

## 都市気候学\*

関 口 武\*\*

## 1. はじめに

都市気候とは都市が形成されたことにより変貌した下層大気の状態をさすものである。

都市の定義は必ずしも単純ではないが、要するに、比較的せまい地域内に、大量の人口集積がおり、それと同時に、地表面の相当部分がコンクリート、アスファルト、屋根瓦等の熱容量が小さく、かつ非透水性物質によりおおわれていることと、高層建築物の林立による地表摩擦の増大、さらに生産活動の場としての工場の存在、そこからの強い発熱作用、煤煙による大気汚染、都市内に集中する自動車の排気ガスによる大気汚染、集積した人間の発熱、料理、暖房用等の燃料消費による発熱、大気汚染等が、その上の空気の性質を大幅に変化させる。その結果として変化させられた気候状態を研究するのが都市気候学である。

この都市気候学研究に際して二つの相異なった立場がある。その一つはややマクロな観点に立って、都市を一つのユニットまたはポイントと考え、周辺の自然状態との比較において、都市の存在による気候の変形の度合を調べる立場である。英語で urban climate, city climate というのはこれである。これに対して第2の立場は、よりミクロなもので、都市のラフネスの中、すなわち都市内部、より具体的にいえば道路面上、建物の周辺での気候状態を取扱うもので、intra-city climate 又は interbuilding climate ともしようべきもので、日本語では建築気候学という言葉で総称される分野である。

1968年10月、ブリュッセルで「都市気候学および建築

気候学に関する国際シンポジウム」が開催され、この分野に関する世界各国の研究の現況の紹介や情報交換が行なわれた。これを受けて、日本では気象学会と建築学会の共催による「都市における建築と気象のシンポジウム」が昨年秋に計画され、11月26日に開かれた。

ここでは主として前者のややマクロな都市気候学の立場からの研究の主旨、現況、問題点などをまとめて紹介

第1表 都市大気の特性 (LANDSBERG による)

気 温	
年平均	+0.5°~1.0°C
冬最低 (平均)	+ 1°~2°C
デグリーデイ	- 10%
湿 度	
冬	- 2%
夏	- 8%
雨	
年雨量	+ 5~10%
5mm以下の雨日数	+ 10%
降雪	- 5%
放 射	
全天放射	- 15~20%
紫外放射 (冬)	- 30%
〃 (夏)	- 5%
日照時数	- 5~15%
雲 量	
全雲量	+ 5~10%
霧 (冬)	+ 100%
〃 (夏)	+ 30%
風 速	
年平均	- 20~30%
瞬間最大	- 10~20%
静穏	+ 5~20%
汚染物質	
凝結核	+ 10倍
汚染ガス	+ 2~25倍

\* Urban Climatology

\*\* T. Sekiguti 東京教育大学理学部

—1969年10月3日受理—

しておきたい。

2. 都市気候の特性

都市が形成されたことにより、気候が変化させられる度合は、建物の密集した市内と郊外の広々とした平地での気象の観測値を比較することにより、両者の差を調べて、一応は判断することができる。

世界各地でこのような調査を行なった結果をまとめたものが第1表である。

概していえば、「市内は高温で、湿度はその逆に小さい。雨はやや多く、雲も多い。さらに大気汚染がはげしく、そのため太陽放射は少なくなっている。そして、地表との抵抗が大きいので、風速は弱い」ということが結論される。

以下これについて、その実態、およびその原因について触れていきたい。

3. 都市温度

都市が郊外より、常に高温であることは、もはや常識になり、当初は異和感をもっていた Heat Island という言葉も、現在では抵抗なく使われるようになってきた。したがって、今さら市内と郊外の気象観測所の気温を比較し、都市が高温であるという実例をあげるには及ぶまい。

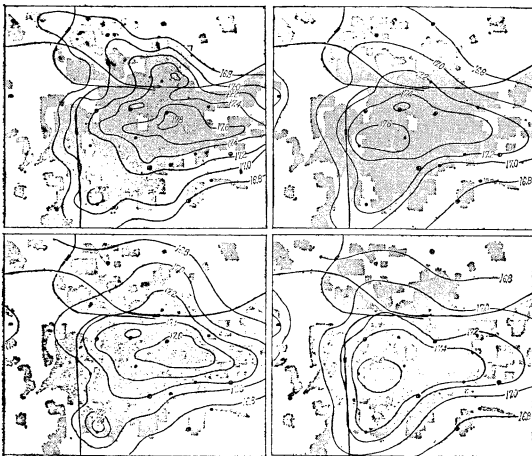
しかし、任意に選択された市内および市外の各一か所の値を比較するというに、それ程の意義を認めないとしても、都市域の Heat Island の形態、その高温の度合を知り、都市温度の実態を定量的に把握しようということは有意義である。

