

都市高温の主原因について

應用物理教室

山本 武夫

1. 緒 論

大都市の内外に於て、気温の差の存在することは既にヨーロッパの諸都市について、前世紀の後半頃から知られてゐる。吾国の場合についても、相当数の調査や研究があるが、その主原因として、従来は工場暖房等、都市内部で発生する人工熱が、挙げられてゐる。荒川、福井両博士の説がそれである。筆者も亦、日本の気候変化の研究に、関連して、この問題を取上げ、上述の如き、人工熱直接作用説が、誤謬であることを論じた。その後、今村学郎博士は、空襲後の東京の気温についての論文の中で、筆者の所論を、一応は、認められたが、都市高温の原因は、単一では、ないであらうとゆる意見を付加された。

筆者の、結論は、都市高温の原因は、夜間輻射に及ぼす煙霧質の影響がその本体であると言う点にある。以上の見解を支持すると考へられる著しい事実を挙げ、重ねて本問題を考究して見たいと思う。

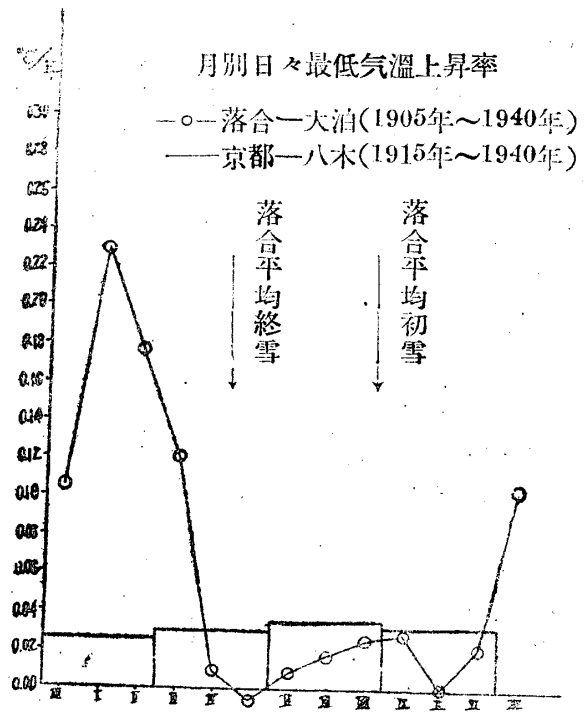
2. 都市に於ける最低気温上昇率の季節別変化

旧領、樺太の「落合」は、急激に膨脹した都市の一例であるが、「落合」と「大泊」の気温差について調べて見た。「落合」と「大泊」は大體、同一の気候区にあると見做せるので(註)(落合一大泊)の変化は、落合に於ける、自然的影響を除去し、人工的影響の変動によるもののみを残すことになるであらう。

第1図に、(落合一大泊)の日々最低気温差の増大率を各月別に、求めた結果を示した。各月の増大率は1908年から1940年まで、33年間の観測値から、最小自乗法によつて求めたものである。

(註) 同一の気候区にあると見做せるかどうかの吟味は、年平均日々最低気温について
(落合一大泊)の増大率が $+0.062^{\circ}\text{C}/\text{年}$
(真岡一大泊) " $-0.006^{\circ}\text{C}/\text{年}$
なることによつて大體満足せられてゐるものと考へられる。

この内、増大率の小さい、Ⅲ月、Ⅴ月、Ⅵ月、Ⅹ月の場合は、蓋然誤差と同程度の大きさで、物理的意味をもつてゐるかどうか疑はしい。然し冬季間の、増大率が、夏季に、比較して、著しく、大きく十倍程度にも、及ぶことは、確かな事実である。而も、かくの如き、顕著な季節差は、暖地、例へば、(京都一八木)等の場合には、完く、認められない。(第一図)又(落合



(第1図)

一大泊)の日々最高気温差について、増大率を求めて見たが、その量は、問題にならない程小さく(註)従つて又はつきりした季節別変化も

(1) Hann, J. : Ueber der Temperaturunterschied zw. Stadt u. Land. Z. Met. 20(1885)
 (2) 鳥山文尙 : 東京市及びその附近に於ける気温の配布について 気象案誌10. (昭7) P388 等
 (3) 荒川秀俊 : 日本の気候は変化しつつあるか 気象案誌 14. (昭11)
 (4) 福井英一郎 : 東京の気温 (「科学」10巻昭和15)
 (5) 山本武夫 : 都市膨脹の気候に及ぼす影響の本体について 「科学」18巻第9号
 (6) 今村学郎 : 「空襲の大火と東京の気温」 「科学」9巻第6号

