

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

POTENTIAL TEMPERATURE PROFILES IN AND ABOVE AN URBAN
CANOPY BASED ON A LONG-TERM FIELD MEASUREMENT

木本由花¹・森脇 亮²・神田 学³

Yuka KIMOTO, Ryo MORIWAKI and Manabu KANDA

¹学生会員 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山二丁目12-1)

²正会員 東京工業大学助手 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

³正会員 工博 東京工業大学助教授 理工学研究科国際開発工学専攻 (同上)

To investigate the characteristics of potential temperature profiles, a field observation was continuously carried out at a residential site in Tokyo. Following results were obtained; 1) In winter the potential temperature has a maximum value around the roof top level, whereas in summer near the ground surface. The heat source moves up and down due to the seasonal and daily change of solar angle. This is a distinctive characteristic of the micrometeorology of the urban canopy contrast to vegetation canopy. 2) The maximum temperature at the roof top level implies that inversion layer is formed within the canopy. This is directly confirmed by the turbulent flux measurement.

Key Words : Vertical Profile, Potential Temperature, Urban, Field measurement, Heat source

1. はじめに

今現在, 都市における乱流特性を把握しようと, 現地観測研究が行われつつあるが, 裸地や植生地等に比べると依然として現地観測データが少ないのが現状である。それというのも, 内部境界層が発達するためには十分なフェッチを必要とするため, 広範囲に渡って均一な建物高さと配列が維持されている都市が必要であること, また観測場所を提供してくれる近隣の住民の協力等を必要とすることなど, 様々な制約条件が都市域における観測を困難なものにしているからである。

著者らは, 都市キャノピー内外において乱流計測のみならず, 気温分布および放射計測を含めた総合的な観測を長期にわたって行っている。熱収支やスカラーの乱流輸送特性 (森脇・神田 (2003)^{1), 2)}) などは既に報告されている。一方, 気温分布に関して言うと, 十分なデータベースが構築されていない。Nakamura and Oke (1988)³⁾ は夏季におけるある一日のストリートキャニオン内での気温分布等の計測結果を報告しているが, ストリートキャニオンの上空における気温分布は報告されていない。

また, 藤野ら (1997)⁴⁾・森脇ら (2003)⁵⁾ は都市キャノピー内外における気温分布に関する報告をしているが, これもまた夏季における数日間のデータを用いた議論となっている。局所的な影響を排除した, 質の高いデータを用いて気温分布の季節変化を議論するには, 均一な建物が立ち並ぶ都市において長期にわたって観測を行うことが必要である。そこで本報では, 長期観測により得られたデータを用いて, 未だに十分なデータベースが構築されているとは言い難い, 都市キャノピー内外における温位プロファイルの形成メカニズムに関する報告を行う。

2. 観測概要

2002年9月より東京都大田区久が原の低層住宅街に気象観測用タワーを設置し, 継続的な観測を行っている。観測タワー周辺は1km四方に渡り建物高さのほぼ均一な住宅地が広がっている。現地測量の結果, 平均建物高さは7.3m, 建蔽率は47%である。

観測に使用したタワーはトラス式構造の自立型タワーであり, その充填率は0.27である。タワー自体の影響を排

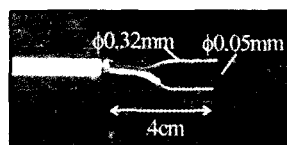


写真-1 熱電対図

表-1 各月のデータ数

月	DATA数	月	DATA数	月	DATA数
2002/9	1	2003/1	2	2003/5	1
2002/10	—	2003/2	2	2003/6	1
2002/11	3	2003/3	4	2003/7	—
2002/12	—	2003/4	3	2003/8	5

除するためタワー幅の1.5倍に延ばしたアームの先に、三次元超音波風速温度計を設置した。測定高度は29.0m・21.0m・15.0m・11.0mとした。更に、2003年8月に高度7.5・4m（都市キャノピー内）にも三次元超音波風速温度計を設置した。都市キャノピー上の4高度におけるサンプリング周波数は8 Hzであり、キャノピー内の2高度におけるサンプリング周波数は10 Hzである。データはデータロガーに一次収録した後、ノートPCに保存している。

測器はアームに固定されており主流風速方向に適宜方向を変えることが出来ないため、主流風速の算出はMcMillen (1988)⁶⁾の傾度補正方法を用いた。また、タワーによる乱れの影響が出ないように、データを風向によって選別した。顕熱フラックスは渦相関法を用いて算出した。