この際、都市内外に数多くの気象観測所を設置し、そのルーチンの観測値を求めることは財政的負担が大きすぎて、多くの場合実施不可能である。これに代るものとして、短時間内にすばやく移動して、市の内外の多くの地点の温度を測定する移動観測法が考案されている。すばやく移動するためには、自動車が使われるのがふつうで、都市内外を縦横に走り、多くの地点の温度測定を行なえば、都市温度の分布図を描くことができ、Heat Island の地表形態は正確に把握することができる。

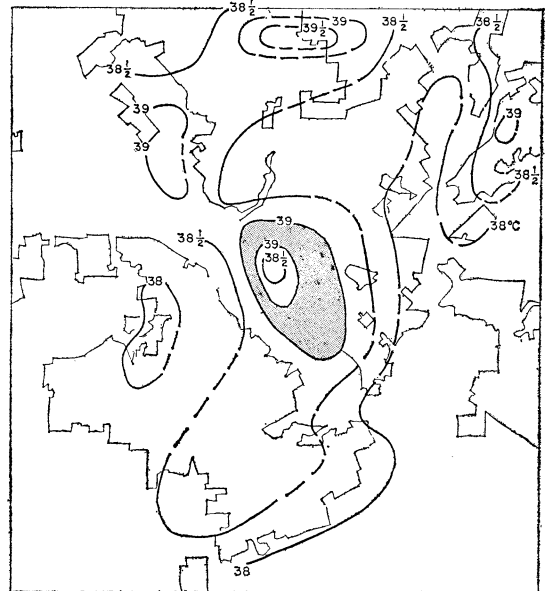
その結果によれば、Heat Island は建物が密集した市街地全域をその勢力範囲におさめ、その内部ではあまり顕著な温度差はない。これに対し、郊外の開けた地域と建物密集域との境界域付近は、等温線が密集し、気温の水平的傾度が大きくなっている。ここが Heat Island の外縁である。

なお Heat Island が顕著に発達するのは、主として冬半年の夜間の最低気温出現時のことである。静穏快晴の放射型の天気の場合には、この時刻ごろ、郊外の開けた土地では顕著な気温の接地逆転が発達する。市内での気温逆転の形成は顕著ではない。そこで都市内外に著しく大きい気温の温度差が発生することになる。

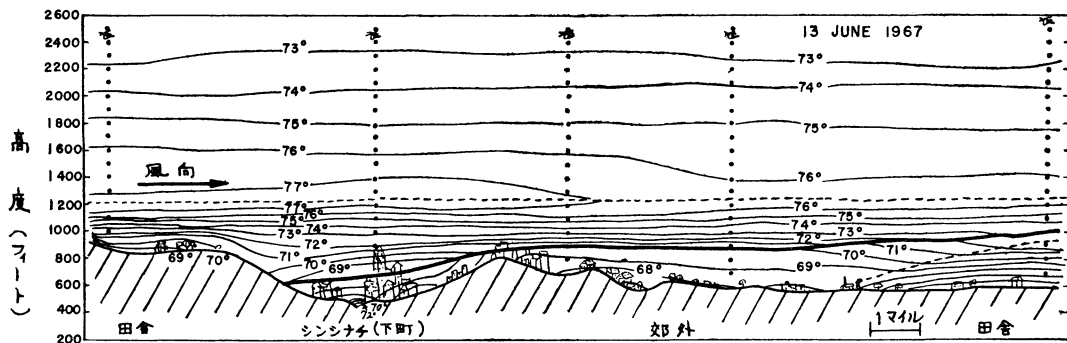
温度差は都市により、時刻により、天気状態により、一定ではない。人口3～5万程度の中大都市では、その最大値は3°～5°Cに達し、東京では10°Cを越えた例も測定されている。



