

東京の晴天時における熱・水蒸気の動態解析

Heat and Moisture Transfer in Tokyo under Fine Weather

河原 能久*

池田 典之**

柏木 研一郎***

Yoshihisa KAWAHARA Noriyuki IKEDA Kenichiro KASHIWAGI

ABSTRACT: We discussed the heat and moisture transfer in Tokyo area under fine weather conditions with emphasis on spatial and temporal variation in humidity. First, we processed hourly meteorological data at several stations in the central part of Tokyo in mid-winter and mid-summer. It was found that in winter sea breezes may bring humid air into urbanized area to increase the absolute humidity while in summer the evolution of boundary layer is more influential over the humidity level than sea breeze intrusion. Then we applied our urban climate model that considers the moisture release from cars and human bodies to Tokyo area under idealized summer weather condition. It was indicated that the moisture release accompanied by the above human activities contributes little to the humidity level and that the vapor supply from land use and advection such as sea breezes are more important processes in the humidity distribution.

KEYWORDS: Urban Climate, Heat and Moisture Transfer, Humidity, Anthropogenic Vapor, Sea Breeze

1. はじめに

都市化の進展に伴って、都市域ではヒートアイランド、大気汚染、乾燥化、固有の風系の発生など、その都市特有の気候が形成されるようになる。最近、このような都市気候に関して多くの研究が数多く行われてきており、都市域の気温分布やその形成機構に関して理解が深められつつある。しかし、都市域の湿度に関する研究例は少なく、湿度分布や水蒸気輸送には不明なことが多いと考えられる。例えば、1970年代後半以降の東京では、気温は依然として上昇傾向を示しているものの、湿度の低下傾向は停止しているが、その原因は明らかにされていない。また、乾燥化は昇温化以上に広範囲にわたって発生することが予想されるが、その実態はよく理解されていない。小元らは大都市にみられる相対湿度の変化に様々な人間活動による水蒸気排出量の寄与を指摘している¹⁾が、その具体的な内容については明らかにしていない。また、経田らは都市気候モデルにより都市化による湿度変化のメカニズムを検討し、都市気温の上昇による夜間の蒸発や移流などが夜間に湿度の上昇をもたらすこと、夜間の湿度上昇が日中の湿度低下を補償するために日平均の絶対湿度は都市化の影響を受けにくいことを報告している²⁾。

本研究では、東京における水蒸気の動態の把握とその空間的・時間的な変化特性の原因を理解することを目的としている。そこでまず、東京都による観測データを基に時間スケールからみた夏期と冬期における水蒸気量の変化を検討し、その変動の原因として、海風、接地境界層の発達、自動車や人間からの水蒸気排出量の影響を考察した。次に、水蒸気の輸送過程を定量的に理解するための手法として、地形、土地利用、人

* 東京大学工学系研究科社会基盤工学専攻 Department of Civil Engineering, University of Tokyo

** 電源開発(株) Electric Power Development Co., Ltd.

*** 東京大学大学院 Graduate School, University of Tokyo

工排熱，人工的な水蒸気排出などの効果を考慮した都市気候解析モデルを構築した．そして，そのモデルを用いて東京圏の夏期の晴天時における風系，熱および水蒸気輸送を解析した．

