIDENTIAL AREA

森脇 亮¹・神田 学²

Ryo MORIWAKI and Manabu KANDA

¹正会員 東京工業大学 理工学研究科土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

²正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

Based on one year of field measurements, we described the annual fluxes of energy and CO₂ at a residential area of Tokyo. The major findings are as follows. 1) The total of R_n , H , and LE was 2.36, 1.35, and 0.90 GJ m⁻², respectively. The latent heat flux LE was large despite the small areal fraction of natural coverage (trees and bare soil). The estimated local latent heat flux per unit natural coverage was two times larger than the available energy (R_n+A), which indicates that the ‘oasis effect’ was significant. 2) The annual CO₂ flux was upward due to fossil fuel consumption in houses and traffic and human bodily exhalations. The total CO₂ flux was 3352 gC m⁻² and was six times larger than the downward CO₂ flux at a typical temperate deciduous forest.

Key Words: Urban environment, Energy balance, CO₂ flux, Annual total, Global climate, FLUXNET

1. はじめに

地球温暖化などのグローバル気候変化に対し、地表から大気へのインパクトを評価するために、植生などの各種陸上生態系では、世界各地でフラックスをモニタリングするためのネットワーク (FLUXNET) が構築されている (例えば、Baldocchi et al. 2001¹⁾)。しかしながら、我々の生活の拠点であり世界の人口の約半数が集中する都市域においては、都市地表面と大気間におけるエネルギー・物質交換および乱流輸送過程に対する理解が遅れている。近年は都市域における熱収支計測の重要性への認識が高まり、世界各地で現地観測プロジェクトが行われつつあるが (例えば、Bubble²⁾, ESCOMPTE³⁾, 琵琶湖プロジェクト⁴⁾など)、長期間に及ぶ連続データはいまだ十分でない。筆者らは、2001年5月から住宅街にタワーを建設してフラックスの長期連続計測を行い、これまで晴天時のフラックス (森脇・神田、2003⁵⁾) や水文陸面パラメータ (森脇ら、2002⁶⁾) について報告してきた。本報では、観測データに基づいて熱収支とCO₂フラックスの年間収支を算定し、都市が大気圏に与えるインパクトについて調べた。都市域におけるフラックスの

年間収支はこれまで示された例がなく他都市との比較は難しいが、同緯度に位置する森林の結果と比較することで、都市域がもつ気候学的役割を定量的に議論した。また実測された住宅街全体の潜熱・CO₂フラックスに対する、①庭木、②人工材料 (コンクリートとアスファルト)、③自動車からの排出、④家庭における燃料消費、⑤人間からの排出、を関連データから推定し、それぞれのフラックスへの寄与度を検討した。

2. 観測サイトの概要と解析手法

観測場所の情報や解析手法については既存の論文^{5,6)}に詳しく説明されているので、ここでは概要のみを示す。

(1) 観測サイト

観測タワーの設置点は東京都大田区久が原である。周辺の地域は1km四方に渡り高さのほぼ均一な低層住宅地 (平均高さ7.3m) が広がっている (図-1)。建蔽率は33%程度であり西欧に比べると比較的建物が密集した住宅街である。観測サイトの幾何パラメータを表-1にまとめた。

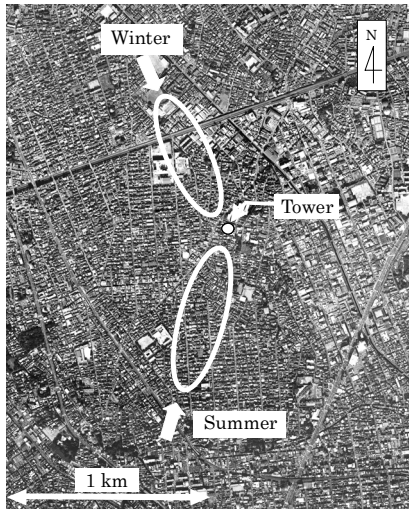


図-1 観測地域周辺の航空写真(139°41'E, 35°34'N), 図中の白丸は, 夏季・冬季の卓越風向に対する代表的なフラックスソースエリア (Schmid (1994)⁷⁾ のモデルを用いて算定した)