第1図 a) 大垣市の Heat Island 1957-10-28 夜

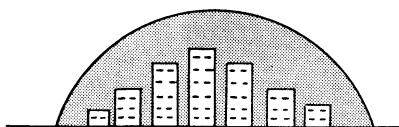


第1図 b) ダラスの Cool Island 1967-8-7 昼間

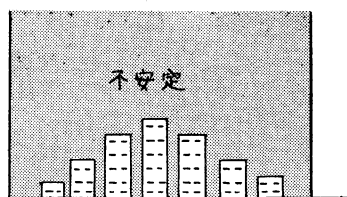


第2図 シンシナチ上空の気温分布図

無風

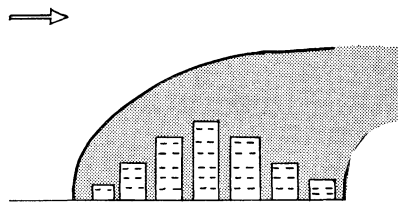
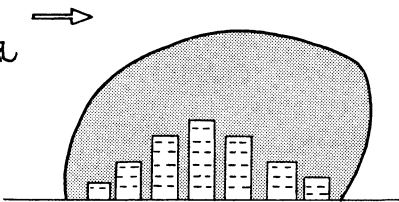


安定



安定

風



関口のモデル

クラークのモデル

第3図 都市大気モデル

雨や風の日には都市内外の温度差は小さい。風速が8m/secを越すと、温度差がほとんど0になるという報告もある。

ただ、ここで注意を要するのは、今までの話は、道路上1.2~1.5m程度の高さのところの気温分布に関するものであることである。都市域といっても、その中心の都心部では高層ビルが林立している。このようなところでは、太陽からの放射の大部分はビルの壁に吸収され、道路面上にまでは到達しない。そこで都心部の道路面上の空気は暖まらず、むしろその周辺の、建物の高度も低いところの道路の方が高温になり、都心部にはかえってCool Islandが形成されるというおもしろい報告もあるアメリカのダラスとフォート・ワースで測定された結果がそれで (F.L. Ludwig 1968), これは夜間の最低気

温時よりも日中の最高気温のところに顕著に認められる。

このような Heat Island の鉛直構造は、バルーンを飛ばしたり、あるいはけい留気球を都市内外で数多くあげ、ないしはそれらを移動させて観測することにより知ることができる。最近ではヘリコプターや軽飛行機を都市上空に飛ばせて上層気温分布を測定することがアメリカをはじめ、日本でも行なわれるようになってきている。都市上空の気温の三次元的構造を調べようというのであるが、観測点の数が必ずしも多くないので、かなり主観的な図になっていることは否定できない (第2図参照)。

概括的にいって、底層の都市の影響、すなわち、Heat Island が顕著に認められるのは、地上数十mから百数十mまでで、都心部のビルの平均高度の3~5倍程度までであるらしい。これは後述する都市上空の風が風速の

第2表 都市と郊外の熱収支の比較（シンシナチの例）

13 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup> （6回平均）		都心	郊外	都心が + -		人工熱の%
				（%）		
I+H	短波放射（入）	1094	1165	-	6.2	3.7
R	“（出）	172	228	-	24.5	23.8
I+H-R	“（ネット=入-出）	922	937	-	1.7	4.4
G	長波放射（入）	618	569	8.6	-	6.6
$\epsilon\sigma T^4$	（出）	762	665	14.6	-	5.4
G- $\epsilon\sigma T^4$	（ネット）	-144	96	50.0	-	28.5
RN	全放射（ネット）	778	841	-	7.4	5.3

極大を示す高度とほぼ一致し、それ以上では、都市上空の気温は郊外上空の気温とほぼ等温になっている。

そこで筆者は都市大気として、下記のようなモデルを考えている。すなわち、

「建物が密集した市街地をおおっている薄いヴェイル状の空気で、その厚さは建物の平均高度の3~5倍で、毛布を敷いたように、ピッタリと都市上空にへばりつき、容易にはげない。高温で、この空気が Heat Island の本体を構成している。動かずに停滞しているので、都市域からの汚染物質を多量に含み、よごれている。要するに、ブランケット状に都市上空にへばりついているうすい空気層が存在し、これが都市大気である。