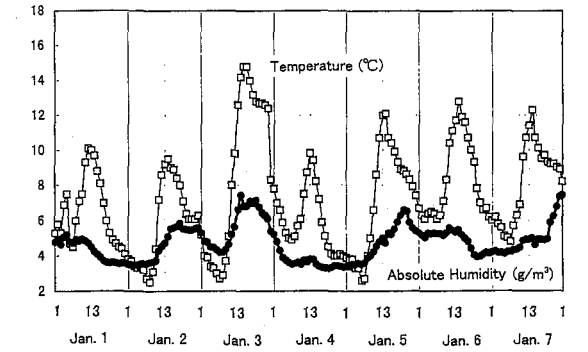
2. 観測気象データの分析

2. 1 冬季の時間変動

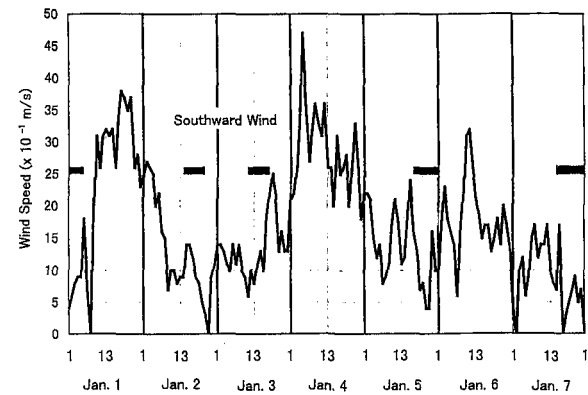
東京都大気汚染常時測定局の測定結果を用い，より短い時間スケールでの湿度変化を検討した．図－1に1996年1月1日から1月7日の好天期における千代田区丸の内局での気温と絶対湿度を示す．この期間は正月休みを含み，人間の活動の影響が推測することができる．この図より，人間活動の影響が絶対湿度に大きな影響を及ぼしているとは考えにくい．また，1月2，3日の午後では気温と湿度が同様に変動しているが，1月4，6，7日では両者には関係が認められない．図－2に風速と風向のデータを示す．なお，風向については南，東南，西南からの風に対して横棒で示している．図－1，2より，乾燥した冬の季節風が強く吹く日には絶対湿度が低く，季節風が弱い日には昼過ぎから海風と思われる風が東京に吹き込み，それに伴って絶対湿度が増加することが確認できる．ここには図示しないが，同じ時期の八王子市片倉局での結果では相模湾方面からの風が吹く場合にはわずかに絶対湿度が増加していることが認められる．

2. 2 夏季の時間変動

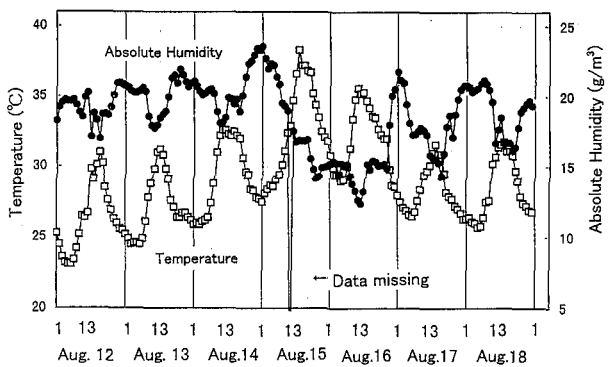
1996年8月12日から8月18日にかけての千代田区丸の内局での気温と絶対湿度とを图－3に示す．これはお盆休みを含む期間のデータである．図－1と同様に，人間活動の湿度に及ぼす影響は明瞭ではない．むしろ，気温と絶対湿度との間には負の高い相関がある．これは日中の接地境界層の発達に伴って地表面付近の高い絶対湿度が上空へ広がり，湿度レベルが低下することで説明できると考えられる．なお，この期間では湿度と風向との間には明瞭な関係は認められなかった．冬季でも接地境界層の発達は影響を及ぼすはずであるが，絶対湿度のレベルが低く，南よりの風が持ち込む湿度の影響が顕著に現れたものと考えられる．それに対して夏季では，絶対湿度のレベルが高く，南よりの風の影響が隠れてしまっているものと推測される．地表面からの蒸発，植生からの蒸散ともに昼間に活発であるが，それ以上に気温の上昇・



図－1 丸の内局での気温と絶対湿度



図－2 丸の内局での風速と南よりの風



図－3 丸の内局での気温と絶対湿度

以上より、地表面付近での湿度の時間的な変動を見た場合、地表面・植生からの供給、接地境界層の発達状況、海風がその地点での湿度のレベルに強い影響を及ぼすが、それらの相対的な重要性は季節的に変化することが知られる。

都市域における熱・水蒸気の輸送機構を定量的に検討したり、土地利用の改変の影響を評価するためには数値モデルによる解析が不可欠である。本研究は以前の我々のモデル³⁾を改良したものであり現在なお改良中であるが、その概要と得られた結果をここに報告する。

数値解析モデルは、エクマン層に対する渦粘性／拡散乱流モデルを用いた輸送方程式モデル、相似理論に基づく接地層モデルおよび地表面での熱収支モデル（都市、植物キャノピーのモデルを含む）からなる。エクマン層での未知量は風速、気圧、温位、比湿であり、乱流モデルとしては成層効果を考慮した $k-\epsilon$ モデル⁴⁾を使用した。また、基礎方程式は複雑な地形の起伏に沿った σ 座標系で表現されている。一方、地表面では人工排熱や人工排水蒸気を考慮している。

首都圏を含めた水平方向 400km×400km, 高さ 3,700m の範囲であり, 図-4 に示す.

