

論文

赤外線映像装置による地表面温度分布

— 公園緑地周辺 —

宇田川 満 早福 正孝 伊藤 政志

要 旨

大気汚染に係る都市気象に関する研究の一環として、飛行船に赤外線映像装置を搭載した、地表面温度分布調査の結果から、公園緑地周辺について解析を行った。公園内の地表面温度分布では、樹林領域がもっとも低く、以下、芝生領域、沿道、建造物の順に高くなっているが、芝生の表面温度は比較的高く30℃以上に熱せられる。特定条件（調査対象日の気温、日射強度等）の下で、公園周辺市街地の平均気温から、各領域の表面温度を基にして、放散熱量を計算すると、放散熱量はマイナスとなり、気温上昇に対する抑制効果を有する領域は、樹林領域と池の部分である。

樹林領域の単位面積・時間当りの放散熱量は $-63\text{Kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ であり、気温上昇に対する抑制効果は最も大きい。調査対象とした新宿御苑全体の単位時間当りの総放散熱量は $-715.7\text{万Kcal}/\text{h}$ であり、小型ボイラーの16基、自動車の477台分の単位時間当りの排出熱量に相当し、緑地公園についても、気温上昇に対する抑制効果の大きいことが明かとなった。

1 はじめに

都心部への人口、交通網の集中化、高層ビルの過密化、更に地表面のコンクリート等による被覆等の都市化、緑地部の減少、人工発熱量、太陽熱による蓄熱量の増加により、ヒートアイランド現象が顕著に現れてきた。

都市における熱汚染に関して、三上らは、新宿御苑等の公園緑地について、ランドサットデータ解析^{1,2)}、また、公園周辺の気温分布の解析を行っており、本条らは、ランドサットデータから、都市の熱環境に及ぼす影響についての報告など、公園緑地等の温度に関する研究は数多くなされている。^{4,5,6)}^{7,8)}

ここでは、快適な生活環境を確保するための適切な都市計画、緑地対策、大気汚染拡散場の精密な情報を得ることを目的とした、大気汚染に係る都市気象に関する研究の一環として、飛行船に赤外線映像装置（サーモグラフィ）を搭載しての地表面温度分布調査結果から、緑地公園周辺の地表面温度分布について報告する。

2 調査方法

(1) 対象日時

1990年7月5日 午前11時～12時

(2) 飛行船

飛行船（警視庁所有）：ヘリウムガス充填、容積
6,999立方メートル

(3) 飛行コース

飛行高度は300m、飛行速度50km/hで新宿御苑（国立公園）中心に約2.0kmをカバーするように、約100m間隔のライン上を飛行した。

(4) 赤外線映像装置

赤外線映像装置 TVS-7300
（日本アビオニクス社製）

視野の大きさ：78m×54m

最小温度分解能：0.66m×0.66m

（放射率は35℃黒体 $\epsilon=1.00$ ）

地表面温度観測に当たっても $\epsilon=1.00$ に設定した。

(5) 新宿御苑の概要

新宿御苑は副都心から約1.5km東方に位置し、東西に約1km、南北に約0.5kmに広がる。総面積は約583,000㎡の大きさを持つ国立公園である。

園内の西側は樹林に覆われており、東側の中央は芝生

で覆われた広場があり、南側には東西方向に池が連なっている。沿道は砂利道で、園内に網目状に走っている(図1参照)。各々の占める面積は以下のとおりである。

- 芝生 : 198,000㎡
- 樹林 : 200,000㎡
- 池 : 34,000㎡
- 沿道 : 57,000㎡
- 砂利 : 23,500㎡ (駐車場等)
- 建物 : 79,000㎡

3 結果と考察

調査対象日は図2に示すように気圧傾度は緩く、南関東は晴天域に入っており、日射も強く、当環境科学研究所の日射計の測定値は表1に示すように、最高3.12MJ/㎡(13時)に達している。調査対象の11時では2.74, 12時では2.87を記録している。また、調査当日は都立大学理学部地理学科との共同調査として、公園内に8箇所、外周部に4箇所、温度計を地上1.5mに設置し、連続気温分布の調査を行っている。