気温の測定のために、極細の裸熱電対 (Type E) を9高度 (25・21・17・14・11・9・7・5・3m) に設置した。データサンプリング周波数は1 Hzである。平均化時間は1時間である。日射と長波放射による測定誤差を小さくするためには、できるだけ径の細い素線を用い、温接点の両側の素線を長くすればよい (中村ら (1986)⁷⁾)。このことを考慮し、本観測では直径0.05mmの熱電対を使用し、温接点の両側の長さが0.025cm以上となるように熱電対を作成した (写真-1)。中村ら (1986) の結果によれば、本観測で使用する熱電対の測定値は気温に対して0.1℃以内の精度が見込まれる。気温計測も乱流計測と同様に、タワー自体の影響が出ないようタワーの柱から50cmの距離において熱電対を設置している。熱電対はシールド付き補償導線を用いて、データロガーに接続している。

本論文では、2002年9月から2003年8月までのデータのうち、晴天で東京における日照率が80%以上かつ日中における風向が安定しており、風速が2.5m s⁻¹以上の日のデータを用いて議論する。表-1に各月のデータ数を示す。2002年10月、11月は地形傾斜の影響が入る平均風向による風が吹いていたこと、熱電対の損傷高度数が多かったことにより、解析に使用し得る品質のデータが存在しない。また、2003年7月は雨天の日が比較的多かったため、解析に使用し得るデータが存在しない。

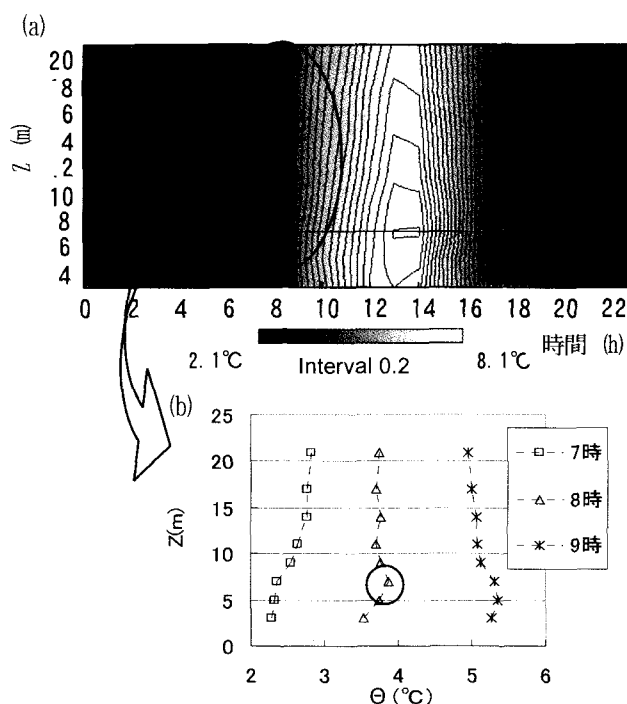


図-1 (a) 2003年1月における温位プロファイルの日変化パターン (温位コンター)
(b) 7~9時の温位プロファイル

3. 温位プロファイル測定結果

(1) 温位の日変化及び温位の日変化の季節による違い

図-1 (a) に2003年1月における温位プロファイルの日変化パターン (温位コンター) を示す。この温位コンターはアンサンブル平均像である。図中における横線は平均屋根面高さを示している。また、図-1 (b) は図-1 (a) における7~9時の温位プロファイルをプロットしたものである。

8時頃 (日の出から1.5時間程後)、屋根面付近で温位は極大となる (図-1 (b) 中の実線で囲ってある部分)。このことは森脇ら (2003)⁵⁾ の報告と一致している。また、図-1 (a) より日中においては屋根面付近で温位は最大となっている。本報においては長期観測データに基づき、時間帯別に温位プロファイルの季節変化の特徴を議論していくことにする。

a) 日最高温位をとる位置の季節による違い

図-2 は午後 (12時から16時まで) の温位コンターを冬至点に近い順に左から並べた図である。9, 11月に関しては、その日から冬至までの日数であり、1, 2, 3, 4月に関しては冬至からその日までの日数である。つまり、左側の図は冬至点に近い季節のデータを表し、右側の図は夏至点に近い季節のデータを表す。各コンターは各月 (各コンターの上に記述されている) におけるアンサンブル平均像である。紙面の都合上、全データのうち代表的な月のデ

