

住宅街における冬季夜間の局所的冷氣沈降とス カラー濃度プロファイルの形成機構

WINTERTIME PROFILES OF TEMPERATURE, CO₂, AND WATER VAPOR AND LOCAL COLD-AIR SUBSIDENCE IN A RESIDENTIAL AREA

森脇 亮¹・神田 学²

Ryo MORIWAKI, and Manabu KANDA

¹正会員 博(工) 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)

In this study we focused on the relationships between the vertical profiles of scalar within and above a suburban canopy and the cold-air subsidence locally generated within the canopy. The results were derived from the wintertime field measurements of the vertical profiles of CO₂, air temperature, water vapor, and turbulent flows, which were conducted in a residential area (the mean height of canopy is 7.3 m) of Tokyo, Japan. Under stably stratified conditions, the CO₂ concentration above the canopy decreased with height, while that within the canopy kept almost same level. This indicates that the CO₂ emitted from the houses accumulated within the canopy. Such behavior was not found in H₂O profile. The vertical profile of air temperature and observations on the surface temperature using a thermal infrared camera suggested that the cold air generated at roof level moved down to the ground level. The effect of ‘cold air subsidence’ within the canopy is the most plausible reason for the nighttime vertical profiles of CO₂ and H₂O.

Key Words: Vertical profile, Carbon dioxide, Urban canopy layer, Urban roughness layer, Turbulent exchange, Cold-air pool.

1. はじめに

都市が大気環境に与える影響を考えるにあたり、都市一大気間におけるエネルギーおよびスカラーの拡散過程を把握することが重要である。風洞実験や数値モデルを用いた研究が多い中、現地での観測データに基づいた研究例は極めて少ないのが現状である。筆者らは東京大田区に位置する低層住宅街において気象観測用のタワーを用いてフラックス・乱流観測を行い、熱収支の季節変化や風速・乱流・気温の鉛直分布などを明らかにしてきた。今回さらにスカラーの拡散過程を調べる目的で、2004年11月から約2ヶ月間、CO₂・H₂O濃度の鉛直分布の計測を行った。この冬季に得られたデータ特性について大気安定度別に検討したところ、都市キャノピー内部で夜間の大気安定時にCO₂が高濃度化するという興味深い現象を発見した。また気温分布と都市表面温度分布の計測より、屋根面で冷却された空気塊がキャノピー内部に堆積することを示唆する結果が得られた。そこで本研究ではこれ

らの結果を中心に説明し、冬季における都市キャノピー内のスカラー挙動について報告する。

キャノピー内外のCO₂・H₂Oの鉛直分布に関する研究は自然生態系ではいくつか報告があるが¹⁾、都市における観測例は非常に少ない。最近になってVogt et al.²⁾がスイスのバーゼルで観測を行い、ストリートキャニオン内のCO₂プロファイルが自動車交通の影響を強く受けていることを報告している。しかしKanda³⁾はLESを用いて建物配列の幾何形状が乱流拡散に大きく影響することを指摘している。したがって、スカラーの発生源や幾何形状の異なる複数の都市キャノピーにおいて観測データを蓄積し比較していくことが必要である。

本研究ではCO₂だけでなく、H₂O・温位という複数のスカラー濃度分布を同時計測・比較することで、都市キャノピー内外におけるスカラー濃度の形成プロセスについて議論する。都市一大気間におけるスカラーの拡散プロセスの実態把握は、気象・水循環予測の向上に役立つばかりでなく、大気汚染物質の拡散という観点からも非常に重要である。

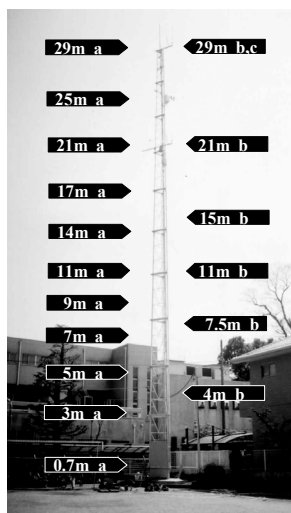


図-1 観測タワーと各物理量の計測高度
(図中の記号は表-1参照)