認められない。

(註) 最小自乗法で算出された結果を記すと
 1月 +0.0005°C/年
 8月 +0.002°C/年

日々最低気温の(落合一大泊)の増大率は
 冬期 { XII月+0.11 °c/年
 I月+0.23
 II月+0.18 } 夏季 { VII月+0.017 °c/年
 VIII月+0.025
 IX月+0.028 }

で冬期は夏季の十倍程度であるが、十倍と言う物理量の変動は、相当大きいものであるから、その原因を断定することも、困難ではない筈である。先づ、都内の熱発生量が、冬季は夏季に十倍するとすれば、而して、それが都市高温の主原因であるならば、最低気温にのみでなく最高気温の方へも、同じ傾向を影響があらはれる筈である。次に、風による搔乱作用により夜間気温の降下が妨げられる影響を考へるならば、最低気温上昇率の季節別変化は風力の大きい冬季の方が小さく、夏季の方が大きくならなければならない筈である。以上の如き考察を支持すべき事実がないのであるから、結局、これらの原因としては、(a) 都市の大气中に於ける煙霧質量の季節変化、(b) 地面条件の季節変化が残された問題となるであらう。

の
 夜間輻射による、気温の降下量を、D.Bruntの方法によつて、理論的に解くと

$$-\theta = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R \sqrt{S}}{\rho C \sqrt{K}} \quad (1)$$

となる。但し ρ 、 C 、 K は夫々地面の密度、比熱、熱傳導度、 S は、日没時よりの時間であらはず。 R は、地面からの輻射熱量の総和であるが、今これを

$$R = \sigma T^4 (1-a-b-\sqrt{e})(1-an) \quad (2)$$

と置く、但し、 a は Boltzmann の常数、 T は地面温度、 a 、 b は大气と地面の熱交換に関する常数であるが、こゝでは、 a 、 b は

$$a=0.60 \quad b=0.042$$

とゆう値を用いることにする。 e は水蒸気張力、 n は煙霧質量、 a は、煙霧質による、夜間輻射の吸収係数とする。

n の増大による、最低気温の上昇率は

(1) (2) 式より

$$k = \frac{d\theta}{dt} = \frac{2a\sigma T^4(1-a-b\sqrt{e})\sqrt{S}}{\sqrt{\pi} \rho C \sqrt{K}} \left(\frac{dn}{dt} \right) \quad (3)$$

(3) 式により「落合」に於ける、最低気温上昇率の季節変化を説明するために、冬季 (VII月~II月) 夏季 (VII月~IX月) について、平均気温 T 平均水張 e 、日没時より日出までの平均時間

S 、の値を入れると

$$\frac{\{T^4(1-a-b\sqrt{e})\sqrt{S}\}_{夏}}{\{T^4(1-a-b\sqrt{e})\sqrt{S}\}_{冬}} = 0.9$$

但し、 T 、 e 、 S 、は、次の如くである。

	冬季 (XII月~I月)	夏季 (VII月~IX月)
気温 T (°C)	258.4°K	285.9°K
水張 e	2.0mm	11.5mm
日没~日出 時間 S	13h51m	10h02m

この項によつて、第1図に見らるゝ如き、季節別変化を説明することは出来ない。次に、大气中の煙霧質量は、季節変化をするが、これについては大阪市に於ける、伊東曠自博士の観測及び新潟市に於ける、河辺昌平氏の研究がある

冬季 (XII月~V月) と夏季 (VII月~IX月) の煙粒子数の比は、大阪に於ては 1.5 倍、新潟に於ては 1.4 倍である。「落合」に於ける、煙霧質量の観測値が無く、決定的なことが言へないが、煙霧質量の季節変化の存在することは勿論としても、この場合も、十倍程度の変化は考へ難い。次に、(3) 式に於ける、地面条件の項、 $\rho C \sqrt{K}$ について考察して見よう、若しも地面が雪面であつたとすると、 $\rho=0.1$ $C=0.5K=0.0050$ として $\rho C \sqrt{K}=0.004$ 乾いた土の場合 $\rho=2.5$ $C=0.2$ $K=0.0047$ で $\rho C \sqrt{K}=0.035$