(1) 熱映像の解析結果

熱映像については、位置及び地表の状態を確認するため、ビデオカメラを用いて地表を撮影した。

新宿御苑周辺について250枚の熱画像を収録し、解析を行った。

ア 公園内の地表面温度分布 (樹林領域)

公園内の地表面温度分布をみると、樹木が密集している領域では、日の当たる度合によって若干温度の差が見られる。代表的な熱画像について、表面温度分布を見ると、樹林の表面温度は樹木の樹葉の形状、種類、太陽光の当たり方によって若干異なっており、25.5℃~30.5℃である。平均的には、同時刻のこの領域での平均気温27.5℃よりやや高い程度である。

対象日の公園外の市街地気温は、測定場所によってかなりの差がみられるが、平均気温は29.5℃程度である。

公園周辺市街地の平均気温と地表面温度を基に、樹林領域の単位面積・時間当たりの放散熱量(以降放散熱量)を計算すると、高樹木が密集している所では、-14Kcal

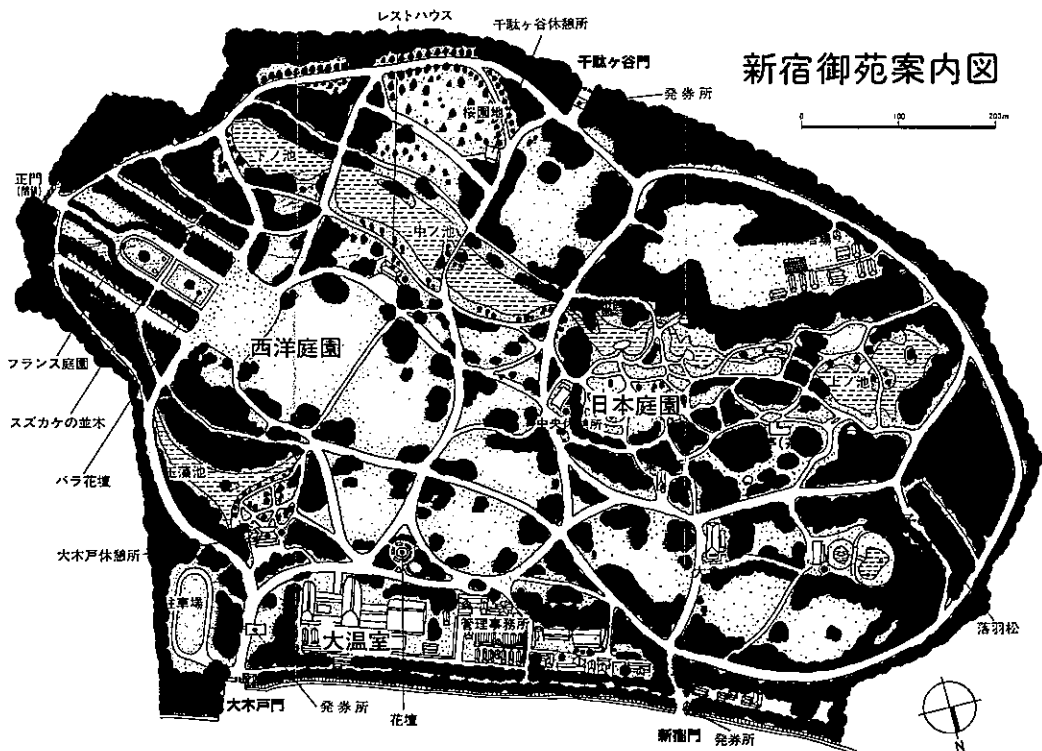


図1 新宿御苑概要図

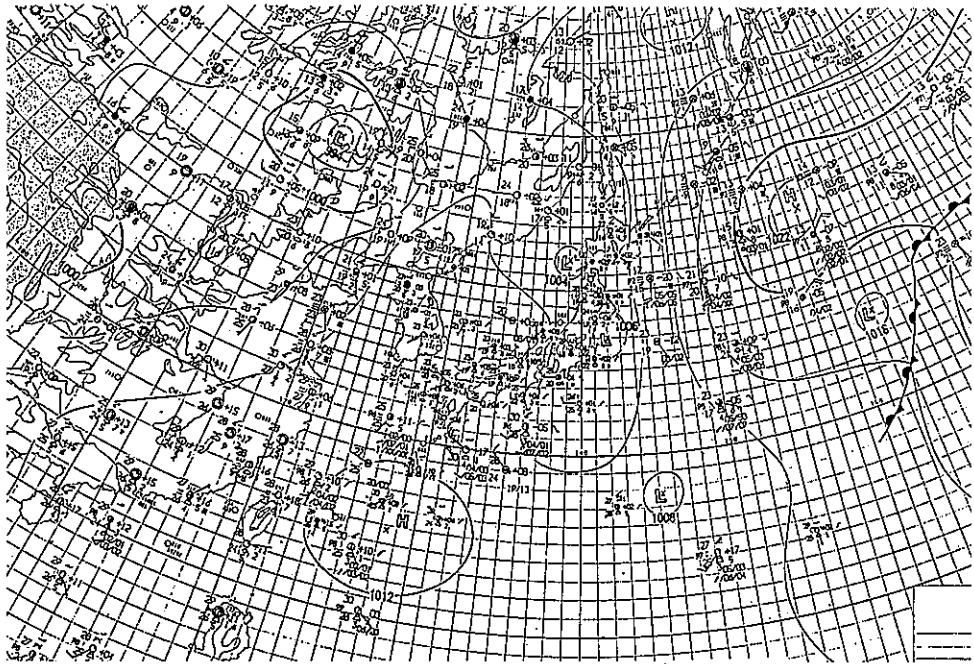


図2 天気図 (1990年7月5日 9時)

表1 日射量 (7月)

	MJ/m ²		
	4日	5日	6日
9時	0.60	1.28	1.24
10時	0.78	1.75	2.18
11時	0.47	2.74	2.35
12時	1.37	2.87	3.00
13時	0.94	3.12	2.82
14時	0.34	2.82	2.61

1990年 環境科学研究所 屋上

／m²・hであり、比較的表面温度の高い樹林部でも、-5 Kcal/m²・hである。平均的には-10Kcal/m²・h程度となり、直射日光を浴びていても気温上昇に対してマイナスの要因となっていることが分かる。代表的な熱画像、表面温度を図3、表2に示す。なお、放散熱量の計算は次式*による。

(芝生領域)

一方、芝生で覆われている領域での地表面温度は、芝生の活性度によって差がみられ、32.5℃~34.5℃であり、