2. 観測概要

(1) 観測サイト

観測タワー（図-1）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。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。通常、都市域での気象観測データは、隣接する建物やローカルな人為排出源などの影響を強く受けてしまう傾向がある。そのため著者らは、本住宅街における一般的な微気象をほぼ代表するような観測データを得るため、観測場所の選定に細心の注意を払った。観測タワーは上記住宅街のほぼ中央付近の住宅の庭に位置しており、交通量の多い幹線道路からは離れた場所にある。また約5m離れた距離にある生活道路は普段から交通量がほとんどなく、夜間はほとんど人通りが無い。またタワーから最も近い家屋までの距離は約4mほどである。タワー近傍の地表は芝生・土壌・コンクリート・アスファルトなどが混在している。

(2) 計測手法

CO₂・H₂Oプロファイルを計測するため、分析計としてCO₂・H₂Oアナライザー（Li-cor社；LI-7000）を地上部に設置し、多点切り替えフローシステムにより上空11高度の濃度計測を行った。バックグラウンド濃度の時間変化の影響を最小限に抑えるため、Xu et al. (1999)⁴⁾を参考にして、計測サイクルを短くする工夫がされている。各高度の計測時間は10秒であり（切り替え直後の3秒間は平均に使用しない）、全高度のプロファイル計測に必要な時間は120秒である。精度よく計測を行うため、常にゼロガス（乾燥窒素：99.9999%）をRefセルに流し、またCO₂標準ガス（500ppm）を1時間毎にSampleセルに流してリアルタイムキャリブレーションを行った。

気温分布の計測には極細の熱電対線を用いた。放射による影響を最小限に抑えるため極細の熱電対素線を細密

表-1 計測項目と使用したセンサー（表中の記号は図-1に対応）

Symbol	Variable	Instrument
a	CO ₂ , q	LI-7000, LI-COR
	T_a	Unshielded fine gauge thermocouple (Omega, Type E, $\phi=0.05$ mm)
b	u, v, w, T_s	Sonic anemometer (Market, USA1; Kaijo, SAT550)
c	CO ₂ ', q'	LI-7500, LI-COR

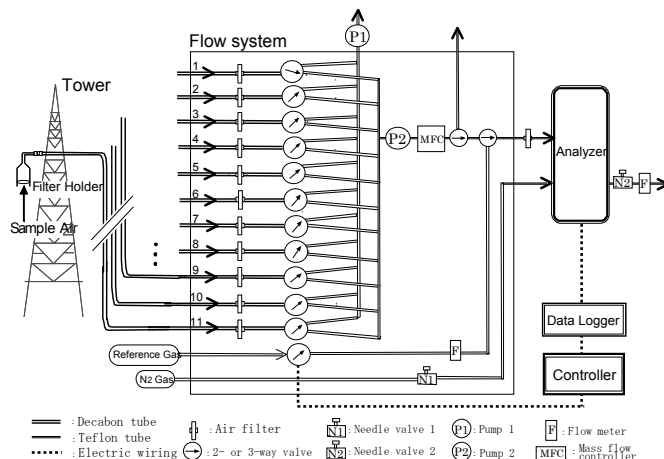


図-2 CO₂・H₂Oプロファイル計測のための多点切り替えフローシステムの概要図

溶接機にて温接点を溶接した。詳細に関しては、Kanda et al. (2005)⁵⁾および木本ら（2003）⁶⁾を参照されたい。

フラックス計測は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。また風速や乱流の計測は超音波風速計を用いて、都市キャノピー内外の6高度で行った。フラックスや乱流統計量の算出方法は森脇・神田（2005）⁷⁾に詳細が述べられている。

以上の観測期間は2004年10月26日から12月29日までの約2ヶ月間である。さらに2005年2月15日には補足観測としてサーモグラフィー（TH3102, NEC三栄）を用いて表面温度の計測を行った。

3. 結果と考察

(1) キャノピー内外のCO₂濃度の経時変化

図-3(a)～(e)に9日間（DOY336から344）のスカラー濃度、キャノピー内外の濃度差、熱収支、風向風速、CO₂フラックスなどを一例として示す。観測期間中は季節風の影響により風向は主に北または北北西である（図-3e）。また熱収支（図-3d）から明らかなように晴天日が多かった。本節では都市域では依然として知見が少ないCO₂濃度の経時変化（図-3a）の特徴を議論する。