(2) 計測手法

測定項目と測定機器の一覧を表-2に示す。都市キャノピーの約4倍の高度(地上29m)に三次元超音波風速温度計(Metek社; USA-1)とオープンパスCO₂/H₂Oアナライザー(Li-cor社; LI-7500)を用いて, 3次元風速・気温・CO₂濃度・水蒸気濃度の瞬間値を8Hzのサンプリング周期で計測した。タワーによる流れ場の乱れによるフラックス観測誤差を最小限に抑えるため, これらの測定機器はタワー頂上部に設置している。高度25mには, 日射計・赤外放射計を設置して鉛直上向きと下向きの短波放射・長波放射を計測した。地上には降雨の有無を確認するための雨量計を設置した。測定データはデータロガー(Campbell社; CR10X)に一時的に収録し, 2分間隔で地上に設置したノートPCにデータを保存した。

(3) データ解析手法

a) フラックスと熱収支

顕熱・潜熱・CO₂フラックスの算出には渦相関法を用いた。フラックス算出の乱流統計時間は60分で, 風速計の傾き補正のための傾度補正⁹⁾を行っている。水蒸気とCO₂フラックスの算出には, 空気の密度変化による誤差を補正するためにWPL補正⁹⁾を加えている。放射・熱収支の解析は以下のように行った。正味放射量 R_n は次式のように放射より算出される。

$$R_n = S^{\downarrow} - S^{\uparrow} + L^{\downarrow} - L^{\uparrow} \quad (1)$$

ここで, S^{\downarrow} は全天日射量, S^{\uparrow} は上向き短波放射量, L^{\downarrow} は大気放射量(下向き長波放射量), L^{\uparrow} は地表面赤外放射量(上向き長波放射量)である。

また熱収支式は次式,

$$R_n + A - G = H + LE + Q \quad (2)$$

で表される(図-2に熱収支の概念図を示す)。正味放射量 R_n と人工排熱量 A を足したものから地中熱流量 G を差し引いたものは, 顕熱 H と潜熱 LE , および, 測定高度と地表間の空気貯熱量 Q に変換される。

表-1 都市の土地利用パラメータ

平均建物高さ	Z_H	7.3m
建蔽率	λ_p	32.6%
緑被率	λ_v	20.6%
不浸透面被覆率	λ_i	38.3%
(アスファルト)		(26.1%)
(コンクリート)		(12.1%)
裸地面被覆率	λ_G	8.5%

表-2 気象測定項目と測定機器

測定項目	測定機器	サンプリング 周波数・高度 ・解析手法
顕熱・潜熱・CO ₂ フラックス	3次元超音波風速温度計(Metek社; USA-1) オープンパスCO ₂ /H ₂ Oアナライザー(Li-Cor社; LI-7500)	8Hz・29m・ 渦相関法
全天日射量	ネオ日射計(英弘精機, MS-42)	1Hz・25m・
上向き短波放射量	短波放射計(英弘精機, MS-62)	平均
大気放射量	赤外放射計(英弘精機, MS-202)	
上向き長波放射量	赤外放射計(英弘精機, MS-201)	
雨量	転倒ます雨量計(英弘精機, MW-010)	—

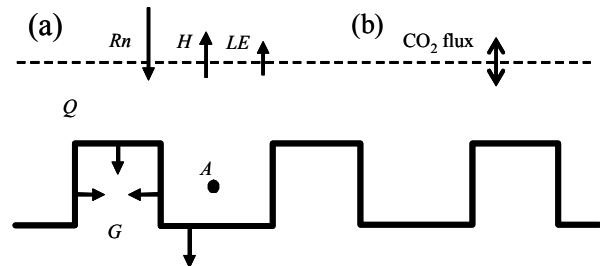


図-2 (a)熱収支と(b)CO₂フラックスの概念図

都市では屋根面, 壁面, 道路, 庭などから構成されるため, G を正確に測定することは不可能である。そこで本研究では, 測定された R_n, H, LE, Q と東京の人工廃熱データベース(妹尾ら, 2004¹⁰⁾)から計算した A を式(2)に代入することにより, 残差項として G を算定した。

b) 年間収支の算定

本研究では, 欠測の少ない2001年5月1日から2002年4月30日までのデータを使用して年間のフラックスを評価する。しかしながら, 降雨やセンサー不良による欠測は避けられず, 年間積算に利用できるデータは全体のデータセット数のうち71%である。そこで残りの欠測分は以下のように補完を行った。降雨によるデータ欠測(全体の10%)は対象日の前後2週間内に存在する曇天日のデータを用いて補完した。またセンサー不良によるデータ欠測分(全体の19%)は該当日に近い気象条件を持つ日の時間データを用いて補完した。