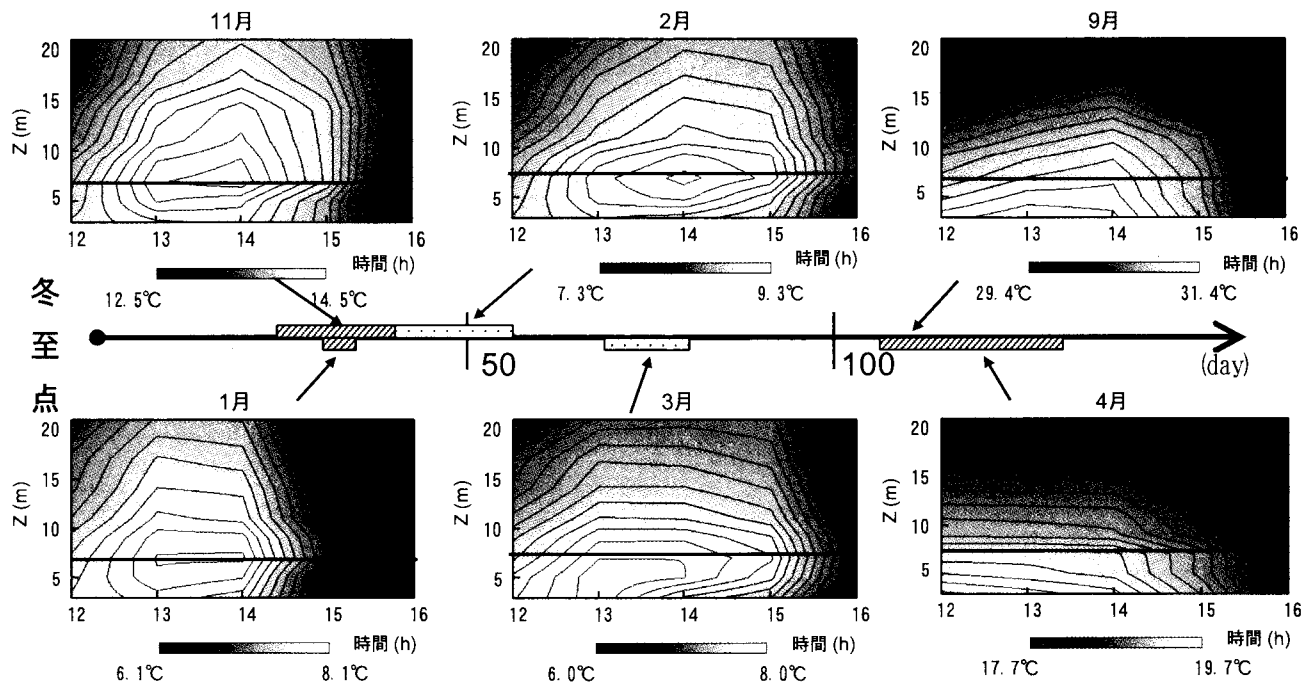


図-2 月平均温位コンター (2002年9月～2003年4月)

