

## 東京の市街化地域を通過する海風の熱収支

吉門 洋\*1・中島 虹\*2・川本 陽一\*3・大岡 龍三\*4

### 要旨

都市化の進んだ東京の夏季日中の大気構造把握を目的として、都心部で東京湾岸から9.5 kmの東京大学と、その北西12.3 kmの郊外域との境界部において低層用ラジオゾンデによる境界層観測を行った。その他2地点でも補助的な観測を行った。得られたデータから、連続する3日間の海風の発達経過を調べ、海風気塊の熱構造の変動を追った。熱構造がほぼ定常的な午後の時間帯に、対流混合層が成長する形で前記2地点間を進む海風の加熱率は $600 \text{ Wm}^{-2}$ 前後と算定された。この加熱の主要構成要素は地表からの顕熱フラックスと都市人工排熱と考えられ、これらの和が $600 \text{ Wm}^{-2}$ 程度となるためには、両者とも従来の観測事例や見積り量に比べ、かなり大きな値であることがうかがわれた。

### 1. はじめに

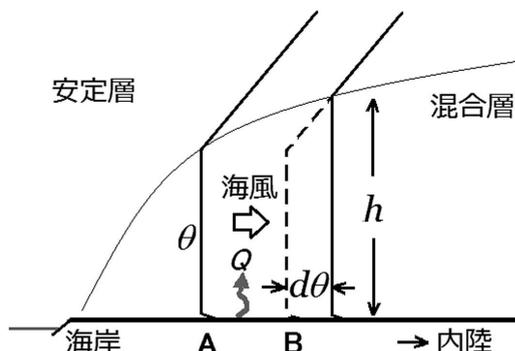
近年、夏季の高温は重大な問題となっている。特に人口が密集し、エネルギー消費も大きい大都市圏で合理的な高温緩和対策が求められている。東京などの臨海都市域から内陸側郊外にかけては、夏季好天日の日中は海風系が卓越する場合が多い。東京都心部のヒートアイランドとして観測される過剰熱は、海風によって郊外地域に運ばれる。この過剰熱の移流はどれほど郊外地域の高温化に寄与しているのだろうか。

陸上へ進入した海風の昇温の基本的なプロセスは、安定な大気境界層の下面が昇温して等温位の熱対流混合層が発達する場合のモデルで表せる。第1図で、A点から立ち上がる実線が等温位 $\theta$ の混合層を示し、それが一定時間後には下面からの加熱によって $d\theta$ だけ上昇するものとする。海風の場合は、その間にこの

気柱がB点へ移動し(破線が元の温位分布)、混合層高さ $h$ も増加する。この最も単純なモデルにより、 $d\theta$ と加熱率 $Q$ は次のように関係付けられる(例えばGamo 1985)。

$$Qdt = \rho C_p h d\theta \quad (1)$$

ここで $t$ は時間、 $\rho$ と $C_p$ はそれぞれ大気密度と定圧比熱である。混合層より上層の温位分布が時間的に変化しなければ、 $h$ は $\theta$ に応じて決まり、式(1)の右



第1図 対流混合層の発達に関する最も単純なモデルの概念。

\*1 (連絡責任著者) 一般財団法人日本気象協会。

h.yoshikado@aist.go.jp

\*2 首都大学東京大学院都市環境科学研究科。

\*3 九州大学大学院芸術工学研究院。

\*4 東京大学生産技術研究所。

—2013年12月25日受領—

—2014年4月21日受理—

辺の  $hd\theta$  は要するに第1図のAの温位プロファイルからBのそれまで変化した部分の面積に対応する。

左辺の  $Q$  は、現実には熱い地表面からの熱伝達(顕熱フラックス)に人工排熱などを加えたものとなる。夏季に好天が数日も続けば、一般に日中の地表面温度は気温より高く、 $Q$  は正值を維持すると考えてよく、海風の場合は内陸に進むにつれ  $\theta$  が増加し、暑くなる。