そして、この都市大気は強い風が吹いても、完全に引きはがされて、吹きとばされることは稀である。」で第3図に示したとおりである。

アメリカのクラーク等は観測結果を整理するにあたって、このようなブランケット状の都市大気は考慮することなく、上空へ連続的に漸移し、風が吹けば、風下へ吹き押されるより単純なモデルを考えている。

都市上空の風速極大層の存在、種々な高度での気温の微変動の状態の検討の結果よりすれば、前の筆者のモデルの方が、現実に近いもののように思える。

最近では都市、郊外の熱収支を計算することが行なわれ、例えばシンシナチの夏の静穏快晴の日については、第2表のようにになっている。郊外に比べると、よごれた都市大気による温室効果が認められる。すなわち入射短波は6%少く、正味（ネット）でも約2%少い。これに対し、長波ではネットで、郊外より50%も大きい。なお長波出射が15%も大きいのは、都市の建築物等の構造物のほうが、郊外の緑地より多量の熱の吸収、貯蔵、放出を行なうため、また長波入射の大きいのは、上空のよごれと都市大気からの放射のためである。それにもかかわらず、全放射に関しては都心で郊外より7%も少なく

なっていることは、そこに Cool Island ができていることも結びついている。なお朝8時の観測結果では、逆に11%多く、Heat Island の形成を暗示している。

人工発熱に関しては、合計で53.045 ly/day (0.037 ly/min) と概算され、その内訳は68%が燃料、33%が自動車排気ガス、0.1%が人間、動物の代謝熱と考えられている。その熱量は朝（8時）が0.052ly/min で、全熱量の20%、昼（13時）は0.041 ly/min であるが、全体に対して占める割合は5%にしか当たっていない。夜（20時）は25%と推算されているが、要するに、人工熱が全熱収に対して占める割合は、その4分の1以下という点に注意してほしい。

#### 4. 都市の日射・日照

都市の日射が郊外より少ないことについては、シンシナチの例について述べた。短波長放射のみならず、全天からの水平面日射量もかなり少ない。その具体例としては、筆者等による東京都の日射分布測定があるが、都市内外の全日射量に大きな影響を及ぼしているのは、大気汚染であり、ことに川崎地区および江東地区の工場地帯からの煤煙の影響が顕著であった。

この際、紫外放射の測定は実施しなかったが、パリにおける観測例によると、都市域での日射の減衰は、とくに紫外部に顕著ということだし、今後は波長別に調べられるべき問題のように思える。

日射のみならず、日照時間も都心部では、やや少なくなっている。元来日照とは、太陽が照ったとしても、レンズで紙に焼け跡をつけるか、またはピンホールからの光が感度のにぶい青写真を感光させるに足りるだけの強さに達した場合、すなわち、かなり強い太陽が照っていた時間数をいうもので、もし、都市域に雲が立ちこめ、ないしは濃い汚染物質が、その上空にただよっている場合には、この値は小さくなる。

ロンドンの例をみると、1921~50年の平均が、第3表

第3表 ロンドン周辺の日平均日照時数

	1月	7月	年平均
都心	0.8	6.2	3.6 時間
近郊	1.3	6.3	4.0
郊外	1.4	6.5	4.1
田舎	1.7	6.6	4.3

大気の汚染に基因すると考えざるをえない。

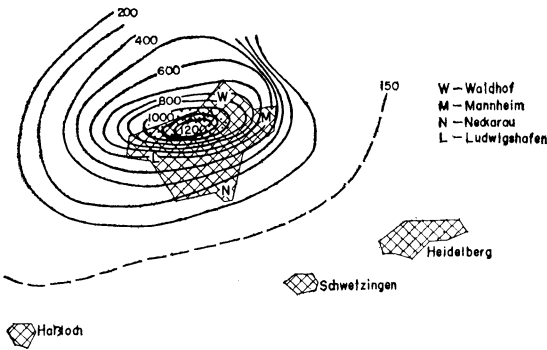
都市大気の汚染状態を知るためには、最も測定が簡単な  $SO_2$  がよく観測されている。これは  $SO_2$  が大気汚染の度合を知る最適の指標というのではなく、あるいはまた、その影響が最も大きいからというでもない。要するに、定量測定が簡単に機械的にできるという利便が買われたからである。