となり $\left(\frac{dn}{dt} \right)$ の変化が同じ Order であつても、最低気温上昇率の十倍程度の変動を説明することが出来る。

第1図にも示す如く「落合」に於ける、平均

(註)₁ 日々平均気温と最低気温との平均値を採る
 (註)₂ 8hと20hの平均値

(7) D. Brunt: Physical and Dynamical Meteorology (1937)
 (8) Baur d Phillip: Gerlands. Beitr. 45. 1935. P82
 (9) 伊藤曠自: 「大阪大气中の塵埃」 災害科学研究所報告No. 4
 (10) (12) 河辺昌平: 「気象と浮塵量」 北越医学会雑誌 昭和16年6月
 (11) D. Brunt.: Physical and Dynamical Meteorology P140~P141及び寺田一彦「気象と農業災害」 P246

初雪及び平均終雪日はⅩ月22日、Ⅴ月19日であつて、最低気温増大率の著しい、Ⅻ月、Ⅰ月、Ⅱ月、Ⅲ月は、積雪期間に当る。地面条件が湿つた土の場合、 $\rho C_v \sqrt{K} = 0.15$ ⁽¹²⁾程度となり、乾いた土の場合よりも、更に大きくなる。

落合に於ける最低気温の上昇率の、著しい季節別変化は、地面条件が冬季、積雪状態になるとゆう事実を考へに入れることによつてのみ説明出来る。このことは、都市膨脹による、最低気温の上昇が(3)式のあらはす如き機巧で行われていることを実証することになり、都市内に於ける、最低気温の上昇は、煙霧質の増大による夜間輻射の減少に、その主原因を求むべきであることは、疑問の余地を残さないと考へられる。

3. 都市気温上昇の飽和性

膨脹しつつある都市とその周辺の気温差の経年変化を調べて見ると、どの場合も、共通して著しい飽和性を、示している。第2図に、Ⅰ月の日々最低気温についての

(Ⅰ) (大阪—和歌山)

(Ⅱ) (落合—大泊)

年平均日々最低気温についての

(Ⅲ) (京都—八木)

の場合を示した。

実験式は、夫々、次の如く與えられる。

$$(I) \left(\frac{t}{4.24 + 1.04t} - 1.6 \right) \text{ 但し } t=0 \text{ 1893年}$$

Prob. error 0.2°C

$$(II) \left(\frac{t}{0.52 + 0.086t} - 7.5 \right) \text{ 但し } t=0 \text{ 1908年}$$

Prob. error 0.85°C

$$(III) \left(\frac{t}{14.0 + 0.75t} - 0.89 \right) \text{ 但し } t=0 \text{ 1914年}$$

Prob. error 0.09°C

かくの如き、都市気温上昇の飽和性は、当該都市の工業化、人口の膨脹の飽和性に並行するものではない。大阪にしても、落合にしても、又京都にしても、その都市の工業化、人口稠密化の盛に行われつつある時、気温の上昇は既に飽和限界に達しているからである。何故飽和性を来すかの原因を決定するには、比較した二観測地点の周辺の状況に関する、より精細なデ

ータを必要とする。又最低気温の上昇が、都市大気中の煙霧質の作用に基くものであるにしても、その気象学的機巧が更に、精密に、調査研究されることを必要とするであろう。然し、この原因についての、一つの考察として、筆者は、次の事実を、挙げたい。大阪市立衛生試験所⁽¹³⁾では、煤塵計をもつて、降下煤塵量の測定を行つているが、その量の経年変化の概略を見ると、大正2年(1913年)が174.4㌔/平方㌔、昭和3年(1928年)115.8㌔/平方㌔、昭和7年(1932年)87.7㌔/平方㌔、昭和13年(1938年)104.6㌔/平方㌔である。煤塵計と言うのは、一辺2尺の方形漏斗と30封度入の瓶とからなり、この瓶中に降下した塵埃と雨水を分析して結果を出すものであり、これが、空中に懸垂する煙霧質量をどの程度に正確に表示するかについても問題があり、又、上記各年度の値は、数ヶ所の平均値であるが、その場所も多少違つている。然しながら、此処に注目すべき傾向としては、煤塵量は、決して想像される如く増大の一途を辿つてはいないことである。ところが一方市内の石炭消費量は累年増加の一途にあつたのである。この原因の究明のためには伊東豊自博士⁽¹⁴⁾も指摘してられる如く、各工場に於ける收塵施設の改善進歩や、発煙を伴う、家庭工業の消長、各家庭の発煙状況、を精しく調査する必要がある。然し何等かの理由で大気汚染度に飽和性があるということも考えられる。その理由としては次の二通りが考えられる。