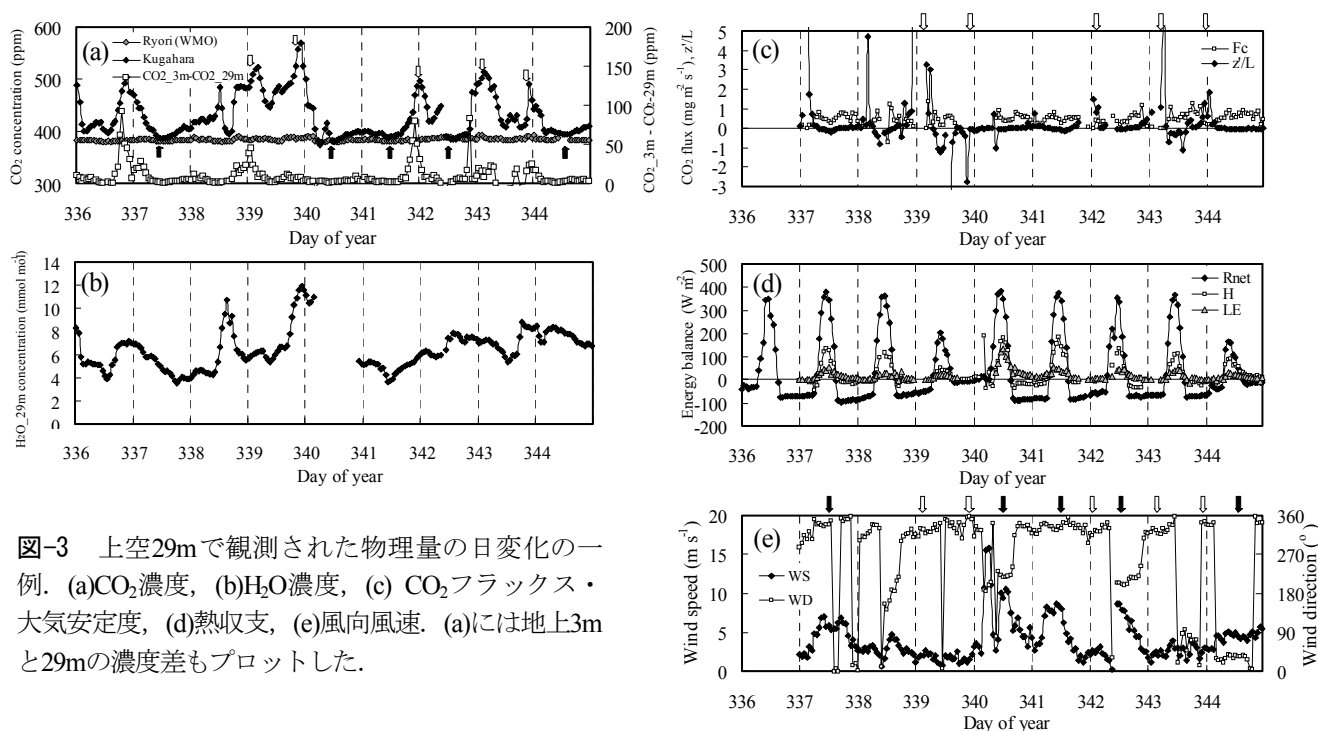


図-3 上空29mで観測された物理量の日変化の一例。(a)CO₂濃度、(b)H₂O濃度、(c) CO₂フラックス・大気安定度、(d)熱収支、(e)風向風速。(a)には地上3mと29mの濃度差もプロットした。