芝生の部分は太陽の直射光によって、かなり表面温度が上昇することが分かる。従って、芝生領域での同時刻の気温は、芝生表面からの熱気によって高くなり、場所によって異なるが、30.2℃~32.9℃である。

* 放散熱量計算

- (1) 物体表面から大気中に放散される熱量 (q₁) (放散熱量)

$$q_1 = \sigma \cdot \epsilon (T_0^4 - T_a^4) \text{ [Kcal/h} \cdot \text{m}^2] \dots\dots \text{①式}$$

q₁ : 単位面積 (m²) からの放散熱量

σ : スファン・ホルツマンの定数

$$4.88 \times 10^{-8} \text{ [Kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{k}^4]$$

ε : 放射率

T₀ : 物体表面の絶対温度 [° K]

T_a : 物体から離れた大気温度 [° K]

- (2) 大気との自然対流により物体表面から持ち去られる熱量 (q₂) (自然対流伝達熱量)

$$q_2 = Hm (t_0 - t_a) \text{ [Kcal/h} \cdot \text{m}^2] \dots\dots \text{②式}$$

q₂ : 単位面積 (m²) から持ち出される熱量

表2 地表面温度分布
(新宿御苑：樹林)

No.	°C	No.	°C
1	26.5	16	28.5
2	26.5	17	28.5
3	29.5	18	27.5
4	27.5	19	27.5
5	25.5	20	25.5
6	26.5	21	29.5
7	26.5	22	29.5
8	26.5	23	30.5
9	27.5	24	28.5
10	28.5	25	26.5
11	28.5	26	27.5
12	26.5	27	29.5
13	28.5	28	28.5
14	26.5	29	27.5
15	27.5	30	28.5