c) キャノピー構成要素の寄与度

実測された住宅街全体のフラックスに対する都市キャノピー構成要素の寄与度の推定方法は, 基本的に

Moriwaki and Kanda (2004)¹¹⁾ に準じているため、以下では概要のみ述べる。

①庭木と土壌

本観測エリアの緑被面積比は約20%である。ここでは、同緯度の落葉広葉樹林におけるフラックス観測結果 (Baldocchi and Wilson, 2001¹²⁾) に緑被率を乗じることでの潜熱とCO₂フラックスの寄与を算出した。ここでは樹種および環境に対する植物の応答性が同じであると仮定してフラックスを見積もることとする。

裸地面における潜熱やCO₂は土壌水分や生物量などに依存するためその評価は難しいが、裸地面被覆率が小さいことを鑑みて、本研究では裸地面蒸発は可能蒸発量 [$PE=1.26 s/(s+\gamma) (Rn+A-G)$ 、ここで s は気温に対する飽和比湿の変化率、 γ は空気熱容量に対する水の気化潜熱の比] (Priestly and Taylor, 1972¹³⁾) に等しいと仮定した。また裸地のCO₂フラックスは無視できると大胆に仮定した。

②人工材料 (コンクリートとアスファルト)

コンクリートは大気中のCO₂を吸収して中性化する性質があるが、その速度は非常に遅く気象学的に見て無視できる。一方、潜熱については次のように算出した。コンクリートとアスファルト片の屋外暴露実験を行った。1日1回コンクリートの質量を計測し、その重量変化から潜熱フラックスを算定した。

③自動車交通からの人工排出量

自動車交通からの排出については、東京都環境局がまとめた東京都区部 (対象面積439 km²) の時間帯別走行量に排出原単位を乗じて求めた。

④家庭からの人工排出

家庭からのCO₂排出源は、化石燃料 (ガスや灯油) の直接消費量 (榊原、2000¹⁴⁾) に排出原単位を乗じて求めた。人工的に排出される水蒸気の可能性について、地域冷暖房システムが導入されている商業地域では、冷却塔からの水分蒸発による人工潜熱が大きいことが神田ら (1997)¹⁵⁾、妹尾ら(2004)¹⁰⁾によって指摘されている。しかし本観測対象地域である久が原地区にはこのような地域冷暖房システムは存在せず、大規模な道路散水なども行われていないため、この影響は無視できると考えられる。

⑤人体からの排出

人間の呼吸や発汗によるフラックスへの寄与は以下のように求めた。体重60 kgの人が呼吸、汗によって放出する水蒸気は一日に約0.8 Lである。また人間は呼吸により一人あたり8.87 mg s⁻¹人⁻¹のCO₂を放出している。これに久が原地域の人口密度 (1.1×10² 人m⁻²) を乗じて、それぞれの寄与度を推定した。

3. 結果と議論

エネルギー・CO₂フラックスの季節変化を簡単に述べておく。熱収支とCO₂フラックスの月別変化を図-3に示す。顕熱 H は Rn の季節変化に応じて変化し、夏季の H は

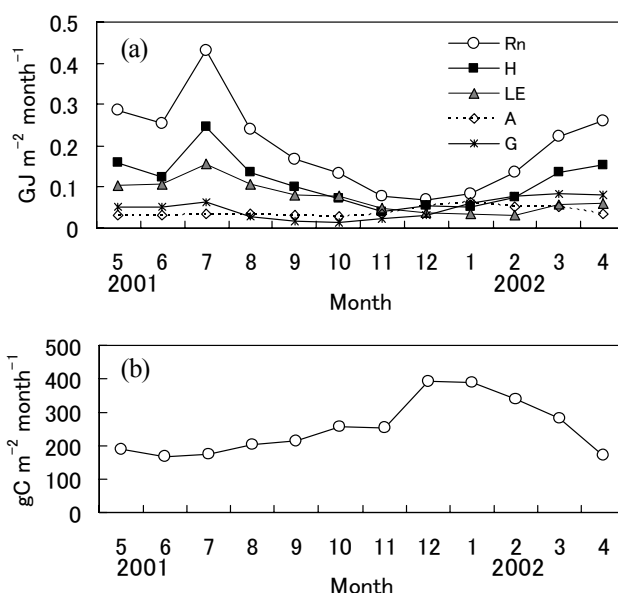


図-3 (a)熱収支と(b)CO₂フラックスの月別変化

冬季の H の3~4倍である。潜熱 LE は顕熱ほどではないが熱収支の中で大きな割合である。人工排熱 A は冬季に Rn と同程度の大きさであり、熱収支の中で重要なエネルギーソースになる。残差から求めた G は年間を通して正の値になる。この理由は次節で説明する。CO₂フラックスは年間を通して上向きであり、その値は冬に大きく夏に小さい。発生源に関する検討は(5)節で行う。