図aには比較のためバックグラウンド濃度としてWMOの温室効果ガス世界資料センター (WDCGG, WMO) の日本の観測点の一つである綾里のデータを用いている⁸⁾。綾里のデータは日較差が数ppm程度であることから、バックグラウンド濃度としてみなしてよいと考えられる⁹⁾。久が原のCO₂濃度はバックグラウンド濃度に比べて変動が非常に大きく、特に夜間の大気安定時に都市のCO₂濃度が上昇する傾向がある(図中の白矢印)。図-3cに示したようにCO₂フラックスが一日を通して常に正であることからわかるように、本住宅街はCO₂のソースになっているため、このことが夜間のCO₂濃度を上昇させる原因となっていると考えられる。一方で、本地域で得られたCO₂濃度が綾里のデータとほぼ同レベルになるイベントが見られる(図中の黒矢印)。風速と相関をとると明瞭な関係が抽出され(図略)、風速が大きいときには都市域のCO₂濃度がバックグラウンド濃度にほぼ等しくなる。これは強い乱流混合により、境界層上空のCO₂が地表レベルまで運ばれているためだと考えられる。H₂O濃度(図-3b)もCO₂濃度と同様、夜間の大気安定時に上昇する傾向がある。夜間の潜熱フラックス(図-3d)は数Wm⁻²とわずかであるにもかかわらず、このように夜間にH₂O濃度が上昇するのは夜間の境界層高度の低下が原因であると考えられる。残念ながら本研究では境界層高度のモニタリングを行っていないため、この影響については定量的に評価できていない。境界層高度の影響は当然のことながらCO₂濃度にも影響を与えていると考えられる。

次にキャノピー内外におけるCO₂濃度差に着目する。図-3aに示した上空29mと3mのCO₂濃度差($\Delta\text{CO}_2 = \text{CO}_2\text{-3m} - \text{CO}_2\text{-29m}$)を見ると、 ΔCO_2 の位相はCO₂-29mのそれとほぼ同じか1~3時間程度先行している。このことは、CO₂がキャノピー内でまず蓄積して、その後上空のCO₂

濃度が増加することを意味している。

そこで本稿の以降では、このキャノピー内外の濃度差がどのように形成されているかを検討する。キャノピー内外にわたる大気の大気安定度を示す指標としてバルクリチャードソン数(以下、 Rb)を採用し、本研究では、高度29mと3mの風速や気温などの計測値を用いて Rb を次式のように定義した。

$$Rb \equiv \frac{g z_{29m}}{T_{29m}} \times \frac{\theta_{29m} - \theta_{3m}}{U_{29m}^2}$$

ΔCO_2 や $\Delta\text{H}_2\text{O}$ には Rb に強い依存性があり(図-4)、大気が安定(Rb が正)になるとキャノピー内外の濃度差が増大する傾向がみられる。一方不安定なとき(Rb が負)は ΔCO_2 はほぼゼロになるが、 $\Delta\text{H}_2\text{O}$ は0.2から0.4 mmol mol⁻¹程度である。そこで、次節ではこのバルクリチャードソン数を用いて、大気安定度別に各物理量のプロファイルを調べ、その理由について検討する。