図の横軸は時間を表し、縦軸は高さを表している。図中の横線は平均屋根面高さである。

等温位線間隔は0.1°Cである。また、矢印は冬至点からどれくらい日数が離れているかを表している。

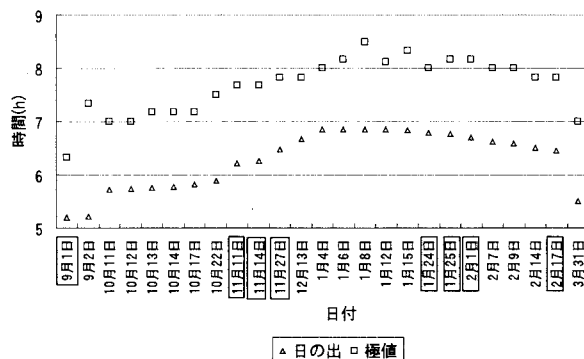


図-3 朝方屋根面における温位極大の出現時刻

一タのみを示した。図のコンターは各月におけるアンサンブル平均像である。軸上の網掛け部分は平均処理に含まれる日の範囲を示している。9月はデータ数が1つなので、網掛け部分が存在しない。この図からわかるように、冬至に近い時期においては、日中の日最高温位は屋根面付近に現われている。夏至に近づくにつれ日中における日最高温位のとの位置は地表面へと移っていく。このことは、冬至付近では太陽高度が低いために日射が屋根面でさえぎられ、キャニオン内の地表面はほぼ影になっているのに対して、夏至に近づき太陽高度が高くなると日射がキャニオン内の地表面まで十分に行き渡ることによるものと考えられる。つまり、熱のソースが冬至に近い季節には屋根面付近に、夏至に近い季節には地表面に現われる。3月においては、地表面は冬至に近い時期に比べてより暖められており、夏季と冬季の中間的な温位プロフ

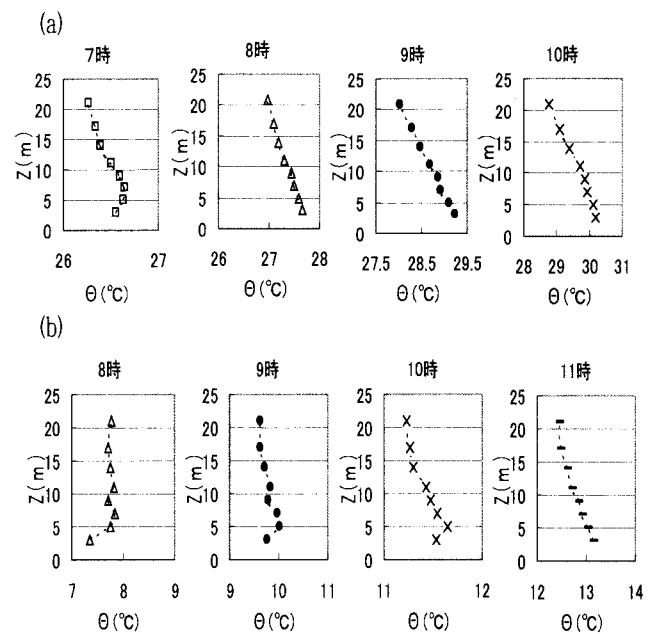


図-4 温位プロファイル (a) 2002年9月 (b) 2002年11月

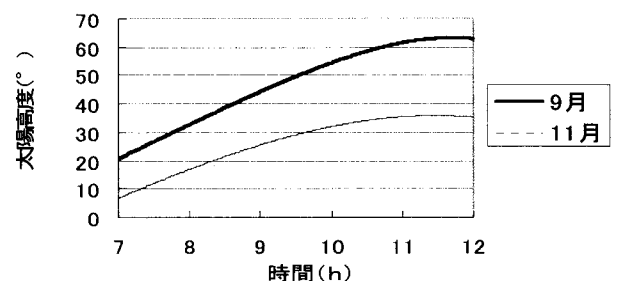


図-5 2002年9月 及び 2002年11月 における太陽高度

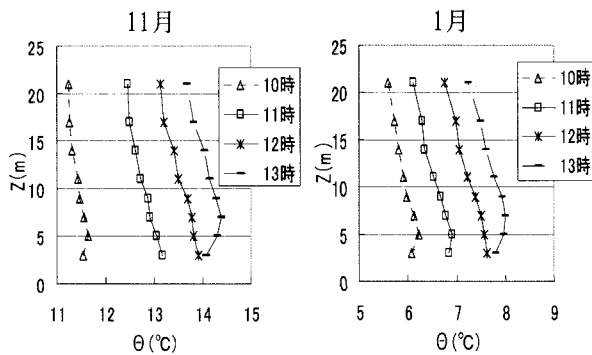


図-6 2002年11月及び2003年1月の正午付近における温位プロファイル

ファイルを示している。

b) 朝方の温位プロファイルとピーク発生時刻

(1) 節の冒頭部分において、朝方に屋根面付近で温位は極大値をとることを述べた。ここでは、その季節変化について述べる。

スペースの都合上、図は省略するが、朝方に屋根面付近で温位が極大値をとるという事実は、季節を通して言うことが出来る。

図-3 に朝方屋根面付近において温位が極大をとる時刻（日の出後屋根面付近の温位が他の高度の温位に比べて高くなる最初の時刻）を日付ごとにプロットした図を示す。実線で囲ってある日付は表-1 に含まれるデータ品質の高い日である。朝方に温位が屋根面で極大をとる時刻は、季節と共に変化する日の出時刻に対応して変化する。日の出から1.5時間程度経った時刻において、温位が屋根面付近で極大値をとるのは、日の出後直後は太陽高度が低いためにまず先に屋根面が暖められるためと考えられる。