表-3にエネルギー・CO₂フラックスの年間収支を示す。比較のため、森林の計測によって得られた年間積算値も合わせて示した。森林のデータはFLUXNETの観測点の一つであり、本対象地域とほぼ同緯度にある落葉広葉樹林 (Oak Ridge, USA, 35°57'N) の観測データ (Wilson and Baldocchi, 2000¹⁶⁾; Baldocchi and Wilson, 2001¹²⁾) を用いた。

(1) 年間の熱収支とインバランス問題

年間の Rn , H , LE はそれぞれ 2.36, 1.35, 0.90 GJ m⁻²であった。潜熱に比べて大きい顕熱が放出されているのは都市の特徴であり、森林とは対照的である。妹尾ら¹⁰⁾による人工排熱データベースを用いて算出した人工排熱 A の年間積算値は0.49 GJ m⁻²である。年間の熱収支では $G=Q=0$ となるため、熱収支は $Rn+A=H+LE$ となるはずであるが、実際には $Rn+A>H+LE$ となっている。これは「インバランス問題」としてよく知られており、点計測によるフラックス評価には避けられない問題となっている (例えば、神田ら(2002)¹⁷⁾)。インバランスの割合 ($Rn+A)/(H+LE)$ は約0.8であり、既存の報告例と同程度である (例えば、Wilson et al., 2002¹⁸⁾; Lee, 1998¹⁹⁾; Kanda et al., 2004²⁰⁾)。特にWilson et al. (2002)¹⁸⁾は森林における長期観測に基づいて年間フラックスを検討した結果、インバランス割合が約0.8であると指摘しており、本研究の結果と一致している。一方、木内(2003)²¹⁾は家庭での給湯などを通して水圏へ流出する熱量が都市域で発生す

表-3 熱収支・CO₂フラックスの年間収支

	住宅街 (本研究)	落葉広葉樹林 (Wilson and Baldocchi (2000), Baldocchi and Wilson (2001))
降水量 P (mm)	1722	1454
気温 (°C)	16.0 at 29 m	14.9
% 実測データが占める割合の百分率	71%	78%
日射量 S_{down} (GJ m ⁻²)	4.69	5.43
正味放射量 Rn (GJ m ⁻²)	2.36	3.04
顕熱 H (GJ m ⁻²)	1.35	1.05
潜熱 LE (GJ m ⁻²)	0.90	1.39
蒸発量 (mm)	369.5	567.2
CO ₂ フラックス (gC m ⁻²)	3352	-460 to -620
人工排熱 A (GJ m ⁻²)	0.49	---

表-4 年間の潜熱・CO₂フラックスに対する各構成要素の寄与

	潜熱 (GJ m ⁻²)	CO ₂ フラックス (gC m ⁻²)
実測に基づく積算値	0.90	3352
植生・土壌	0.40	-110
アスファルト・コンクリート	0.12	-1
自動車交通量	0	2838
家庭における燃料消費	0	2442
人体	0.01	849
寄与度の合計	0.53	6018

る人工排熱の1割程度にも達することを指摘している。熱収支式を満たさないエネルギーの一部は水圏へ流出していることも十分に考えられる。

(2) 都市植生のオアシス効果

顕熱・潜熱へのエネルギー配分率であるボーエン比 $Bo=H/LE$ は1.5である。夏季の日中において、都市植生にはオアシス効果が働き、単位面積あたりの庭木では Rn と同等かそれ以上の潜熱が放出されることが指摘されているが(森脇・神田, 2003⁵⁾)、年間値でも都市域から多くの潜熱が放出されていることがわかった。

Hagishima et al. (2004)²²⁾は、ポット植生の配置密度を変えてオアシス効果の定量的評価を試み、単木の場合1.5倍程度の蒸発促進が見られることを実証している。高温乾燥化した住宅街に樹木が点在する環境下では植物体内と外界との水蒸気圧差(飽差)が大きくなるため植物は水分を失いやすい。つまり高いオアシス効果によって庭木から大量の潜熱が大気に放出されていると考えられる。