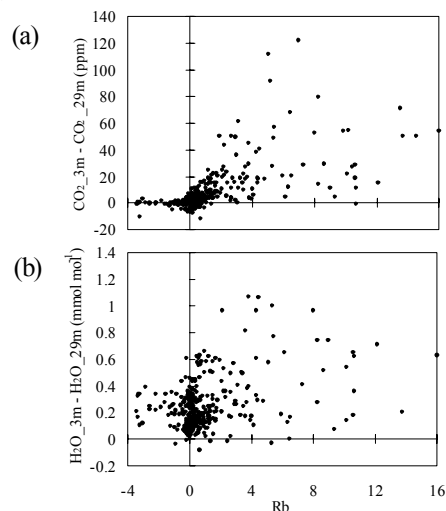


図-4 キャノピー内外の濃度差とバルクリチャードソン数の関係。(a) ΔCO_2 、(b) $\Delta\text{H}_2\text{O}$ 。

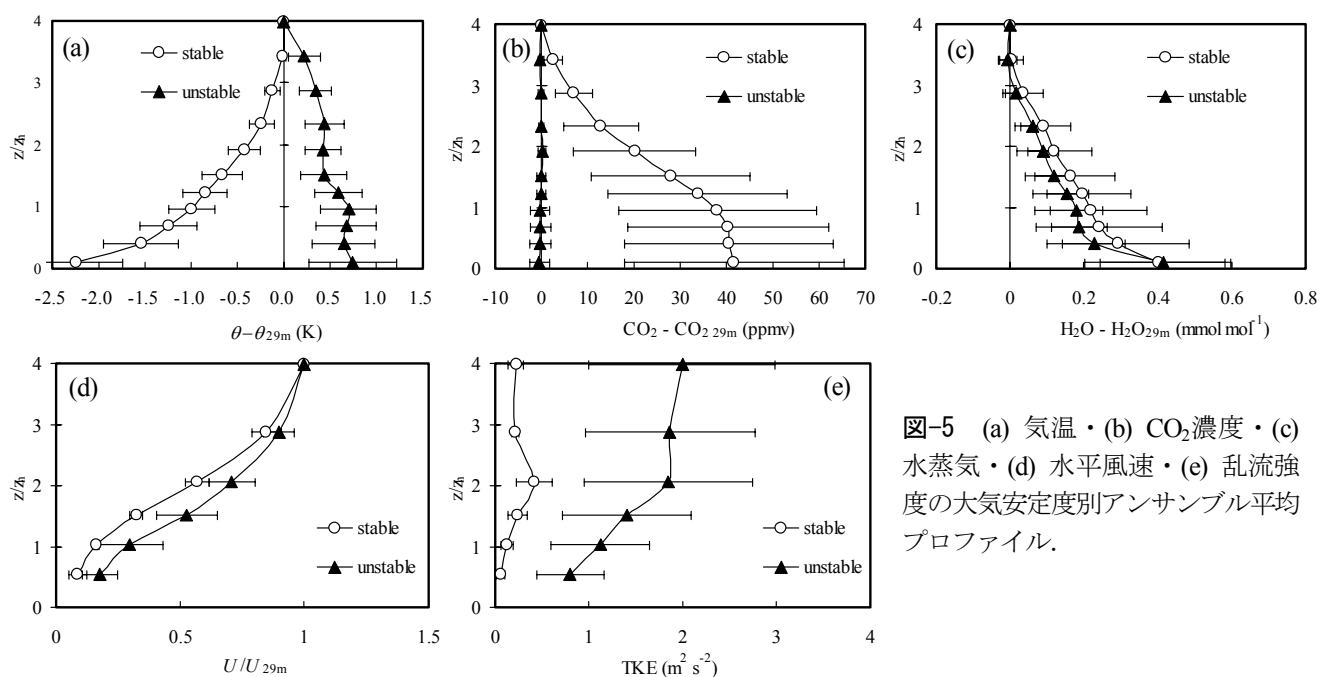


図-5 (a) 気温・(b) CO₂濃度・(c) 水蒸気・(d) 水平風速・(e) 乱流強度の気象安定度別アンサンブル平均プロファイル。

(2) 温位・CO₂・H₂O濃度の気象安定度別プロファイル

前節で述べたように Rb を気象安定度の指標として、冬季約2ヶ月間に得られたデータを気象安定度別にアンサンブル平均することにより、安定時 ($Rb > 5$)・不安定時 ($Rb < -1$) のプロファイル特性を調べた。アンサンブル平均に用いたデータセット数は「安定」が17, 「不安定」が26である。

図-5に気温・CO₂濃度・水蒸気の鉛直分布を気象安定度別に示した。風速・乱流強度もプロットした。バックグラウンド値の変化を無視して鉛直方向に生じる濃度差を見るために、乱流強度以外のプロファイルは高度29mにおける観測値からの差(風速の場合は比)で示した。なお図の縦軸は無次元化高度であり、本住宅街の平均的な建物高さ7.3mで規格化している。

a) 不安定時 まず不安定時について述べる。温位

(図-5a) は日中屋根面に温位のピークが現れ、これは Kanda et al.(2005)⁹⁾による本サイトでの最高気温出現時の温位プロファイルと似ている。冬季は太陽放射が主に屋根面のみを温めるためである。サーモグラフィを用いて補足的に行った表面温度の計測結果(図-6)からも、日中は屋根面が最も温度が高くなっている。CO₂は濃度差がつかずほぼ様な分布になっている(図-5b)。森脇・神田¹⁰⁾は本住宅街におけるCO₂発生源の内訳を詳細に調べ、家庭における燃料消費・交通量・人間の呼吸などを主な発生源としている。観測タワーは車が通る道路から離れた家屋の庭に立っているため、観測タワーのごく近傍に限って言えば、発生源は主に家庭の燃料消費と呼吸であり、これらは家屋の換気扇などから屋外に排出されていると考えられる。換気扇などから放出されたCO₂は、不安定時の大きい乱流拡散によって一様化する。一方、H₂Oはキャノピー底部近傍で最大値を持つ分布になっている(図-5c)。日中のH₂Oの放出源は主に土壌面であり、この土壌面はキャノピー底部の乱流拡散が小