ただし大規模な水面や植生の多い公園、水田等を通過する際は  $Q$  が減少し、一時的に混合層の構造が崩れる可能性がある。地上のみで見ても、例えば都心内陸域の練馬とその北部郊外のさいたま(浦和)の日最高気温をアメダスデータと比較すると、練馬の方が高い場合が多かった。これには測定局近傍の土地利用条件が大きく影響していると考えられる。実際、練馬局は2012年末まで市街地内の狭い露場であったのに対し、さいたま局は荒川沿いの浄水場の草地であるという違いにとどまらず、練馬から浦和までの間では水面や植生が多少とも目立つようになる。前記の単純モデルのように海風の進行につれて単調昇温するのではなく、降温区間もあるということである。

このような海風の吹送過程の熱収支構造を把握するためには、地上だけでなく上層の境界層構造の観測が必要であり、特に、海風の風向方向に適当な距離において2地点以上でのデータ取得が望まれる。従来そのような詳細な観測の報告は、海外も含めてあまり見当たらない。国内の大規模な地域気象調査として、過去には南関東大気環境調査(気象庁 1977)、「広域大気汚染の動態」研究(浅井編 1983)などが実施され、複数地点で上層気象観測が行われた。しかし当時はまだ関東平野スケールで昼夜を通しての境界層構造の概略を把握することが目標とされ、その中で都市気象がどのように影響するかを解明できるような密度の観測配置ではなかった。Yoshikado (1990) は東京の湾岸寄りの神田と北西郊外の浦和および熊谷での同時上層観測により海風進入過程を解析したが、一定の気塊の熱構造を追跡するには観測の密度が不足していた。

2012年夏季に、東京都心部から北西方郊外にかけて、時空間的にかなり密な上層観測を行う機会を得た。得られたデータを、海風により都市部から郊外域へ吹送される気柱の熱構造に注目して解析した。

## 2. 観測

### 2.1 観測期間の概要

観測は2012年7月24日~27日の4日間、概ね09時から16時30分までの昼間のみ、一定時間ごとに実施した。

この年、東京では7月10日以降すでに最高気温がほぼ連日30°Cを超えていたが、20日~21日はオホーツク海高気圧が関東付近まで張り出して気温が低く、雨天となった。その後、24日にようやく日照が回復し、最高気温も30°Cを超えた。しかし、24日は関東平野内全般に弱風で、海風系が強く発達することはなかったため、以下の解析から除外する。

26日と27日は関東各地で猛暑日となり、また25日~27日は東京・埼玉で連続して光化学オキシダントが注意報レベルを超えたこの夏唯一の期間となった。その点で典型的な夏季の地域気候が形成されていたと言える。この3日間に観測された海風の熱的構造について解析する。