国土数値情報を加工して8種類の土地利用区分(裸地、水面、道路、草地、水田、森林、低層住宅、事務所)とした。また、メッシュ内では土地利用が混在しているが、エクマン層下部の境界条件となる運動量、温位、比湿のフラックスは各土地利用からのフラックスの面積比率を重みとした平均値として与えた⁵⁾。

標高データには、国土数値情報の自然地形メッシュデータ（昭和 56 年）の平均標高を平滑化したものを用いた。また、土地利用データとしては、国土数値情報の土地利用メッシュデータ（昭和 62 年）、昼夜間人口分布データには総務庁統計局発行の「平成 2 年国勢調査、平成 3 年事業所統計調査等のリンクによる地域メッシュ統計地図デジタルメッシュマップ」を使用させていただいた。さらに、人工排熱量の推定に関しては一ノ瀬⁶⁾のデータを使用した。

関東平野の範囲

輪島	輪島	長岡	新潟	福井	福井
5637	5638	5639	5640	5641	
28	29	30	31		
七戸	高田	日光	河内	河内	
5537	5538	5539	5540	5541	
23	24	25	26	27	
金沢	高山	長野	宇都宮	戸	
5437	5438	5439	5440		
19	20	21	22		
岐阜	岐阜	岐阜	岐阜	岐阜	
5337	5338	5339	5340		
15	16	17	18		
名古屋	静岡	静岡	静岡	静岡	
5237	5238	5239	5240		
11	12	13	14		
伊勢	伊勢	伊勢	伊勢	伊勢	
5137	5138	5139	5140		
8	9	10			
木本		御殿	御殿		
		7			

-471-

ここでは、人工的な水蒸気排出源として自動車の化石燃料の燃焼と人間からの排出を対象とし、ビルからの冷房や湯沸かしなどからの水蒸気排出量は考慮していない。図-5に12時における与えた水蒸気排出量の分布を示す。

1) 化石燃料の燃焼からの水蒸気量

市販ガソリンの組成をオクタン C_8H_{18} で代表させ、それが完全燃焼すると仮定して、一ノ瀬⁶⁾による自動車からの排熱量の推定値から水蒸気排出量の時間的、空間的变化を推定した。

2) 人体からの排出⁷⁾

体熱平衡を維持するために蒸発性熱放散がある。蒸発性熱放散は発汗と不感蒸泄（皮膚からの蒸散＋呼吸によるもの）からなり、これによって潜熱と同時に水蒸気が排出される。ここでは成人1人当たりの水蒸気排出量を不感蒸泄＋発汗＝900+2,000 (ml/day) と設定して発汗量を正弦波的に与えた。

表-1 初期条件

計算開始時刻	TSTART = 5:00 時
風速	$U = V = W^* = 0$ [m/s]
温位 地表面	TIN = 18℃
鉛直方向勾配	GAMD = +0.006 [K/m]
比湿 地表面	QIN = 0.0067
鉛直方向	GAMQ = -1.4E-6 [1/m]
物理平面での領域上限	HMAX = 3682[m]
計算平面での領域上限	ZEND = 2132[m]

3. 2 計算条件と計算手法

計算領域に100×100×14の格子点を用意した。計算は夏期の無風状態を初期条件とし、48時間だけ計算を進めた。初期条件は表-1のようである。また、人工的な水蒸気排出量をゼロにした場合の計算をも行った。基礎方程式は有限体積法で離散化され、静水圧分布の仮定を使用せず、SIMPLE アルゴリズムと完全陰解法を用いて収束解を算出した。計算にはワークステーションとスーパーコンピュータを使用した。