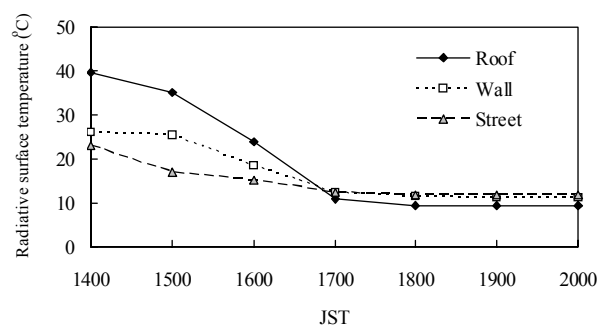


図-6 屋根面、壁面、キャノピー底面の表面温度。(2005/2/15)

さいところである。そのため放出されたH₂Oは上空に拡散されにくく底部近傍の濃度を上昇させていると考えられる。

b) 安定時 次に安定時について述べる。温位(図-5a) は地表付近で最低となる。通常夜間の都市キャノピーでは屋根面の天空率が最も大きいため、屋根面が最も放射冷却される。実際に表面温度計測結果(図-6)においても、夜間の屋根面の表面温度は他よりも低い。表面温度と異なる気温分布の観測事実、屋根面付近で冷却された空気がキャノピー内に重力沈降しキャノピー内に冷気湖を形成することを示している。CO₂濃度はキャノピー内で上空よりも40ppmも増加し、キャノピー内では高濃度CO₂がほぼ一様化している(図-5b)。主に換気扇などから排出される高濃度CO₂が夜間にキャノピー内で一様化するの、この排出源の位置と先ほど述べた冷気流の存在が挙げられる。すなわち建物内外の換気は換気扇などによってキャノピーの中上部で主に行われるため、屋根面付近から下降する空気塊は家庭から排出された高濃度CO₂を下方へ輸送しキャノピー内に滞留させる。一方、H₂O濃度のプロファイルを見ると(図-5c)、上空からキャノピー底部へと指数関数的に濃度が増加しており、CO₂とは全く異なる分布を示している。しかし、

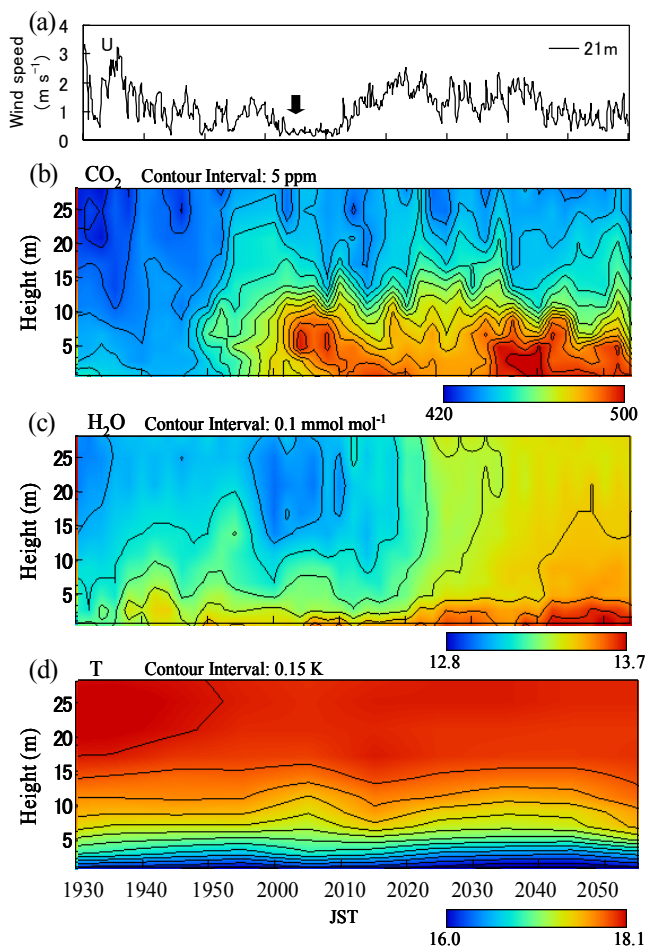


図-7 (a)上空21mにおける水平風速の時間変化と
(b) CO₂・(c) H₂O・(d) 気温の高度-時系列プロット。2004年11月15日19:30～21:00。