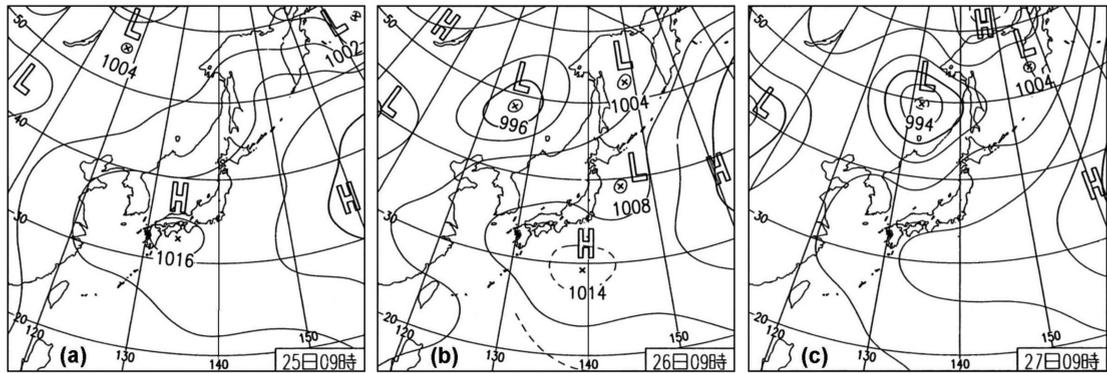
### 2.2 観測配置

観測地点の配置を第2図に示す。東京大学の観測サイトは湾岸(新木場付近とする)から9.5 km、戸田公園はその北西12.3 kmである。以下、東大・戸田と呼ぶ。

これら2地点では09時から16時30分まで1時間30分ごとにGPSゾンデ(明星電気JWA-01G)を飛ばさ



第2図 観測地点配置。



第3図 解析対象日09時の天気図。(a) 2012年7月25日, (b)同26日, (c)同27日 (「天気」より)。

せ、高度2000 mまでの気温、風向・風速を測定した。ゾンデの気温センサーはタングステン細線抵抗式で、 $0.1^{\circ}\text{C}$ の精度で検定されており、実質的にデータの誤差は $\pm 0.1\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内と考えている。なお、気温と合わせ湿度も観測したが、本報では使用しない。風向・風速算定の基礎となるゾンデ位置や高度はGPSシステムに依拠し、誤差は実用上無視できる。

北区役所と埼玉大学（以下、北区・埼玉大）では09時から16時まで1時間ごとにパイバル追跡により高度2000 mまでの風向・風速を観測した。測定間隔は北区では高度50 mごと、埼玉大では同100 mごととした。

ゾンデ、パイバルの放球場所は、戸田以外は建物（東大工学部11号館9階建、北区役所7階建、埼玉大学研究機構棟5階建）の屋上であったが、それぞれの周辺街区で突出した高さではない。以後の結果は屋上からの高さで表示し、そこに都市キャノピーの直接の影響は含まれない。戸田は開けた公園内の地上からの放球であった。また公園周辺に高層建物は少ない。

### 3. 観測結果の概略—海風の進入と上層温位

#### 3.1 午後に曇って内陸で海風が遅れた7月25日

25日は、関東から見て南西方に高気圧があり、地衡風向は北西で、海風に対向する気圧傾度であった（第3図a）。アメダスデータにより、対象地域周辺における海風域の拡大状況を照合した結果、本観測で明瞭な海風としての構造がとらえられた時刻は第1表のようであった。25日は海風の内陸進入が極めて遅いケースと言える。その原因は前述の気圧配置に加え、現地でもアメダスでも確認できた午後の日照低下の影響と考えられる。

観測された上層温位分布の変動経過を第4図に示

第1表 各地点上空における明瞭な<sup>1)</sup>海風進入観測時刻。

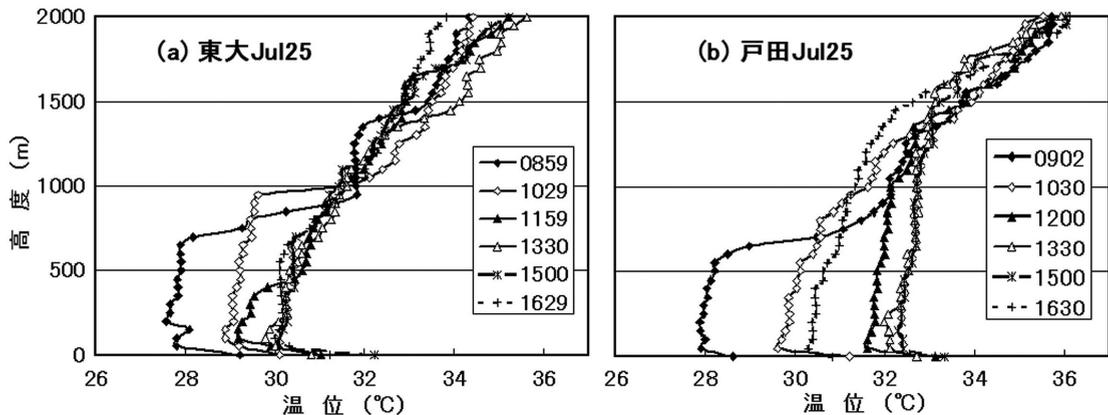
日	風向	地点			
		東大	北区	戸田	埼玉大
7月25日	S	10:30 <sup>2)</sup>	10:00	13:30	16:00
7月26日	先行E	12:00 <sup>2)</sup>	11:00	15:00	16:00
	SE	15:00	15:00	16:30	16:45
7月27日	SE	12:00	13:00	13:30 <sup>3)</sup>	13:00