ドイツのハイデルベルクに近い工場地帯で測定された結果を示すと、第4図のように、地上300m層でも、工場地帯上空に Heat Island ならぬ Dust Island が形成されていることがわかる。なお都市域の横断面について高度別の  $SO_2$  量の分布を調べると、筆者の前述したプランケット状の都市大気が存在するというモデルの正当性を支持する証拠になりそうである。

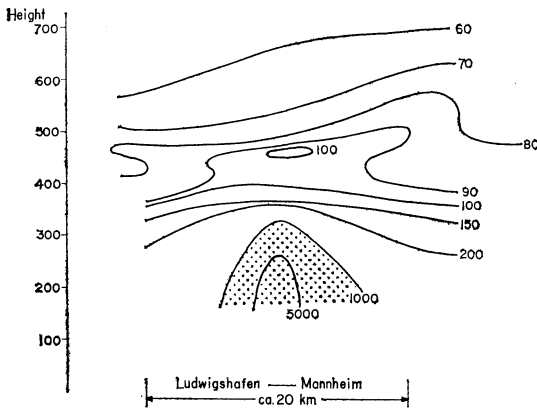
5. 都市と風

都市の風ではない。「都市の形成、存在が一般風にどのような影響を与えているか、逆に云えば、都市上空に形成されている都市大気が風によって、どのような影響を受けるか」を分析研究した結果をまとめるのが本節の目標である。

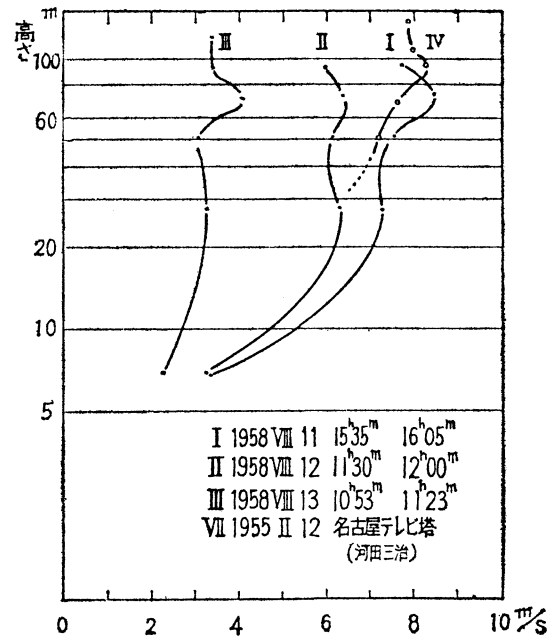
都市の表面はでこぼこしている。高い高層建築がそびえている反面、建物間、道路、空地等はくぼみになり、空気の自由な流動を大きく妨げている。高層ビルの中庭



第4図 a) 地上300m の  $SO_2$  の分布, 1965-4-3 (Mannheim-Ludwigshafen 工業地帯上空)

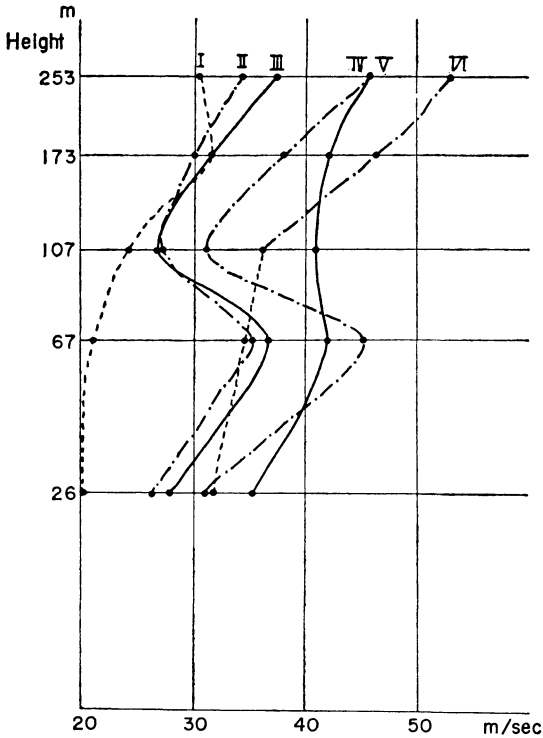


第4図 b)  $SO_2$  濃度の鉛直分布 ( $\mu g/m^3$ )



第5図 a) 30分間平均風速の鉛直分布 (河村)