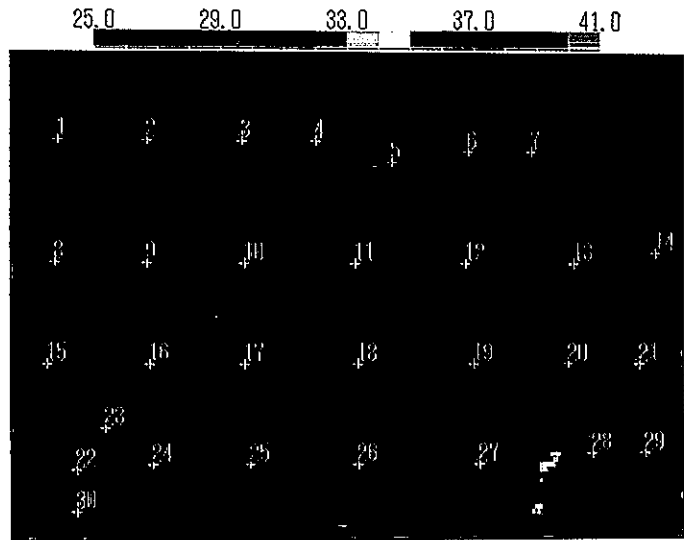


図3 赤外線熱画像(新宿御苑・樹林)

Hm : 平均自然対流熱伝達率 [Kcal/h・m²・°C]
 t_o : 物体表面の温度 [°C]
 t_a : 物体から離れた大気温度 [°C]

(3) 平均自然対流熱伝達率 (Hm)

$$Hm = hm (t_o - t_a)^{1/3}$$

$$= 1.173 (t_o - t_a)^{1/3} \dots\dots\dots \textcircled{3} \text{式}$$

hm : 熱伝達率

(4) 放散熱量

前項1～3式より

$$q_o = \sigma \cdot \epsilon (T_o^4 - T_a^4)$$

$$+ 1.173 (t_o - t_a)^{1/3} (t_o - t_a)$$

$$= 4.88 \times 10^{-8} \cdot \epsilon \{ (t_o + 273)^4 - (t_a + 273)^4 \}$$

$$+ 1.173 (t_o - t_a)^{1/3} (t_o - t_a)$$

$$\alpha_r = [4.88 \times 10^{-8} \cdot \epsilon \cdot \{ (t_o + 273)^4 - (t_a + 273)^4 \}]$$

$$/ (t_o - t_a)$$

$$\alpha_c = 1.173 (t_o - t_a)^{1/3}$$

とおくと、

$$q_o = (\alpha_r + \alpha_c) \cdot (t_o - t_a) \dots\dots\dots \textcircled{4} \text{式}$$

④式に物体の表面積を乗ざると放散熱量が求められる。

$$Q = (\alpha_r + \alpha_c) \cdot (t_o - t_a) \cdot A \text{ [Kcal/h]}$$

A : 物体表面積 [m²]

樹林領域と同様に外気温29.5°Cを基に放散熱量を計算すると、荒れた芝生では28.1Kcal/m²・h、良好な芝生で

は、19.4Kcal/m²・hであり、平均的には22Kcal/m²・h程度の熱量を放出していると思われる。なお、芝生内の灌木の表面温度は29.5°Cであり、芝生より低い値である(図4、表3参照)。

(その他の領域)

樹林領域、芝生領域以外では、砂利で覆われた沿道、池、建物がある。直射日光の当たるこれらの表面温度をみると、35°C～41°Cであり、放散熱量を計算すると、48 Kcal/m²・hに達する。

園内にはすずかけの並木がある。この並木はすずかけの木が密に2列に並んでいる。並木の表面温度は26.5°C程度であり、樹間の日の当たる部分は極めて少ないが、地表面の温度は31°C程度である。並木の気温に対する効果をみるために、放散熱量を計算すると、この帯状の放散熱量は、-12.4Kcal/m²・hであり、樹林領域と変わらない値である(図5、表4参照)。

イ 市街地の地表面温度分布

新宿御苑周辺の市街地は、新宿御苑内の温度に計測範囲を設定しているため、市街地の建造物の表面温度の測定に適さないため、市街地については、温度計測範囲を広げ、120画像を撮影した。高層で規模の大きいビル街では映像視野が狭くなり、2～3のビルに限られてしまうため、都心部の高層ビル街を避けて、低層の建造物が密集している墨田区周辺について解析を行った。

表3 地表面温度分布
(新宿御苑：芝生)