H₂Oのプロファイルも上述した冷気流によって説明できる。基本的に、H₂O濃度は上空ほど低く、また都市キャノピー内では土壌面を除いて蒸発源は存在しない。夜間の冷気流は上空の乾燥した空気をキャノピー内に運び、土壌面付近を除くキャノピー内のH₂O濃度を減少させると推察できる。これらの挙動について次節ではスカラー濃度プロファイルの短時間の動的変化を用いて更に詳しく述べる。

(3) 冷気沈降とCO₂・H₂O濃度プロファイルの動的変化

冷気沈降とスカラー濃度形成の関係は、短時間の高度-時系列コンターにおいてもその動的傾向が顕著に現れている。図-7は大気安定していた2004年11月15日19:30から21:00まで(90分間)の水平風速およびCO₂・H₂O・気温プロファイルの時間変化である。この図においてCO₂とH₂Oデータの時間解像度は2分であるのに対し、熱電対による気温データの時間解像度は10分であることに注意されたい。

20:00ころに上空の風速が弱まる(図-7aの黒矢印)と、ほぼ同時刻に屋根面付近で高濃度CO₂塊が検出され(図-7b)、それが20:20頃までキャノピー内を下方に移動し、その後キャノピー内に滞留し続けている。このと

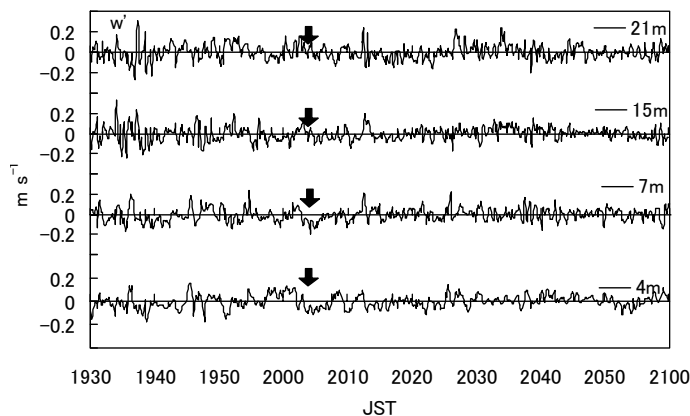


図-8 超音波風速温度計によるキャノピー内外の鉛直風速の時間変化

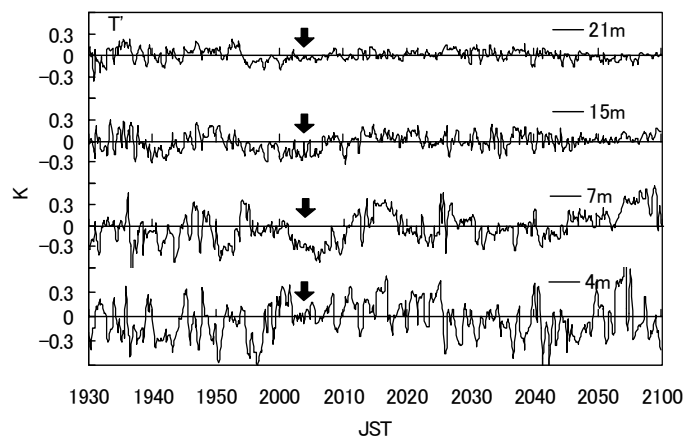


図-9 超音波風速温度計によるキャノピー内外の気温の時間変化

きの水蒸気の挙動をみると(図-7c)、20:00から20:20にかけて上空の乾燥した空気がキャノピー内に引き込まれている様子が認められる。さらに、キャノピー内外の複数の超音波風速計による鉛直風速データを調べたところ(図-8)、20:00すぎ、キャノピーより上空(地上15mおよび21m)の鉛直風速には顕著な変化は認められないが、キャノピー内の2高度(地上4mと7m)では明らかな下降流が認められる(図-8中の矢印)。つまりキャノピー内においてのみ下降流が生じている。以上の結果は、屋根面付近からキャノピー内へと向かう冷気の重力沈降と、それに伴うスカラー濃度の形成メカニズムを動的に捉えており、前節で述べた考察と矛盾しない。