となっている。たしかに都心における日照時数の減少が認められる。しかし、この値を1958~67年の状態と比較すると、最近では11~1月の真冬3か月の日照に著しい増加が起っており、その割合は約50%に達している。これはばい煙禁止条例により、都心部の空気がきれいになったためと説明されている。郊外の Wisley の値は、ほとんど顕著な差がなかったため、全域的な気候変化によるとは考えられない。日照時間の減少は、主として、都市



第5図 b) 東京タワーの風速鉛直分布, I, II  
は異なる日の測定値

や狭い道路にある空気は停滞して、なかなか入れかわらない。要するに、でこぼこの多い都市の部分をおおっている空気は、そのでこぼこの間に捕えられ、容易に入れかわらない傾向がある。その空気が都市大気であるが、これは都市域における風速の鉛直分布を測定してみると、はっきりその存在が確認できる。

第5図がその実態を示すものである。一般に、風速の鉛直分布は対数法則に従うものと考えられているが、都市内の風は、その様子をことにし、地上数十m～百数十mの高さで一度風速の極大を示し、その後一度弱まるが、さらに対数法則にしたがって高さの増加に伴って風速を増大させていっている。このような状態は、一般に風速が弱い場合には、風速極大層の高さは高く、風速が増加するにつれて低下してくる。しかし、台風時の風速40m/s程度の暴強風時でも、この層の存在は認められる。

これは、空気の流れの中に都市大気という障害物が存在しているため、それをよけて空気が流れようとするため、障害物の左右、上方に空気が集中し、風速の大きくなる場所が形成されるからであろう。高層ビル等によ

る物理的、機械的な抵抗のほかに、弱風時には都市域が高温であることのために起こる thermal mountain (熱的原因で、山地が存在しているのと類似した上昇気流、それに伴う降水をもたらす現象、温度差 $5^{\circ}\text{C}$ のとき約1000mの山地に相当すると概算されている)の影響も加わる。

風速極大層上の空気とその下の都市大気とが相異なる性質を示すことは、筆者等による両気層の気温の微変動が、まるで相異なる様相を呈することの指摘や、イギリスの HELLIWELL がロンドン市内の鉄塔および郊外で行なった風速の微変動様式の比較観測結果からも確かめられている。

一般的にいて東京、ロンドンとも、風の強い場合には、風速極大層は数十mに下がり、弱風時には百数十mに上昇する。なお上空の風と郊外の風とは類似した風の乱れ、および温度的特性を示し、一つづきのものと考えてよさそうである。この風速極大層の高さは、都心部における建築の平均高度の約3～5倍に相当している。

そうはいても、都市内の空気が全然動かないというのではない。上空の空気に比べればおそい速度で、風下側に吹き送られていることにはまちがいないし、また都市構造上、卓越風向に平行している道路沿いには郊外の新鮮な空気が吹き送られ流れこんで来ている。

都市へ流れこんでいる風は、一般風の静かな場合には割合に顕著に認められ、その好例としては霧氷を指標に使った北海道の旭川での観測などがある。都市へ流入する街路の風を測ったフランクフルトの例もあり、高気圧性の放射型の夜には Heat Island の影響で都市循環系 urban circulation-system ができるためであると説明されている。

## 6. 都市の雨

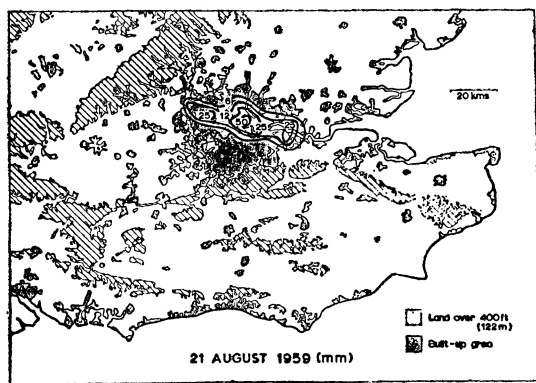
これについて全く相対立する見解があり、現状では真相は不明とっておいたほうがよからう。

その第1は都市域には周辺より多量の降水現象がみられると主張する立場で、「都市から発生する汚染物質が凝結核となるとともに、高温な都市域で熱対流が発生助長され、雨量を増加させる」と結論している。