本研究では降雨中のデータは曇天時のデータで置き換えてフラックスを年間積算しているため、潜熱の積算値を過小評価している可能性がある。実際には降雨中の遮断蒸発によりもっと大きな潜熱が発生している可能性もあり、年間の水収支をさらに精度良く評価するためには

降雨中の潜熱フラックスの評価手法の確立が必要であるといえる。

(3) 本地域の気候学的特徴

日射量に対する Rn の比 (Rn/S) は0.50である。日射エネルギーの約半分が地表面フラックスに利用できるエネルギーに換算されている。この値は、森林の値0.56に比べると少し小さい値である。都市の Rn/S が小さいという結果は、都市の表面では森林に比べて温度が高くなるため多くの長波放射エネルギーを大気に放出することが原因になっていると考えられる。

放射乾燥度 $RDI=Rn/LP$ (Radiative Dryness Index, Budyko (1974)²³⁾) は陸面の湿り具合を示す気候学的指標としてよく用いられている (LP は降水量 P を蒸発させるのに必要な熱量, $RDI < 1$ のとき降水は土壌を湿った状態に保ち続ける)。本研究で得られた RDI は 0.56であり、湿潤な気候条件下にこの地域が存在することを意味している。このような気候条件下では植物への水分供給が十分であり水ストレスが生じないため、前節で述べたような植生のオアシス効果が顕著であったと考えられる。一方、年間の蒸発量と降雨量はそれぞれ228 mm と1362 mmだった。これから計算される蒸発・降水比 (E/P) は 0.21であり、森林の値 (0.39) と比べて半分程度であ

る。これは湿潤な気候にあっても、降水の大部分が流出してしまうことを意味しており、都市の不浸透化と下水道システムの発達を示唆する興味深い結果である。

(4) 年間のCO₂フラックス

人為起源のCO₂発生により都市域はCO₂の発生源になっており、その定量的把握が地球温暖化の予測上急務となっている。本地域のように植生が混在するような住宅街ではその評価は難しく、現地計測による直接計測が必要である。計測されたフラックスを年間積算した結果、本地域はCO₂の発生源になっており、その大きさは年間で3352 gC m² yr⁻¹であることがわかった。同緯度の落葉広葉樹林の吸収量が-450 to -620 gC m² yr⁻¹である (Baldocchi and Wilson, 2001¹²) ことを考慮すると、本地域で発生したCO₂を森林に吸収させるためには、約6倍の面積の森林が必要であることが明らかになった。

(5) 都市キャノピー構成物の寄与度に関する検討

最後に潜熱・CO₂フラックスの年間積算値と、都市キャノピーを構成する各要素（庭木、人工材料、自動車、家庭における燃料消費、人間の呼吸）の寄与度を検討する（表-4）。

a) 潜熱

自動車交通、家庭からの排出、人体からの放出はほとんど無視できる。一方、主要な蒸発源として考えられるのは、植生と土壌である。人工材料からの蒸発も無視し得ない大きさ（0.12）であり、意外にもコンクリートが降雨時に水を吸収し、水分の蒸発源になっていることがわかった。推定した寄与度の合計値は0.53 GJ m²となるが、この値は実測値0.90 GJ m²の約半分程度にしかならない。3（2）節で述べたように、都市植生にはオアシス効果が働く。一様な植生におけるフラックスデータに緑被面積を乗じただけでは、オアシス効果が働く都市植生の蒸発量を過小評価してしまう可能性があるため注意が必要である。

b) CO₂フラックス

主要な発生源は、自動車交通、家庭における燃料消費、人体の呼吸である。植生・土壌は吸収源として作用するがその値は小さく、都市域のCO₂フラックスは人為起源のCO₂発生に強く影響を受けている。図-3で示したようにCO₂フラックスは季節変化し、冬に大きく、夏に小さい。交通量や人体からの排出は年間を通じてほとんど変化しないため、フラックスの季節変化は説明できない。この季節変化を説明しうるのは、植生によるCO₂吸収と家庭からの排出である。冬季は家庭では暖房や給湯用に化石燃料の直接消費（ガスや灯油）が多くなるためCO₂の排出量も多くなる。

各寄与度の合計値は6018 gC m²であり、実測値3352 gC m²より過大に評価されている。各構成要素の寄与度はラフな見積もりであり必ずしも実測値に一致する必要はないが、この差を説明する要素としては次の2つが考