c) 朝方から正午にかけての温位プロファイル

図-4 (a), (b) に2002年9月の7時から10時、2002年11月の8時から11時の各時刻における温位プロファイルを示す。日の出後に屋根面が暖まり、それから太陽高度が上がるにつれて地表面が暖められていくわけであるが、熱源が屋根面から地表面に移っていく過程は9月と11月では多少異なる。9月（図-4 (a)）においては屋根面で温位が極大をとった（7時）後に、地表面で温位が最も高くなる（8、9、10時）。そして、温位勾配 ($d\theta/dz$) は大気全体で負となり大気は不安定な状態となる。一方、11月（図-4 (b)）においては屋根面で温位が極大をとった（8時）後に、高さ5m付近で温位が極大をとり（9、10時）、その後地表面において温位が最も高くなる（11時）。このような違いの生じる要因の一つとして季節による太陽高度の違いが挙げられる。ここで、図-5 に太陽高度の時間変化を示す。図-5 から9月と11月では、南中時の太陽高度は倍近くも違っているのが読み取れる。11月は午前中比較的太陽高度が低いため、日射が地表面まで十分に届かず、地表面付近では建物による影が大部分を

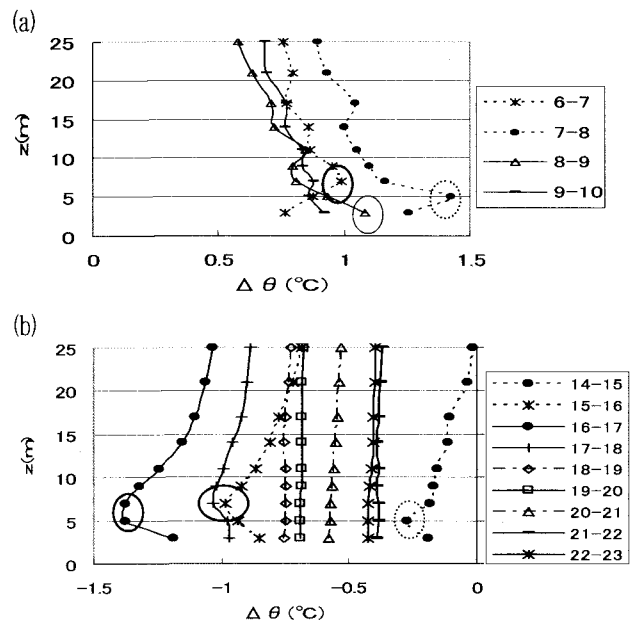


図-7 1時間前後の温位差 ($\Delta\theta = \theta_{t+1} - \theta_t$) のプロファイル (2003年3月)

(a) 朝方 (b) 午後から夜間

占めており、日射が屋根や建物壁面上部に差し込む状態が長きに渡って続いているのではないと思われる。その結果として、午前中において建物壁面上部で温位が極大をとる時間帯が継続する（図-4 (b)）。それに対し、9月においては太陽高度の上昇率が高いために、建物外壁のみが日射を受け持つ時間帯は相対的に短いと考えられる。このような時期においては、午前中に壁付近で温位が極大をとるような時間帯は1時間統計値のデータを見ている限り生じてこない。

d) 正午における温位プロファイル

図-6 に2002年11月と2003年1月の正午付近における温位プロファイルを示す。

図から、正午付近で地表面付近の温位が最も高くなる事がわかる。ここでは、スペースの都合上11月と1月のデータしか載せていないが、他の月（2, 3, 4, 9月）においても同じ傾向がみとれた。このことは日射量のピークと太陽高度が最も高くなる時刻が11時台に現われることと関係していると思われる。夏至に近い時期においては、地表面に温位のピークがくることは容易に想像つくが、冬至に近い時期においても正午付近で地表面の温位が屋根面の温位より高くなるのは、少し疑問に感じる場所である。なぜなら、冬至における太陽高度のピークはおおよそ32度くらいであり、本観測地のような密集している都市の住宅街においては、地表面が建物の作り出す影によってほとんど覆われてしまっていると考えられるからである。しかし、本観測サイトである久が原の住宅街は、ストリート方向が東西南北に伸びており、ほぼ基盤目状の空間となっていることから、たとえ太陽高度が低く街区の一区画が影に覆われていたとしても、南北に伸びる