No.	℃	No.	℃
1	34.5	16	33.5
2	34.5	17	33.5
3	33.5	18	32.5
4	34.5	19	33.5
5	32.5	20	33.5
6	32.5	21	33.5
7	33.5	22	33.5
8	33.5	23	33.5
9	34.5	24	32.5
10	33.5	25	33.5
11	33.5	26	33.5
12	33.5	27	33.5
13	34.5	28	34.5
14	32.5	29	34.5
15	32.5	30	35.5

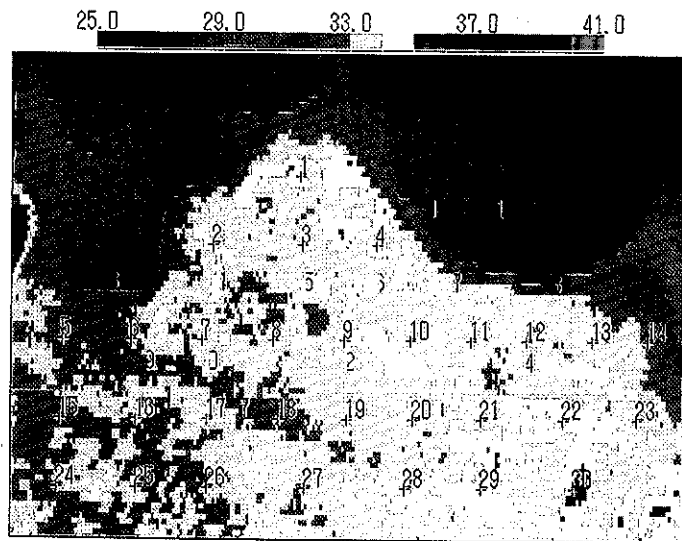


図4 赤外線熱画像(新宿御苑・芝生)

表4 地表面温度分布
(新宿御苑：並木)

No.	℃	No.	℃
1	29.5	16	32.5
2	35.5	17	31.5
3	30.5	18	30.5
4	25.5	19	40.5
5	25.5	20	36.5
6	33.5	21	30.5
7	31.5	22	34.5
8	32.5	23	31.5
9	31.5	24	26.5
10	36.5	25	36.5
11	40.5	26	33.5
12	28.5	27	37.5
13	31.5	28	34.5
14	27.5	29	36.5
15	35.5	30	25.5

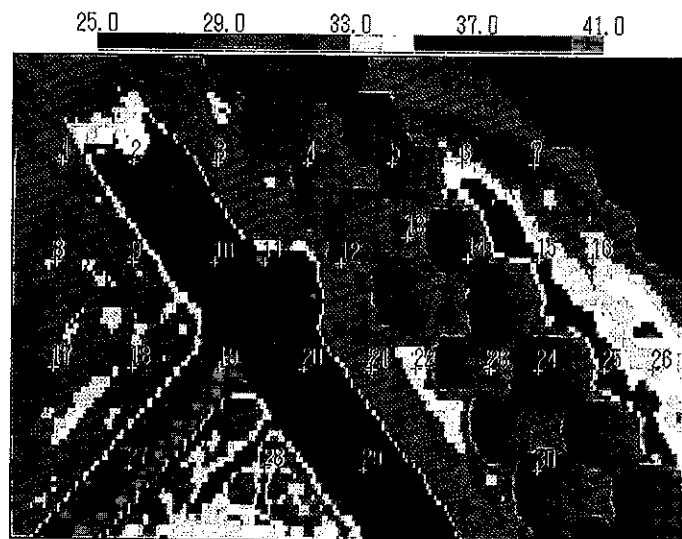


図5 赤外線熱画像(新宿御苑・並木)

市街地の地表面温度は建物構造、材質によってかなり異なり、40℃から50℃程度である。また、材質によっては、50℃を越えているものもある(図6、表5参照)。建造物と建造物の間の地表面温度は、日陰となる場合が多く、35℃程度と建造物より低い。また、建造物の境界に植物が植えられている場合には、更に低く30℃以下となり、植物の気温上昇に対する抑制効果が伺える。

道路の表面温度についてみると、比較的広い一般道路

では建造物より低く40℃程度である。高速道路については、一般道路よりやや低くなっている。いずれにしても、自動車道路は車が走行するため直射日光の影響が若干減るためと思われる。なお、走行している車の表面温度は50℃程度に達している。