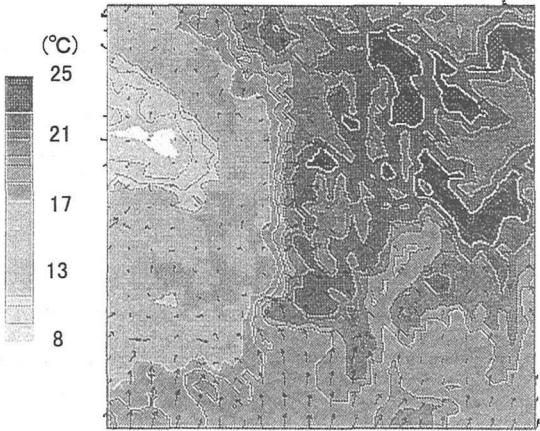


図-6 14時における気温分布と風速分布

4. 解析結果と考察

まず、人工的な水蒸気排出量の有無が計算結果に

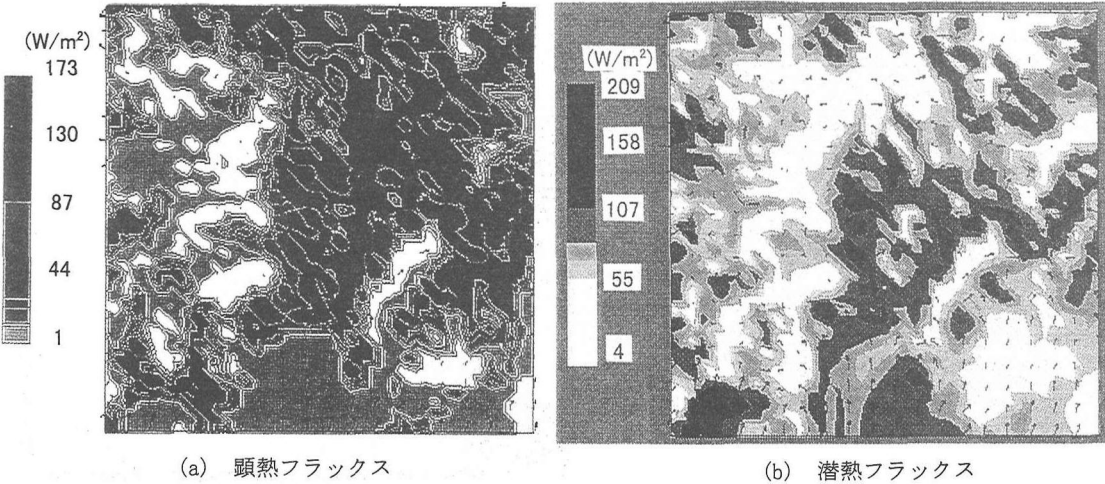


図-7 14時における地表面からのフラックス

は殆ど影響を与えないことを確認した。すなわち、今回の空間的なスケールからみる限り、人間活動に伴って発生する水蒸気の輸送過程に与える寄与は小さいものと考えられる。以下では水蒸気排出量を考慮した結果の中で地上より25m高さでの結果を述べる。

4. 1 気温および熱輸送

14 時における気温分布と風速分布を図-6に示す。海岸部での海風による昇温抑制効果や浦和、大宮周辺にて夜間の気温が周辺より高くなることなどが算出されている。しかし、都心部での気温が低く算出されている。図-7 (a), (b)にはそれぞれ顕熱フラックス、潜熱フラックスの分布を表している。都心部での顕熱輸送が過小評価され、都市キャノピーでの長波放射が過大に計算されている。この点は現在改良中であるが、このために都心部での気温が低めに算出されている。

14 時における顕熱・潜熱フラックスと25m高さでの風速の関係を図-8に示す。顕熱・潜熱フラックスと風速との間には当然のことながら相関が確認されるが、土地利用の違いや熱輸送過程の差異によりかなりのばらつきも存在する。また、14 時における顕熱・潜熱フラックスと建物割合との関係を図-9に表す。図は水域から密集地までを含んでおり、建物の面積割合の高い都市域においても潜熱フラックスがかなり大きい値をとることを示している。

4. 2 水蒸気輸送

図-8に12 時における東京周辺の比湿分布と風向分布とを示す。房総半島や東京湾沿いに比湿の高い値を示しているが、風系と照らし合わせて判断すると、これには地表面からの水蒸気供給以外に太平洋や東京湾から吹き込む海風により移流されたものである可能性が高い。