- 1) 明瞭な海風とは、風速  $3\text{ ms}^{-1}$ 以上が継続することとする。
- 2) 観測間隔が広いため北区より遅くなっているが、実際は北区よりも早かったと考えられる。
- 3) 同様に、実際は埼玉大よりも早かったと考えられる。

す。東大では、12時の海風の強まりとともに冷氣移流により混合層構造が崩れ、その上限も不明瞭になる様子がとらえられている。その後、混合層構造は700 m付近まで回復するが、温位はもはや上昇しない。同様の状況は27日にも見られた（第7図参照。図は省いたが12時の方が冷氣移流が顕著）。その段階の状況については第4節で論じる。

#### 3.2 海風の前面に東風が入った7月26日

この日は午前の段階で西日本に南から高気圧が張り出し、関東では前日に続き海風に対向する気圧傾度であったが（第3図b）、午後には解消した。アメダスによれば、湾岸部の地上では09時にはすでに南寄りの海風が出現していたが、東大上空の風向は北から徐々に東へ回り、15時ようやく500 m以下で南東寄りとなり、最大風速も  $5\text{ ms}^{-1}$ を超えた（第1表）。12時頃に現れた東風は東京湾の外周を回るように千葉県北部から吹き込んでいたが、広域的に見れば海風と考えられる。



第4図 7月25日の (a) 東大と (b) 戸田の温位プロファイル。

東大ではこの東風進入に際しても、25日に関して前述したような高さ400 m程度の冷氣移流が見られた(図省略)。東大構内で観測点は北西側に偏っていて、南側は0.8 km、東側は上野公園を含め1.6 kmにわたり概して市街地とは異なるので、それがこれらの冷氣移流を形成したとはいえなまでも、海風の冷氣の維持に寄与しているであろう。

戸田では観測点の南側に幅0.6 kmの荒川河川敷が東西に延びていて、その影響と見られる最下層の温位降下が後出の第5図、第6図に見られる。土地利用変化に伴う加熱量の低減は、まずこのように低層温位に影響し、下流側で加熱量が回復すればやがて混合層全体の温位に平均化されると考えられる。

### 3.3 南西一般風下で早い海風となった7月27日

東方洋上に中心を持つ太平洋高気圧が東日本・西日本の南岸に沿って西方へ張り出し、関東地方では弱い南高北低の気圧配置となった(第3図c)。アメダスによれば、房総半島や東京湾岸は早朝から南西風域となっていた。観測対象領域では、09時には全般に弱風であったが、東大で10時30分に弱いながら上空1 km付近まで南東寄りの風向となり、12時には風速も $5 \text{ ms}^{-1}$ に達して、明瞭な海風と判断された。戸田でも厚い南南東風が13時30分に観測され、その時点では埼玉も明瞭な南風となっていた。3日間のうちでは最も早く着実な海風の内陸進入であり、前日より気温上昇が抑制される結果となった。