これに対し、第2の立場は批判派で、「降雨現象と都市の広さとは面積的なスケールがちがう。したがって、都市のような小スケールのものが、より大スケールの降雨現象に大きな影響を及ぼすことは考えられない。低気圧性、前線性の雨のスケールは数百km～数千kmのもので、都市と同程度のスケールの雨としては雷雨し

か考えられない。しかし雷雨が都市に集中したり、雷雨の雨が都市域で特に強く降るという過程を理論的に説明することは困難である」と考えるものである。

筆者はどちらかといえば後者の批判論賛成である。東京周辺の雨量、雨日数の地理的分布を調べてみても、また第1の立場の主張は弱い雨は都市域に多いと結論されそうなので、とくに弱い雨についてのケーススタディを行なってみても、都市域が多雨であるという事例は求められなかった。



第6図 都市の雨（雷雨の日雨量）a) ロンドン

アメリカの都市についてのシャグノン (Changnon, Jr., S.A.) の論文もよく読んでみると、著者の意志には反するが、都市域の多雨を普遍的現象として一般化するということには、にわかに賛意を表しかねる。またイギリスのアトキンソン (Atkinson B.W.) がロンドンで1951~60年の平均値に基づき雷雨については都市の影響があることを論じ、とくに1959年8月21日については、雷雨がロンドン都心部で発生し、最大50mmの局地的な大雨を降らせたことを解析して、それが都市の影響であることを報告している。よく似た例は東京についても1963年8月25/26日の雷雨がある。江東地区で110mmの局地的な大雨を降らせているが、筆者はそれが、東京という都市の影響であるという結論に短絡する勇氣は持ちあわせていない。

都市の雪、とくに積雪に関する調査は最近若干行なわれた例がある。一般に都心部では少なく、郊外に多いという常識が確かめられているだけであるが、これは洋の東西を問わず同一で、都心の積雪の少いのは、市街地からの発熱と熱保存に原因しているらしい。なおスウェーデンの報告に、積雪時の都市域の航空写真を利用して、300×300mの格子毎の屋根の積雪状態を%で示し、その地理的分布をまとめたものがありおもしろかった。

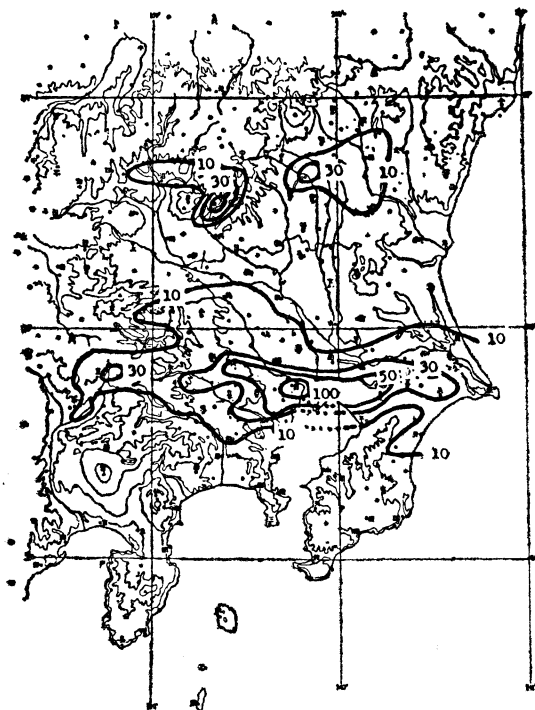
なお都市の影響、とくに工業都市の影響を調べたものとして、フランスで土、日曜日と他のウィークデイの雨を比較し、普通のところでは-20%程度なのに、工業都市では-30~-45%に達し、明らかに影響があると論じた報告 (DETTWILLER, J.) もある。なお、パリは-45%である。統計的処理からだけでの結論には説得力の弱さを感じられる。

### 7. 今後の問題点

都市気候が人工気候であることを疑う余地がない。しかし、そのスケールは直径50km、高さ100mどまりのものである。したがってより大きなスケールの大気現象に対しては、積極的にほとんど何の影響も与えていないはずである。

大気の熱的な状態は局地性が大きい。したがって都市域の Heat Island や Cool Island の存在は十分納得できる現象である。

そして、これに伴い、とくに工場地域での強い発熱があれば、その上空に熱的な積雲が形成されることも理解できる。しかし、その積雲が発達し、あるいは何か別の原因で、都市域全体が雲におおわれ、郊外に比べると雲量が多くなっているという報告には、にわかに賛意を