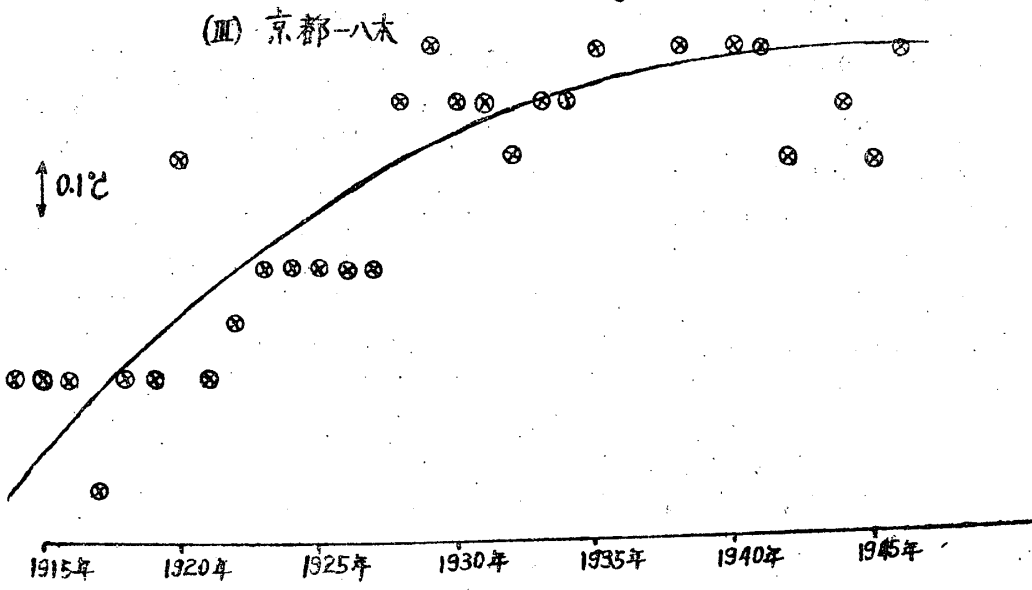
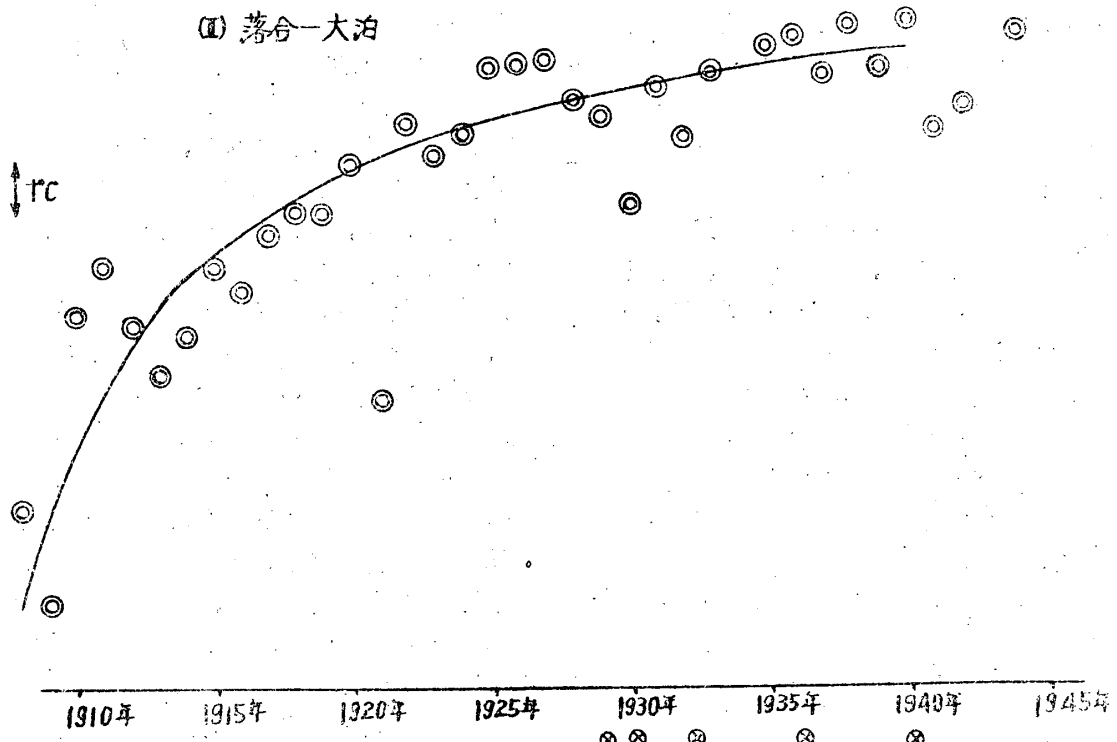
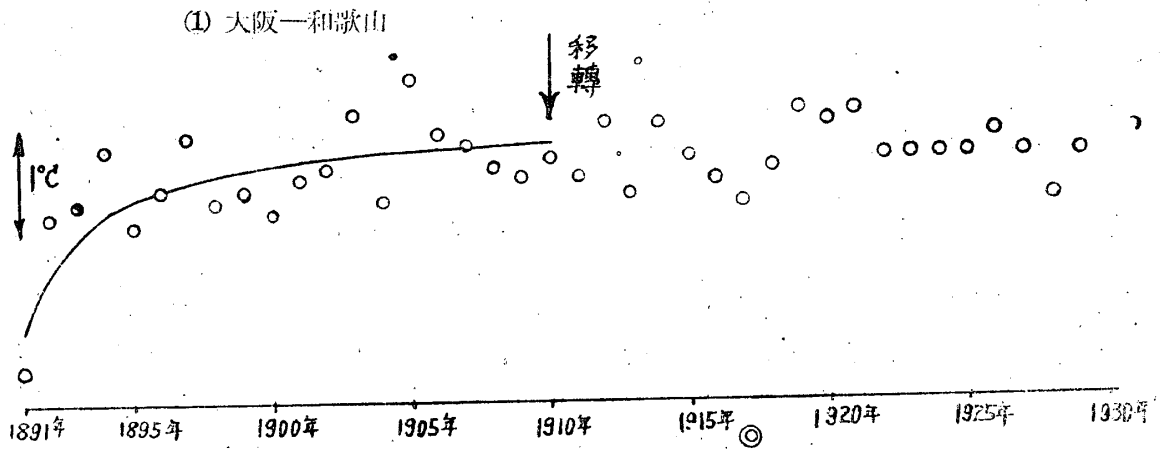
第一は都市に於ける、発煙量が増大しても、大気汚染区域は拡大するが、単位体積中に、懸垂する、煙霧質量は、ある一定の気象条件の下では、一定限度以上には、増加しないと考えるか。