## 4. 海風の行程上の熱構造変化

### 4.1 観測による熱構造把握の考え方

序節に述べた単純モデルのように、海上から陸上に

吹き込む海風層の中に、海岸からの距離に応じて発達する対流混合層的な内部境界層を想定して、温位プロファイルの解析を行う。

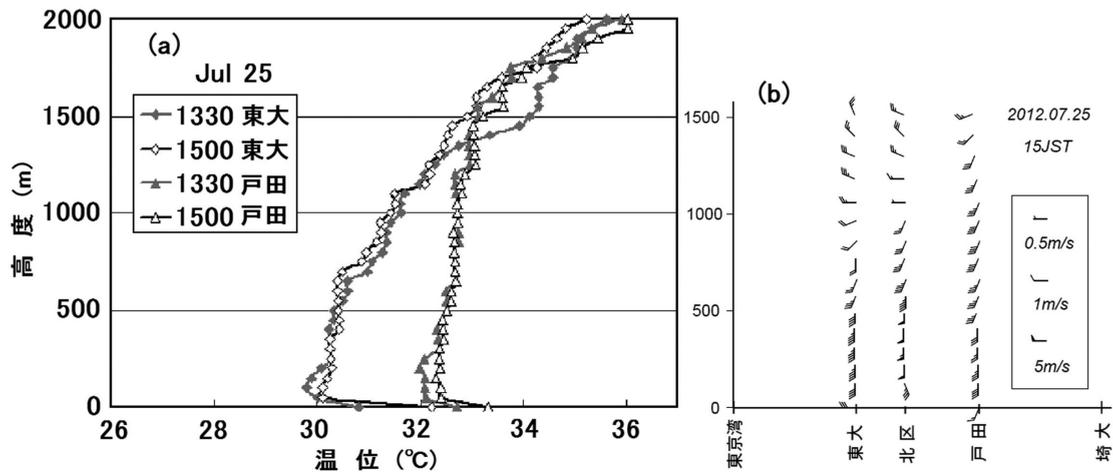
数 km 以上の海風進行距離を対象とすれば、式(1)の  $Q$ ,  $h$ ,  $\theta$  はいずれも、時間的にも空間的にも一定と見なすことはできない。ゾンデ観測を行った東大と戸田はほぼ南東-北西(真北から西へ38度)方向に12.3 km 離れている。両地点の観測結果を数値的に関係付けることができるのは、海風が南東風向で、適当な風速の場合に限られる。上層温位の観測間隔は1.5時間なので、一つの観測時に東大を通過した気塊を次の観測時に戸田でとらえるためには、風速が $2.3 \text{ ms}^{-1}$ 程度である必要がある。しかし、一様にまっすぐに吹く発達した海風の風速はもっと大きい。

ところが、この一連の観測では、戸田で1.5時間を隔てた二つの温位プロファイルがほとんど変化していない場合があった。それが定常状態であったとすると、その時間帯の始めに東大を通過した海風が戸田の定常プロファイルへ移行したことになり、東大と戸田のプロファイルの差を式(1)の右辺に適用すれば左辺の  $Q$  の平均値が得られる。また、定常状態が東大で観測された場合、その間に東大を通過した海風がその時間帯の終わりに戸田に移行したと見なして、同じように  $Q$  の平均値を見積もることができる。

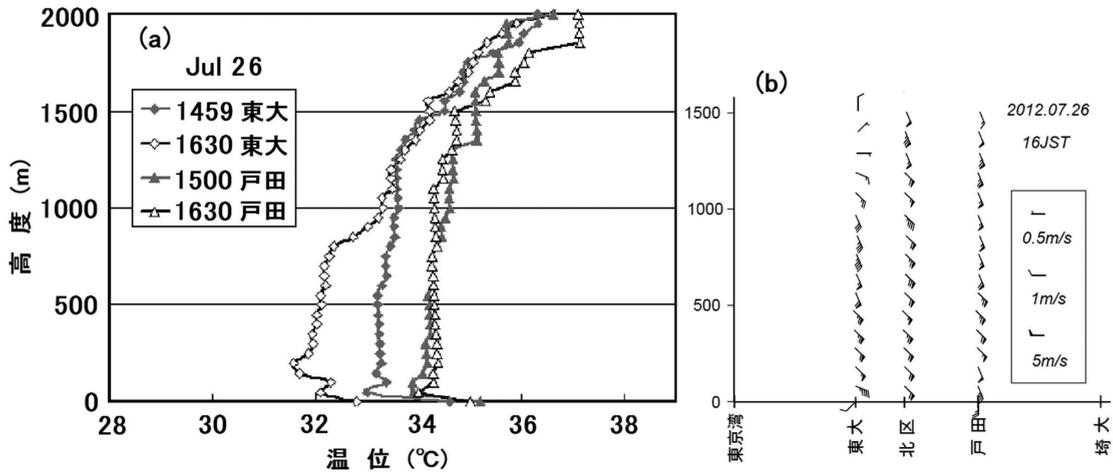
### 4.2 区間平均加熱率 $Q$ の見積り

#### a) 7月25日の例

25日は、東大から戸田まで一連の海風域に入ったのは13時30分の観測以降であり(第1表)、両地点の温位プロファイルの変動は既に第4図に示したが、13時30分とその後の状況を改めて第5図に抽出した。