ストリートが日射を受け持つために、正午付近において地表面の温位が高くなるような時間帯がわずかながら存在すると考えられる。実際、冬至付近においては、全高度において地表面の温位が高くなる時間帯は正午付近の1時間だけである。

e) 午後から夜間にかけての温位プロファイル

次に、午後から夜間にかけての温位プロファイルについて述べる。図-7 は、ある時刻の1時間後の時刻の温位からその時刻の温位を引いた温位差のプロファイルを示しており、ここでは2003年3月における値を代表して用いている。(a) は朝方の時間帯の図であり、(b) は午後から夜間における時間帯の図である。図-7 (b) から、日最高温位をとる時刻を過ぎる14~15時には、温位の下がり方は壁近傍（高さ5m）において最も大きくなり（図-7 (b) 中の点線囲み部分）、次ぐ時刻の15~16時には屋根面近傍で最も大きくなる（図-7 (b) 中の実線囲み部分）。このことは、先に述べた日の出後屋根面近傍が暖まり、次いで壁近傍が暖まるといったことの逆をたどっているということがわかる。実際、図-7 (a) から日の出後の温位の上がり方は屋根面付近で最も大きくなり（図-7 (a) 中の太線囲み部分）、次いで壁近傍で最も大きくなり（図-7 (a) 中の点線囲み部分）、更に次いで、地表面付近の温位差が最も大きくなる（図-7 (a) 中の細線囲み部分）。図-7 は3月の温位差のプロファイルということもあり、屋根・壁近傍・地表面へと温位差の極大が移っていく過程がよくわかるが、9月あたりにおいてはこれほど顕著ではなく屋根面に次いで地表面へと温位差が極大をとる高さが移っていく。図-7 (b) より日没後夜間になると、全高度において温位の下がり方はほぼ一様である。

以上述べてきた、都市における温位プロファイルの特徴から、都市においては熱のソースが屋根面から地表面へ、あるいは地表面から屋根面へというように動いていく。このことは、大きな時間スケール（季節変動：夏至に近い時期においては地表面付近において日最高温位となり、冬至に近い時期においては屋根面付近において日最高温位となる）でも、小さい時間スケール（日単位：日の出後、屋根面付近で温位は極大となり、正午付近になると、地表面付近の温位が最も高くなる）でも言うことが出来る。熱のソースが移動していくことは、都市キャンピの三次元構造と太陽高度によって形成される複雑な日向・日陰分布に起因していると考えられ、森林などの植生キャンピーとは大きく異なると考えられる。森林においては、抵抗体である葉はキャンピースケールに比べて非常に小さく、森林内は全体がポーラス状な空間となっている一方で、都市はほぼキャンピースケールと高さ方向に同じスケールの抵抗体である建物により構成されている。したがって、森林に比べて都市における場合の方がより三次元要素が強く、上で述べたような熱のソースが移動していくということは、都市での温位プロファ

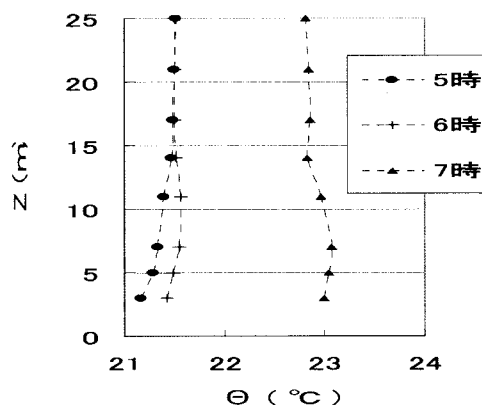


図-8 温位プロファイル (2003年9月6日)

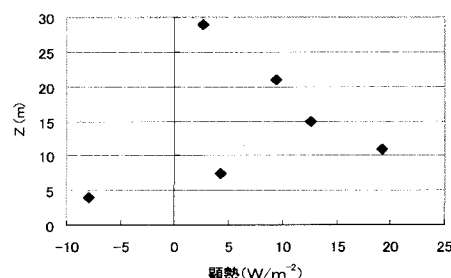


図-9 各高度における顕熱フラックス (6時)