第二はその観測所に影響も及ぼし得る、発煙区域は観測地点周辺の比較的小面積に限られ、その区域外の都市の発展はあまり作用を及ぼさないと考えるかであろう。

いづれにせよこの仮定が許されるとすれば、都市に於ける、最低気温上昇の飽和性は、都市大気中に懸垂する、煙粒子数の飽和性によつて説明されることになる。

(13) 大阪市立衛生試験所：事業成績概要

(14) 伊東豊自：「大阪大気中の塵埃」災害科学研究所報告 No.4 P7.



第2図 都市最低気温上昇の飽和性

(大阪一和歌山)の最低気温の増大の経年変化を、各月別に、実験式であらはすと次の如くである。

(大阪一和歌山)

各月の最低気温差の増大の実験式

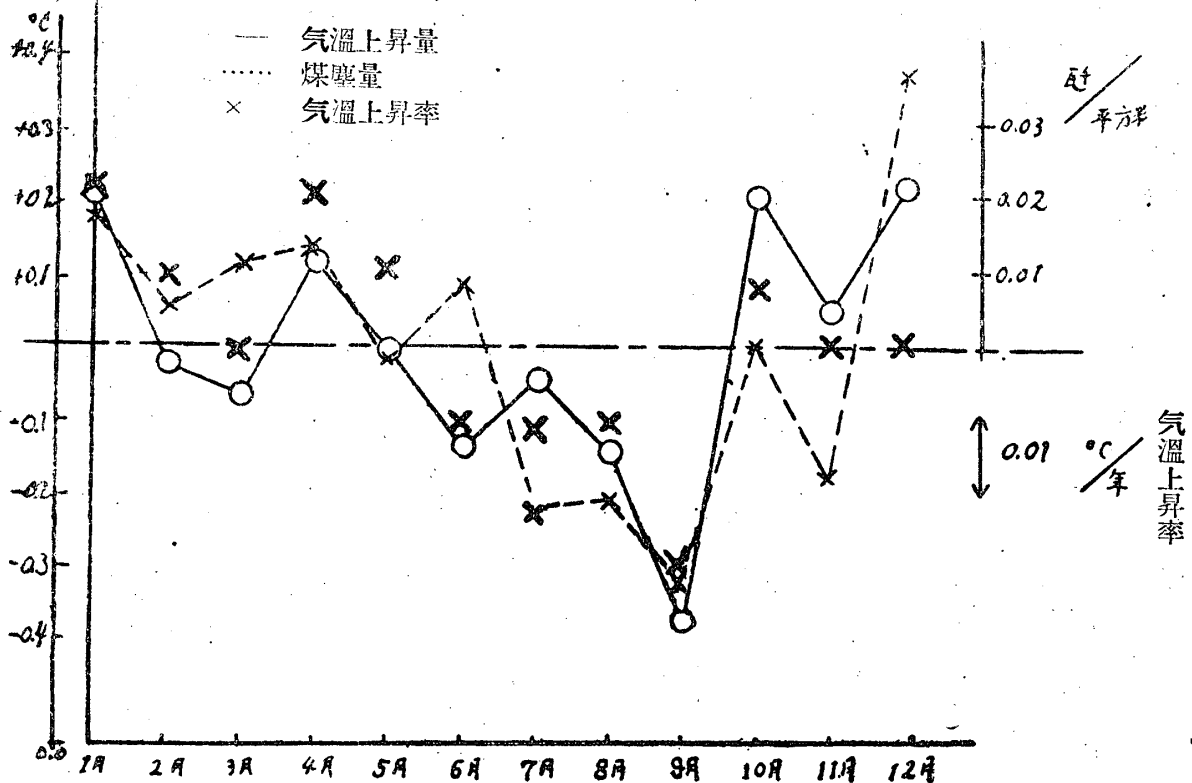
(1891年~1910年)

月	実験式	蓋然誤差	14年の増分
I	$\left(\frac{t}{4.24+1.04t}-1.60\right)$	$\pm 0.08^{\circ}\text{C}$	$+0.75^{\circ}\text{C}$
II	$\left(\frac{t}{11.6+1.1t}-1.19\right)$	± 0.10	$+0.52$
III	$\left(\frac{t}{1.74+0.09t}-1.12\right)$	± 0.11	$+0.48$
IV	$\left(\frac{t}{7.66+0.96t}-0.92\right)$	± 0.14	$+0.66$
V	$\left(\frac{t}{8.47+1.24t}-0.58\right)$	± 0.10	$+0.54$
VI	$\left(\frac{t}{12.3+1.54t}-0.37\right)$	± 0.07	$+0.41$
VII	$\left(\frac{t}{13.1+1.05t}-0.29\right)$	± 0.10	$+0.50$

VIII	$\left(\frac{t}{23.25+0.82t}-0.09\right)$	± 0.11	$+0.40$
IX	$\left(\frac{t}{70.3+0.9t}-0.10\right)$	± 0.09	$+0.17$
X	$\left(\frac{t}{11.5+0.51t}-0.88\right)$	± 0.10	$+0.75$
XI	$\left(\frac{t}{17.1+0.484t}-1.26\right)$	± 0.05	$+0.59$
XII	$\left(\frac{t}{8.5+0.71t}-1.54\right)$	± 0.11	$+0.76$

若しも、上述の如く気温上昇の飽和性が懸垂煙粒子量の飽和性に基くものであれば、表中の14年間の各月別最低気温の上昇量は、大阪の大気中の現在の煙粒子数の各月別、季節変化、と密接な関係を示す筈である。第3図に、大阪市の降下煤塵量(1828~1938年、全市28ヶ所平均値)の各月別変化と、最低気温上昇量の相関を示した。相関係数、 $r=0.69$ である。この相関は上に示した実験式による気温の上昇量でなく、気温の上昇を直線の型で與へ最小自乗法で求めた気温の上昇率(図中×印であらわす)について