えられる。1つはCO₂フラックスの計測値がインバランス問題の影響により過小に評価されていることである。神田ら(2002)¹⁷は点計測による熱フラックスが過小評価される原因として、大規模な乱流組織構造による平均流の存在を指摘しているが、点計測によるCO₂フラックスにも同様なメカニズムによる過小評価が生じていることは十分に考えられる。もう1つは都市植生によるCO₂吸収が推定値よりも大きいかもしれないことである。例えば、オアシス効果の場合、乾燥した都市環境に点在する植生からの蒸発が大きくなるが、これと全く同様のメカニズムにより、高いCO₂濃度の環境下におかれた都市植生がCO₂を効率よく吸収することは十分に考えられることである。ただしCO₂ガスの吸収速度は気相での拡散だけで決まるのではなく植物の生理機能にも影響される²⁴ため、この考察には注意が必要である。

4. 結論

放射・熱・水・CO₂フラックスの連続計測により、住宅街におけるフラックスの年間収支を評価した結果、以下のことが主要な結論として得られた。

1) 年間のR_{nl}は2.36 GJ m²で、1.35 GJ m²（約60%）が顕熱H_lに、0.90 GJ m²（約40%）が潜熱LE_lに配分されている。都市域でも潜熱が多く放出されているのは、都市植生にオアシス効果が働くためである。都市域の水収支を把握する上で、単木からの蒸発、降雨中の遮断蒸発の正確な評価が今後の大きな課題である。

2) CO₂フラックスは人為起源の発生源（自動車交通、家庭における燃料消費、人体の呼吸）に大きく影響を受け、年間のCO₂発生量は3352 gC m² yr⁻¹である。森林のフラックスデータと比較したところ、本地域で発生したCO₂を吸収するためには約6倍の面積の森林が必要である。

将来的に都市域の拡大が予想される中、都市域がグローバル気候に及ぼすインパクトをより正確に把握・予測するために、様々な都市にフラックスネットを整備し知見を集積することが重要である。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究（B）（2）（課題番号：15360262）および若手研究（B）（課題番号：16760404）、科学技術振興機構・戦略的創造研究（代表：神田学）による財政的援助を受けた。また観測場所の提供には、宗教法人カトリックおかげのフランシスコ修道会（代表：釘宮禮子様）に多大なるご協力をいただいた。ここに合わせて謝意を表す。

参考文献

- 1) Baldocchi, D., Flage, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T.,