第6図 b) 東京, 1963-8-25/26

表することはできない。

同様のことは、都市の雨についてもいえることで、スケールが都市と comparable order である雷雨以外には、都市の影響があらわれるとは考えられない。もし影響力がありとすれば、雨が降りそうな状態のとき、凝結核の数の多い都市域では、弱い雨が形成される可能性はありうるかも知れない。

現在までのところ、都市が雨に影響を及ぼすか否かについては、それを積極的に支持する証拠は完備ではない。筆者はやや否定的である。

なお都市域では、地表面はコンクリート、アスファルト等でおおわれ、地中との水分の交換は行なわれない。降った雨は表面を流れ、地中から供給される蒸発は大幅に制限される。あたかも岩石砂ばくの感を呈しているはずである。

このような事情を頭において、都市気候を、とくに特徴的である Heat Island の形成を、成因的に論ずる方向が取られるべきであるが、現実には、都市気候の実態に関し、必ずしも十分な情報が得られているわけではない。観測測定値がないのである。これには適当な測器のたりないことも大きな原因となっている。

それとともに、都市気候程度のスモール・スケールの現象を組織的に取り上げて測定し、研究しようという組織がなく、経費、動員力に欠けることも主要な原因で、今後の発展にはかなり多くの人々の協力と相当額の研究費を必要とする。

昨秋の建築畑の人々とのシンポジウムが、この方向への第一歩のふみ石になれば幸いと思っている。

なお都市内部の気候、換言すれば建築物間の気候も重要な研究課題として取り上げらるべきものであろう。

#### 参考文献

- LANDSBERG, H.E. 1965: Climate and urban planning. Brussel symposium print.  
 関口 武, 1963: 都市上空の気温の地理的分布. 地理学評論, **36**, 577-589.  
 LUDWIG, F.L. 1968: Urban temperature fields. Brussel symposium print.  
 CLARKE, J.F. 1968: Nocturnal urban boundary layer over Cincinnati, Ohio. (may be Monthly Weather Review).

- BACH, W. & PATTERSON, W. 1968: Heat budget studies in greater Cincinnati. Proc. Ass. Amer. Geogr. **7**~11.  
 GEORGH, H.W. 1968: The effects of air pollution on urban climates. Brussel symposium print.  
 JENKINS, I. 1968: Increase in averages of sunshine in central London. Brussel symposium print.  
 河村 武, 1960: 都市上空下層における気温および風速の垂直分布, 東京教育大学地理学研究报告 IV. 133~139.  
 JONES, P.M. de LARRINAGA, M.A.B. & WILSON, C.B. 1968: Some measurements of the urban wind velocity profile in the first 1,000 ft. Brussel symposium print.  
 HELLIWELL, N. 1968: Some open scale measurements of wind over central London, *ibid*.  
 MUNN, R.E. 1968: Air flow in urban areas. *ibid*.  
 CHANGNON, Jr. S. A. 1969: Recent studies of urban effects on precipitation in the United states. B.A.M.S. **50**, 41~421.  
 ATKINSON, B.W. 1968: A preliminary examination of the possible effect of London's urban area on the distribution of thunder rainfall 1951~60, Trans. & Pap. Inst. Brit. Geogr. Pub. No. 44, 97~117.  
 ATKINSON, B.W. 1968: The reality of the urban effect on precipitation. A case-study approach. Brussel symposium print.  
 SEKIGUTI, T. 1968: Precipitation climatology of Japanese city areas, *ibid*.  
 DETTWILLER, J. 1968: Incidence possible de l'activité industrielle sur les précipitation à Paris. *ibid*.  
 LINDQVIST, S. 1968: Studies on the local climate in Lund and its environs. Geogr. Ann. **50**, 79~93.  
 MUNN, R.E., HIRT, M.S. & FINDLAY, B.F. 1969: A climatological study of the urban temperature anomaly in the lakeshore environment at Toronto. Jour. Applied Met, **8**, 411~422.  
 LINDQVIST, S. 1968: Stadsklimatiska modellförsök med infraröd televisionssystem (model experiments on urban climate with an infrared television system), Television-system i Naturgeografiskt forskning.