またキャノピー内の超音波風速計で計測した気温データに対しても、同時間帯に冷気沈降による気温低下が期待される。確かに7mの風速計で検知した気温変動を見ると(図-9)、下降流モードのときに気温の偏差が負(低温)になっている。ただし高度4mでは気温低下が見られない。キャノピー底部ではバックグラウンドとして気温が低い状態であるため(図-7d)、冷気沈降が生じてもキャノピー底部では有意な温度変化がもたらされないためだと考えられる。

本研究では鉛直一次元の観測データに基づいて、冷気

沈降とスカラー濃度の形成機構を議論してきた。しかしながら冷氣沈降流は3次元的な構造を持っていると考えられ、この構造の全容を明らかにするには、計測機器を3次元的に配置するなどして、冷氣流を直接的に捉えるための計測システムの導入が必要である。

4. 結論

2004年11月から約2ヶ月間、気温・CO₂・H₂O濃度、乱流の鉛直分布の計測を行い、大気安定度別にこれらのアンサンブル平均プロファイル求めた。この結果、都市キャノピー内部で夜間の大気安定時にCO₂が高濃度化するという興味深い現象を発見した。またスカラーによって鉛直分布形状に差異が見られた。気温の鉛直分布と都市表面温度分布の計測より、屋根面で冷却された空気塊がキャノピー内部に堆積することを示唆する結果が得られた。またこの冷氣沈降とスカラー濃度の形成メカニズムは、短時間の高度-時系列コンターおよび複数高度の乱流時系列においてその動的挙動が確かめられた。

本観測が行われたのは住宅街であり、オフィス街や商業地域ではスカラーソースの位置や乱流強度などが異なるため、本研究のプロファイル結果はそのまま他の都市域には適用できないだろう。しかし屋根面で冷却された空気塊が沈降し、それが夜間安定時のスカラー挙動に影響を与えるという本研究の知見は、建物群で構成される都市キャノピーにおけるスカラー形成過程の本質的な特徴を指摘していると考えられる。今後、汚染物質の拡散予測を含む都市キャノピーモデルの検証データとして、本研究は重要な資料を提供すると思われる。

謝辞：本研究は文部省科学研究費補助金若手研究（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告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) Monteith, J.L. and Unsworth, M., 1990. Principles of Environmental Physics 2nd Ed., Edward Arnold, pp. 291.
- 2) Vogt, R., Christen, A., Rotach, M.W., Roth, M., Satyanarayana, A.N.V., 2005. Temporal dynamics of CO₂ fluxes and profiles over a Central European city. Theoretical and Applied Climatology, online first, DOI: 10.1007/s00704-005-0149-9.
- 3) Kanda, M., 2005. Large eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures. Boundary-Layer Meteorology (in press)
- 4) Xu, L.-K., Matista, A.A., Hsiao, T.C., 1999. A technique for measuring CO₂ and water vapor profiles within and above plant canopies over short periods. Agricultural and Forest Meteorology 94, 1-12.
- 5) Kanda, M., Moriwaki, R., Kimoto, Y., 2005. Temperature profiles within and above an urban canopy. Boundary-Layer Meteorology 115, 499-506.
- 6) 木本由花, 森脇亮, 神田学, 2004 : 長期観測に基づいた都市キャノピー内外における温位プロファイル特性, 土木学会水工学論文集, 48, 163-168.
- 7) 森脇 亮, 神田 学, 2005 : 住宅街における熱収支とCO₂フラックスの年間積算値, 土木学会水工学論文集, 49, 361-366.
- 8) Tsutsumi, Y., Yoshida, M., Iwano, S., Yamamoto, O., Kamada, M., Morishita, H., 2003. Atmospheric CO₂ monthly mean concentration, Ryori, WMO WDCGG. Japan Meteorological Agency, Tokyo, 21 May 2003.
- 9) Reid, K.H., Steyn, D.G., 1997. Diurnal variations of boundary-layer carbon dioxide in a coastal city—observations and comparison with model results. Atmospheric Environment, 31, 3101-3114.
- 10) 森脇 亮・神田 学, 2003 : 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, 477-490.

(2005. 9. 30受付)