5. おわりに

東京の夏期及び冬期における水蒸気の時間変動を検討し、自動車や人体からの水蒸気排出量が大气中の水蒸気量に及ぼす影響は小さいこと、夏期では境界層の発達に、冬期では季節風の強さに大きく影響されることを推測した。一方、人工的な水蒸気排出を含めた様々な効果を取り入れた都市気候モデルを構築することを試みた。夏季の晴天時にモデルを適用し、人工的な水蒸気排出量は少量であり影響が僅かであること、高さ25mでの比湿には地表面からの水蒸気の供給や移流の効果が重要であるとの推測した。数値モデルの検証を進め、より定量的に輸送過程を検討したいと考えている。

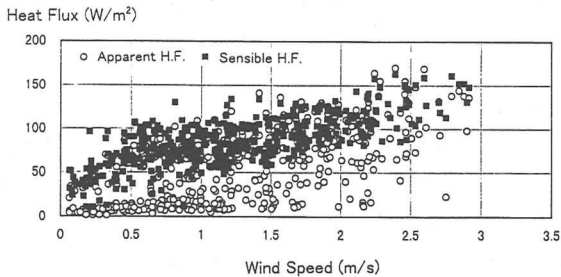


図-8 顕熱・潜熱フラックスと風速との関係

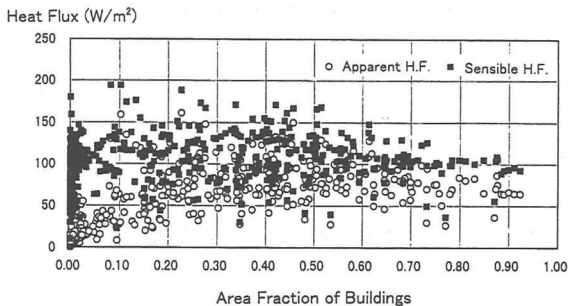


図-9 熱フラックスと建物の面積割合との関係

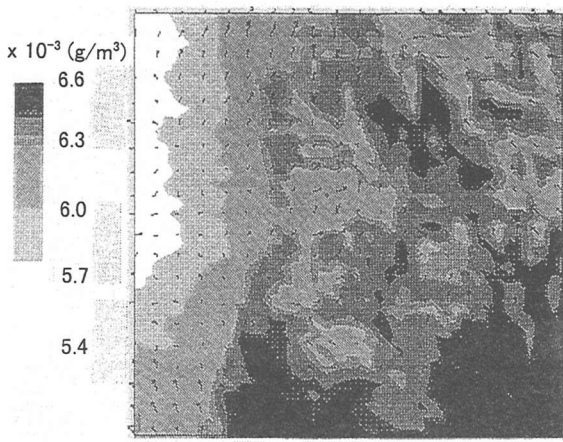


図-10 12 時における比湿と風向の分布

謝辞：本研究の一部は文部省科学研究費基盤研究(B)課題番号 08455226 (代表：河原能久) により行われた。ここに記して関係各位に謝意を表する。

参考文献：

- 1) 小元敬男, 鱧谷憲, 嚴香姫：わが国の都市の近年の湿度変化, 水文・水資源学会誌, Vol. 7, 106-113(1994) .
- 2) 経田正幸, 高橋俊二, 上口弘晃：都市化による湿度変化のシミュレーション, 1997 年春季大会講演予稿集, 日本気象学会, 97(1997).
- 3) 河原能久, 川又孝太郎, 玉井信行：臨海部の開発が海風と都市熱環境に及ぼす影響に関する数値実験, 環境システム研究, 274-279(1994).
- 4) Kato, S., S. Murakami, T. Chikamoto : New $k-\epsilon$ model for stable and unstable flowfields including damping effect due to buoyancy, Int. Symp. Mathematical Modelling of Turbulent Flows, 187-192(1995).
- 5) Kimura, F. and Takahashi, S. : The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area : A numerical experiment, Atmospheric Environment, Vol. 25B, 155-164(1991).
- 6) 一ノ瀬俊明：細密地理情報にもとづく都市のエネルギー消費と都市熱環境の解析, 東京大学博士論文 (1995).
- 7) 岩瀬善彦, 森本武利：やさしい生理学, 107-131, 南江堂(1995).