第5図 (a) 25日13時30分と15時の定常的温位プロファイル, (b) 15時の上層風。



第6図 (a) 26日15時と16時30分の定常的温位プロファイル, (b) 16時30分(北区は16時)の上層風。

地点ごとに時間変化はほとんど無く、地点間の差(面積)に  $\rho C_p$  を掛けると両地点上空1350 m までの気柱の熱量差が  $2480 \text{ kJm}^{-2}$  と概算される。ただし、 $\rho = 1.1 \text{ kgm}^{-3}$ 、 $C_p = 1004 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  とした。式(1)によって区間平均の  $Q$  が得られるはずである。上空の代表風速として、第5図bの戸田の上空1350 m までの平均風速をとれば、 $3.4 \text{ ms}^{-1}$  となる。この風速では両地点間の距離12.3 km に約3600秒を要することとなり、 $Q = 690 \text{ Wm}^{-2}$  となる。

ところが、25日の海風の風向はほぼ南であり、実は両地点を通過する気塊を関係付けることができない。戸田を通過した気塊は、3600秒前には東大ではなく戸

田の南方12.3 km 地点(Xとする)にあったと考える方が理にかなう。X地点の温位プロファイルが東大上空と同じであれば上記の  $Q$  の計算は成り立つが、東大上空よりも高温であった可能性が大きい。東大を通過する気塊が東京湾からたどる経路よりも、X地点を通過する気塊がそれまでにたどる陸上行程の方がかなり長いと見込まれるからである。海風の陸上行程が東京の高温に影響することについては Yoshikado (2013) の分析がある。その結果、戸田上空との熱量差はもう少し小さく、 $Q$  ももう少し小さいと考えた方がよい。

b) 7月26日の例

東大では15時以降、戸田では16時30分までに明瞭な南東風の海風が入り（第1表）、風速はいずれも  $6 \text{ ms}^{-1}$  程度に達した。その間に東大では降温に転じたものの、戸田では東風から南東風への変化に関わらず温位プロファイルは定常傾向であった（第6図）。従って、15時の東大の温位プロファイルを持つ気塊が吹送され、戸田の15時以降のほぼ定常的な温位分布（以下の計算では16時30分のものを採用）になったものとする。南東-北西方向に当たる両地点間12.3 kmを南東風が  $5.2 \text{ ms}^{-1}$ （第6図bの戸田上空1500 mまでの平均風速）で通過したとすれば、吹送時間は2370秒となる。地上1500 mまでの両プロファイルの熱量差、つまり加熱量を概算すると  $1380 \text{ kJm}^{-2}$  であり、平均では  $Q=580 \text{ Wm}^{-2}$  となる。

ここで吹送時間を戸田の風速によって求めたが、東大上空の風速ではどうか。第6図bに見られるように、東大では戸田より混合層が低いだけでなく、それより上空では風向も風速も変わる。この点は25日の第5図でも、後出の第7図でも同じである。そして、混合層内のみでの平均風速は  $5.6 \text{ ms}^{-1}$  となり、戸田上空の  $5.2 \text{ ms}^{-1}$  より大きい。内陸への進行に伴い地表摩擦の影響で風速が低下し、また、それは混合層が厚さを増す要因の一つかと推測される。なお、前日の第5図の場合は、戸田上空の平均風速  $3.4 \text{ ms}^{-1}$  に対し、東大上空の混合層平均風速は  $4.1 \text{ ms}^{-1}$  であった。これらを考慮すれば、この区間の吹送時間はこれまでの算定よりもう少し短く、区間平均の  $Q$  はもう少し大きくなる可能性がある。