第3図 大阪煤塵量中個形物総量の年変化と最低気温上昇量及び上昇率の年変化との関係



(15) 伊東疆自「大阪大気中の塵埃」災害科学研究所報告No.4 P32.及びP60

も成立し、又降下煤塵量でなく、伊東博士が Owens の計塵計や Aitken 核心計をもつて行われた観測⁽¹⁵⁾に基く、煙粒子数や凝結核数の月別平均量を取つても、大体全程度の相関が見出される。

以上の事実は大阪の如き、暖地では、落合の場合と異り地面条件は、夏冬通じてあまり変らず従つて最低気温は、大気中の煙霧質量に左右されることを示している。又このことは全時に煙霧質の密度が簡単に発煙量に比例するという如きものではなく、寧ろ、各月の気象条件によつて定る、ある程度飽和性を持つていることを示唆するようである。

後者の方は断定的とはいひ難いが、一応、結論することが出来るようである。

4. 都市に於ける平均気温の上昇

筆者は、都市に於ける、最低気温の上昇が、煙霧質の増加による、夜間輻射の減少によつてのみ説明せられることを述べた。然し膨脹しつゝある都市に於ては、最低気温のみでなく平均気温も上昇しつゝある。例へば(落合一大泊)の年平均気温差の増大率を求めて見ると

$$k_0 = 0.024^\circ\text{C}/\text{年}$$

である。日々平均気温は6回観測の平均

$$\theta_0 = \frac{\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 + \theta_5 + \theta_6}{6}$$

でその内3回、 $\theta_1, \theta_2,$

θ_3 は、夜間気温と考えられる。年平均の場合、日没後の時間は、夫々、 $S_1=4\text{h}$ $S_2=8\text{h}$ $S_3=12\text{h}$ と考えられるから、 S_3 の場合を最低気温とすれば、 S_1, S_2 の場合の降度降下は夫々 S_3 の場合の

$$\frac{\sqrt{4}}{\sqrt{12}} \quad \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{2}}$$

であつて

$$k_0 = \frac{d\theta_0}{dt} = \frac{1}{6} \left(\frac{d\theta_1}{dt} + \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{d\theta_4}{dt} + \frac{d\theta_5}{dt} + \frac{d\theta_6}{dt} \right) = \frac{1}{6} \left(1 + \frac{\sqrt{4}}{\sqrt{12}} + \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{12}} \right) \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{1}{6} \frac{d}{dt} (\theta_4 + \theta_5 + \theta_6) = 0.4 \frac{d\theta_3}{dt} + \frac{1}{6} \frac{d}{dt} (\theta_4 + \theta_5 + \theta_6)$$

「落合」に於ける、年平均、日々最低気温の上昇率は、先に述べた如く

$$k = \left(\frac{d\theta_3}{dt} \right) = 0.062^\circ\text{C}/\text{年} \quad (1908 \sim 1940)$$

である。上式に於ける、 $0.4 \frac{d\theta_3}{dt} = 0.025^\circ\text{C}/\text{年}$ と

なり、平均気温の上昇は、夜間気温の上昇のみによつて、説明せられることになる。

(京都一八木)の場合は、年平均につき、年々平均気温の上昇率は

$$k_0 = 0.016^\circ\text{C} \quad (1915 \sim 1940)$$

であつて、最低気温の上昇率は

$$k = 0.031^\circ\text{C}/\text{年} \quad 0.4 \frac{d\theta_3}{dt} = 0.012^\circ\text{C}/\text{年}$$

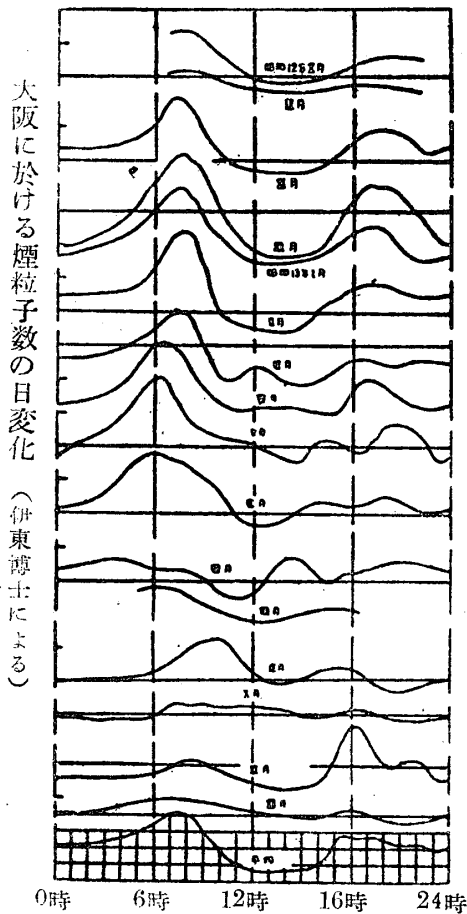
であるから、この場合も、夜間気温の上昇により、平均気温の上昇の80%までは説明出来る。