- Munger, W., Oechel, W., Paw U, K.T., Pilegaard, K., Schmid, H.P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K., and Wofsy, S.: FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82, pp.2415-2434, 2001
- 2) Vogt, R., Christen, A., Rotach, M.W., Roth, M., and Satyanarayana A.N.V.: Fluxes and profiles of CO₂ in the urban roughness sublayer. *Theor. Appl. Climatol.*, 2004, in press.
- 3) Lemonsu, A., Grimmond, C. S. B., and Masson, V.: Modeling the surface energy balance of the core of an old Mediterranean city: Marseille. *Journal of Applied Meteorology*, 43, pp. 312-327. 2004.
- 4) 田中賢治・中北英一・池淵周一：琵琶湖プロジェクトの陸面過程モデリング，*水工学論文集*，42，pp.79-84, 1998.
- 5) 森脇亮，神田学：都市接地層における放射・熱・水・CO₂フラックスの長期連続観測，*水文・水資源学会誌*，16，pp.477-490, 2003.
- 6) 森脇 亮，神田 学，渡邊倫樹，松永和章：都市域の陸面パラメーターの算定，*土木学会水工学論文集*，46，pp.91-96, 2002.
- 7) Schmid, H.P.: Source areas for scalars and scalar fluxes. *Bound-Layer Meteor.*, 67, pp.293-318. , 1994
- 8) McMillen, R.T.: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain., *Boundary-Layer Meteorol.*, 43, pp.231-245, 1988.
- 9) Webb, E.K., Pearman, G.I., and Leuning, R.: Correction of flux measurement for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106, pp.85-100, 1980.
- 10) 妹尾泰史，神田学，木内豪，萩島理：潜熱割合を考慮した人工排熱時空間分布の推計と都市局地気象に対する影響，*土木学会水工学論文集*，48(1)，pp.169-174, 2004.
- 11) Moriwaki, R. and Kanda, M.: Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor and CO₂ over a suburban area. *Journal of Applied Meteorology*, 43, pp.1700-1710, 2004.
- 12) Baldocchi, D., and Wilson, K.: Modeling CO₂ and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales. *Ecol. Model.*, 142, pp.155-184, 2001.
- 13) Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J.: On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Wea. Rev.*, 100, pp.81-92, 1972.
- 14) 榊原幸雄：家庭部門のエネルギー消費実態について，*エネルギー経済*，26，pp.17-35, 2000.
- 15) 神田学，高柳百合子，横山仁，森脇亮：銀座オフィスビル街における熱収支特性，*水文・水資源学会誌*，10，pp.329-336, 1997.
- 16) Wilson, K. and Baldocchi, D.: Seasonal and interannual variability of energy fluxes temperate deciduous forest in North America. *Agric. For. Meteorol.*, 100, pp.1-18, 2000.
- 17) 神田 学，稲垣厚至，マルコス オリバー レッツェル，ジークフリード ラッシュ：点計測乱流量の空間代表性に関する理論的検討—インバランス問題の物理的解釈—，*土木学会水工学論文集*，46，pp.97-102, 2002.
- 18) Wilson, K., Goldstein, A., Flage, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, A., Law, B.E., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R. and Verma, S.: Energy balance closure at FLUXNET sites, *Agric. For. Meteorol.*, 113, pp.223-243, 2002.
- 19) Lee, X.: On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agric. For. Meteorol.*, 91, pp.39-49, 1998.
- 20) Kanda, M., Inagaki, A., Letzel, M.O., Raasch, S., and Watanabe, T.: LES study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes. *Bound-Layer Meteorol.*, 110, pp.381-404, 2004.
- 21) 木内 豪：都市の水利用が公共用水域に及ぼす熱的影響の長期的変化—東京都区部下水道と東京湾を事例として—，*土木学会水工学論文集*，47，pp.25-30, 2003.
- 22) Hagishima, A., Narita, K.-I., and Tanimoto, J.: Field experiment on the oasis effect of urban areas using potted plants. Preprints, Fifth conference on urban environment, Vancouver, Canada, Amer. Meteor. Soc. 2004.
- 23) Budyko, M.I.: *Climate and Life*, Academic Press, New York, pp.508, 1974.
- 24) 大政謙次編：植物の計測と診断，朝倉書店，pp.239, 1995.

(2004. 9. 30受付)

論文の要点説明書

論文題目： 住宅街における熱収支とCO₂フラックスの年間積算値

著 者： 森脇 亮、神田 学（東京工業大学）

住宅街におけるフラックスの長期観測データを用いて、住宅街における熱収支とCO₂フラックスの年間収支を算定した。森林など自然生態系で行われているフラックス観測網（FLUXNET）では同様の研究が行われているが、都市域ではこのような世界で初めての試みである。本研究では都市が大気圏に与えるインパクトについて定量的に議論し、同緯度に位置する森林の結果と比較することで、都市域がもつ気候学的役割・CO₂収支への影響を明らかにした。さらに庭木、家屋、自動車交通、人体、人工被覆の寄与を算出し、年間のフラックスに対する寄与を評価した。本論文は水文・水資源学会誌に掲載された論文（森脇・神田、2003）と同じデータソースを用いているが、それが晴天日のフラックスの日変化に主に着目しているのに対し、本論文は年間のフラックス積算値を主に議論している点で該当論文とは性格を異にしている。

本論文の主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 年間のR_n は 2.36 GJ m⁻² で、1.35 GJ m⁻²（約60%）が顕熱に、0.90 GJ m⁻²（約40%）が潜熱に配分されている。都市域でも潜熱が多く放出されているのは都市植生にオアシス効果が働くためである。
- 2) CO₂フラックスは人為起源の発生源（自動車交通、家庭における燃料消費、人体の呼吸）に大きく影響を受け、年間のCO₂発生量は3352 gC m⁻² yr⁻¹になる。本地域で発生したCO₂を吸収するためには約5倍の面積の森林が必要である。

将来的に都市域の拡大が予想される中、都市域がグローバル気候に及ぼすインパクトをより正確に把握するため、都市域でもフラックス観測網の整備が急がれる。都市版フラックスネットの第一歩として、熱収支とCO₂フラックスの年間収支を初めて示したことは意義があり、今後の都市気候研究に重要な資料を提供すると思われる。