### c) 7月27日の例

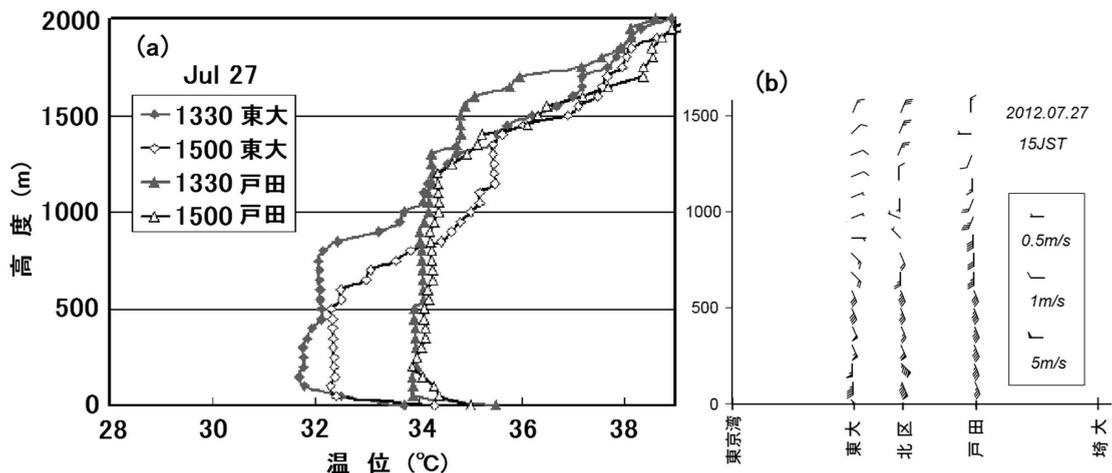
この日は前述のとおり13時30分には対象領域全体で明瞭な南南東の海風が観測されていた。東大では12時に既にそれが観測され、12時と13時30分の間では温位分布の変化は小さかったが、その後15時までに風速増加の影響か混合層高さは減少した（第7図）。しかし戸田では13時30分と15時の間で、温位上昇と混合層高さの減少がわずかな幅にとどまった。

この時間帯の代表風速として第7図bの戸田上空1050 mまでの平均風速をとって、両地点を結ぶ方向に投影すると  $3.7 \text{ ms}^{-1}$  となり（東大上空混合層内の平均は  $4.0 \text{ ms}^{-1}$ ）、通過時間はおよそ3300秒となる。13時30分の東大の気塊が吹送されて同時刻の戸田の状況まで変化したと想定し、地上1050 mまでの気柱の熱量変化を概算すると  $2040 \text{ kJm}^{-2}$  となり、従って  $Q=620 \text{ Wm}^{-2}$  となる。前日の例よりも夕刻に遠く、日照も大きかったことを反映し、少し大きな値になった。

## 5. 結果のまとめと考察

東京周辺で、夏季の天候を代表するような期間であった2012年7月25～27日の3日間の海風進入状況を上層観測でとらえ、都心の一角で湾岸から9.5 kmの東大とさらに12.3 km北西郊外の戸田で観測した熱構造を中心に解析した。気圧配置の細部が徐々に変化したのに対応して、3日間の海風の進入経過はそれぞれ異なった。

東大と戸田の間で海風の気塊を追跡できる状況をとらえ、その区間の平均加熱率  $Q$  を算定すると、13時



第7図 (a) 27日13時30分と15時の定常的温位プロファイル, (b) 15時の上層風。

30分～15時 (27日), 15時～16時30分 (26日) のような時間帯で $600 \text{ Wm}^{-2}$ 前後の値となった。混合層が上層の安定層を浸食して発達する場合には、安定層からの熱取り込み量を含めて考える必要があるが、第6図や第7図を見る限り、その効果は重要とは思われない。