イルの形成メカニズムの特徴の一つとして言うことができる。

(2) 都市キャンピー内外の顕熱フラックス

これまでは、熱電対によって測定されたデータを元に議論を行ってきたが、以降の節では都市キャンピー内外に設置された超音波風速計によって得られた乱流統計量を用いて、日の出後屋根面付近で温位が極大値をとることに関する更なる考察を行いたいと思う。

図-8 に2003年9月6日における朝方の温位プロファイルを示す。この図より、これまでも述べてきたように、日の出後1.5時間くらいたってから屋根面付近において、温位は極大値をとっていることがわかる（6時）。

図-9 に6時の時点での各高度における顕熱フラックスを示す。この図から、高さ11mから29mの範囲では高さが高くなるにつれて顕熱フラックスが小さくなっていくことがわかる。これは、この時間帯に気温が上昇するのに、熱エネルギーが空気中に貯留されるためであると考えられる。また、高さ7.5mにおける顕熱フラックスは、それよりも上空の顕熱フラックスよりも小さな値となっている。高さ7.5mは熱源である屋根面と同じレベルであり、このレベルでは鉛直方向の熱のフラックスがゼロに近い値になるためである。一方で、キャンピー内の高さ4mの顕熱フラックスは負である。このことは、明け方はまだ地表面が冷えていて、日の出後屋根面が暖められその付近における気温の方が高くなるので、負の顕熱フラックスが生じると考えられる。またこれに伴って、この時刻における

キャノピー内の大気安定度は正の値となる。

以上から、温位プロファイルから予測されること(明け方において、都市キャノピー内では逆転層が形成され局所的に大気は安定な状態となっているために、顕熱フラックスは負の値をとること)を乱流計測によって直接確かめることが出来た。

4. まとめ

東京都大田区久が原の住宅街で行っている長期観測をもとに、都市域における温位プロファイルの特性に関して以下のような結論を得た。

1) 温位プロファイルの日変化の季節による違いとして、冬至付近においては日中屋根面付近に温位の極大値が現われ、夏至付近においては地表面付近に温位の極大値が現われる。また、午前中における温位の変化として、冬至付近においては、日の出後屋根面付近で温位が極大値をとった後、続いてキャノピー内の壁近傍で温位が極大値をとる。温位プロファイルの日変化として、日の出から1.5時間経つと、屋根面付近で温位は極大となる。このことは季節を問わず言うことが出来る。更にどの時期においても、正午付近においては地表面における温位が他の高度における温位よりも高くなる時間帯が存在する。複雑な三次元構造を持つ都市は、太陽高度の変化により熱のソースが上下に移動するということが言える。これは透過性を有する植生キャノピーとは異なり、都市の温位プロファイルの特徴の一つと行うことが出来ると思われる。

2) 明け方において、地表面が冷たく日の出により屋根面付近が暖められている状態では、キャノピー内における顕熱フラックスの値は負となり、大気安定度は正の値をとる。また、熱源である屋根面における顕熱フラックスは

0に近い値であり、キャノピー上においては、顕熱フラックスは高度が上がるにつれ小さくなる。

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：12450197) および若手研究 (B) (課題番号：14750425)、科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業 (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頂いた。ここにあわせて感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 森脇亮、神田学、菅原広史：都市接地層における熱・水蒸気・CO₂の乱流輸送効率の相似性。水文・水資源学会誌 Vol. 16, pp. 491-500, 2003.
- 2) 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, Vol. 16, pp. 477-490, 2003.
- 3) Nakamura, Y. and Oke, T.R.: Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon, *Atmos. Environ.*, Vol.22, pp.2691-2700, 1988.
- 4) 藤野毅、浅枝隆、井下雅博、坪松学、桐原博人、田中博春：湖岸の都市熱環境の観測とキャノピー内外の熱境界層について。水工学論文集 Vol. 41, pp. 349-354, 1997.
- 5) 森脇亮、神田学、木本由花：都市接地層における乱流プロファイルの大気安定度依存性。水工学論文集 Vol. 47, pp. 1-6, 2003.
- 6) McMillen, R.T.: An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain., *Boundary-Layer Meteor.*, Vol.43, pp.231-245, 1988.
- 7) 中村泰人、平岡久司、西村浩一：市街地空間における気温分布性状に関する実験的研究。日本建築学会計画系論文報告集 Vol. 364, pp. 48-56, 1986

(2003.9.30受付)