扱、上に述べた如く、都市高温化の原因は、全部ではないにせよ、夜間気温の上昇、即ち、霧煙質に因る夜間輻射の減少によつて説明出来た。上に述べた如く平均気温の上昇は、大部分夜間気温の上昇によつて説明出来るけれども、とも角、或地点の平均気温が上昇するためには、その原因となる熱源か又は熱の過剰状態を作る物理的機構がなければならない。熱源としては太陽からの入射熱及び低緯度から輸送される熱量であるが、太陽熱は、入射の場合煙霧質の存在によつて、妨害を受ける筈であり、又事実都市内に於ける、輻射は減少していることは実測により明らかである。低緯度から移入される熱量は、煙霧質の存在によつて妨害されることなく、これが輻射を妨げられれば、平均気温の上昇の原因となり得る。然し、京都の如き近畿地方の1月気温についても、平均気温の上昇が、認められるのであるが、この場合は、大陸からの寒気流によつて、その地点の熱は奪はれている筈である。平均気温の上昇の機構としては、太陽からの輻射に対する、一種の温室作用とするより外はないと筆者は考えたい。

都市内に於ける、煙粒子量の日変化を見ると、第4図に見らるゝ如く、朝及び夜間に多い。晝間は、上昇気流その他のため煙粒子は、大気中に拡散し、朝夕夜間は濃密になつて地面近くに降下するものと考へられる。冬期は更にこれらが、煙霧化することも併せて考慮すべきであろう。吾々の取扱つた、日本の諸都市の場合では上述の如き機構の下に晝間の入射を妨げる以上に、夜間の出射が妨げられ、熱経済から言えば煙霧質の存在しない場合よりも、差引、Plusになり、平均気温が上昇の原因となるものと考え

(16) Shaw and Owens : The Smoke Problem of Great Cities 1925 (London) P63

(17) 伊東彌自 : 「大阪大気中の塵埃」 P33及びP61.



られる。

5. 結 語

筆者は、都市高温の主原因について、従来吾国の諸学者と、稍々、所見を異にし、都市上空に浮遊する、煙霧質が、最も、重要な役割をなすことを述べた。又今まであまり問題にされなかつた都市気温上昇の飽和性を指摘し、その原因についての若干の考察を試みた。この飽和性

の原因は、大気中の煙霧質量の飽和にあるとしても、それが、一定条件の大気は、一定量以上の煙霧質を懸垂せしめないと思うべきか、又、ある観測点の大気中の煙霧量に作用を及ぼす発煙区域は、その周辺の比較的小面積に限られ、それ以外の都市の発展や工業化は、あまり影響を興えないと、解釈すべきか、断定的結論を興えることが出来ない。この結論のためには一面、又、煙霧質を通しての太陽光線の入射及び夜間輻射の出射等について、猶、綿密な調査や測定が行われることが必要である。全時に又都市の地面の舗装化の影響なども考慮さるべきであらう。

本論文は、既存のデータを整理し、これに若干の理論的考察を加えたのみで、結論の断定に若干徹底を缺くところがあるのは自ら遺憾とする。これらの点は将来逐次解決して行かなければならない。常盤台上から見ると、宇部市街が完く煤煙層に包まれている日が多い。この題目の如き研究には格好の実験場が興えられている訳である。衛生的見地からも、一度この大気の汚染度は、定量的に観測さるべきである。

筆者は、他の仕事の多忙のため、これらのことを果し得ないでいるが、将来、何人によつても、これ等のことが仕遂げられることを切望して止まない。本研究の遂行について、機械科生徒、福田寛充君の御助力を得たことに対して深謝したい。