$Q$ の構成要素である地表付近の上向き顕熱フラックスは、埼大の建物屋上(表面上1.5 m)での渦相関法による測定で、最大 $250 \text{ Wm}^{-2}$ 程度であった。東京都心部ビル屋上面での熱収支測定例(吉門ほか 2002)でも $250 \text{ Wm}^{-2}$ 前後である。アスファルト路面上などではビル表面よりも大きくなると考えられ、実験で $400 \text{ Wm}^{-2}$ 程度という測定例がある(成田・関根 1991)。けれども、本解析の対象区間は概ね市街地であるとはいえ、都心部のように広い街路と巨大ビルで占められてはいないことから、区間平均顕熱フラックスは $400 \text{ Wm}^{-2}$ よりはかなり小さいと推測される。

$Q$ のもう一つの主要構成要素である人工排熱は、東京では詳細な算定例があり(例えば環境省 2004)、対象区間は概して夏季の日平均で $100 \text{ Wm}^{-2}$ 程度に満たないエリアとなっている。日最大値が日平均値の2倍程度だと仮定し、顕熱フラックスと合算しても、本解析による $Q$ の算定値 $600 \text{ Wm}^{-2}$ を説明するには不十分である。対象区間の平均顕熱フラックスと人工排熱のいずれか、または両者が予想外に大きい可能性がある。

4.2節b)の後半で、区間平均風速の見積りがもう少し大きく、そして $Q$ の算定値が少し大きくなる可能性もあることを述べた。最後に、2.2節に述べた温度の測定誤差の影響も大まかに見ておく。 $Q$ の算定の元となる東大-戸田の混合層温位差が $2^\circ\text{C}$ 程度であったので(第5～7図)、温度測定誤差を最大 $0.2^\circ\text{C}$ とすれば、それにより $Q$ の算定値が10%程度の誤差

を含む可能性もある。しかし、上にまとめた結果が覆るほどの大きさではない。

### 謝 辞

本研究は科学研究費、基盤研究(A)22246074と若手研究(A)22686053により実施した。ゾンデ観測は日本気象協会、パイバル観測は上記基盤研究支援者であった高橋宏明氏と埼玉大学学生諸君の協力により実施できた。ここに謝意を表します。

### 参 考 文 献

- 浅井富雄(編), 1983: 広域大気汚染の動態, 文部省「環境科学」研究報告 B163-R11-4, 354pp.
- Gamo, M., 1985: Seasonal change of the mixed layer structure at Tsukuba. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 60-74.
- 環境省, 2004: 平成15年度都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書. <https://www.env.go.jp/air/report/h16-05/index.html> (2014. 4. 21. 閲覧)
- 気象庁, 1977: 南関東大気環境調査報告書 (I). 241pp., (II). 239pp.
- 成田健一, 関根 毅, 1991: アスファルト舗装面の表面温度と熱収支の解析—試験地表面による土壌面との長期比較観測—. *地理学評論*, **64A**, 125-137.
- Yoshikado, H., 1990: Vertical structure of the sea breeze penetrating through a large urban complex. *J. Appl. Meteor.*, **29**, 878-891.
- Yoshikado, H., 2013: Intense summer heat in Tokyo and its suburban areas related with variation in the synoptic-scale pressure field: A statistical analysis. *J. Appl. Meteor. Clim.*, **52**, 2065-2074.
- 吉門 洋, 近藤裕昭, 亀卦川幸浩, 2002: 東京都心ビル屋上の気象観測に基づく熱環境の評価. *天気*, **49**, 887-899.

---

## Heat Budget of Sea Breezes Passing through Urbanized Areas of Tokyo

Hiroshi YOSHIKADO\*<sup>1</sup>, Ko NAKAJIMA\*<sup>2</sup>,  
Yoichi KAWAMOTO\*<sup>3</sup> and Ryozo OOKA\*<sup>4</sup>

\*<sup>1</sup> (*Corresponding author*) *Japan Weather Association, Sunshine60, 3-3-1, Higashi-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 170-6055, Japan.*

*E-mail : h.yoshikado@aist.go.jp*

\*<sup>2</sup> *Graduate School of Urban Environmental Science, Tokyo Metropolitan University.*

\*<sup>3</sup> *Graduate school of Design, Kyushu University.*

\*<sup>4</sup> *Institute of Industrial Science, the University of Tokyo.*

(Received 25 December 2013; Accepted 21 April 2014)

---