道路際の比較的大きい街路樹の表面温度は27.5℃と低い温度であり、樹間の温度も低く、ベルト状の低温部が作られるが、規模の小さい街路樹では30℃程度で、樹間

表5 地表面温度分布
(市街地：墨田)

No.	℃	No.	℃
1	37.0	16	35.0
2	31.0	17	39.0
3	51.0	18	35.0
4	47.0	19	45.0
5	37.0	20	29.0
6	35.0	21	29.0
7	35.0	22	31.0
8	35.0	23	39.0
9	45.0	24	43.0
10	49.0	25	49.0
11	53.0	26	39.0
12	29.0	27	33.0
13	35.0	28	41.0
14	33.0	29	41.0
15	45.0	30	35.0

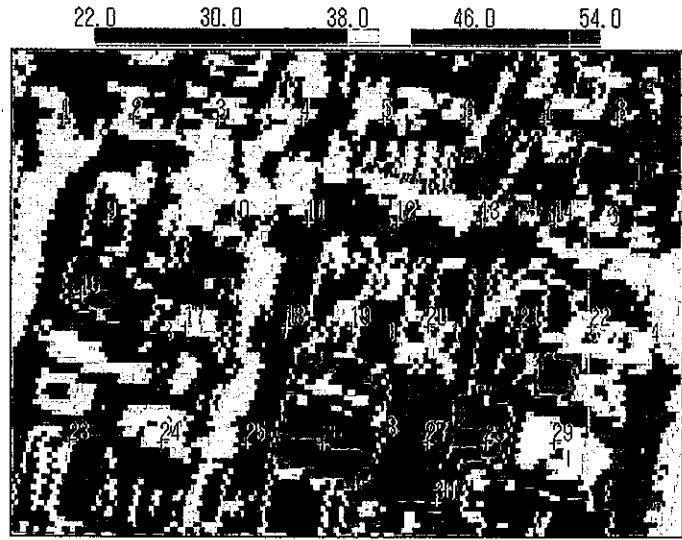


図6 赤外線熱画像（新宿御苑・墨田）

の温度は道路と同程度である。

市街地での放散熱量については、建造物の密集の程度、緑地の有無、道路の状況等によってかなり異なる。市街地での放散熱量を建造物の側面を考慮せず、地表面温度と平均気温だけを対象にして、市街地の平均気温30.0℃として計算すると、ある程度の緑地があるエリアでは、40Kcal/m²・hであるが、道路を有し建造物が密に立ち並んでいるエリアでは、52~58Kcal/m²・hの熱量を放散している。

(2) 新宿御苑内の放散熱収支の推定

赤外線映像装置によって撮影された熱画像は、飛行高度300mで、標準レンズを使用しているため、1画像の面積(78×54m)が小さく、風により飛行予定コース通りに飛行することが難しいこと等から、御苑全域の地表面温度分布図の作成にまで至らなかった点、日陰部分の把握についても十分とはいえない等の不確定要素がかなりある。また、地表面温度は日射の強さによって左右され、気温についても同じ日射量でも異なっているが、これ等の条件を調査対象日に限定して、試みに新宿御苑内の放散熱収支の推定計算を行った。

(樹林領域)

図1に示すように配置されている、樹木領域200,000m²については、平均的な単位面積・時間当たりの放散熱量を-10Kcal/m²・hとすると、単位時間当たりの放散熱

量は-200万Kcal/hとなる。

新宿御苑の樹木は、クヌギ、コナラ等を多く含む雑木林である。そこで、樹木領域の葉面積指数(全葉面積/平面葉面積)を5とし、葉面温度を熱画像による樹木領域の平均温度27.5℃とすると、葉の占める面積は、5倍となり、樹木による単位時間当たりの総放散熱量は、-1,000万Kcal/hとなる。

更に、樹木による日陰の部分も、この領域の平均気温と同じ27.5℃とみなして、放散熱量を算出すると-13Kcal/m²・hとなり、この値から単位時間当たりの放散熱量を算出すると、-260万Kcal/hとなる。

この結果、樹木領域の単位時間当たりの総放散熱量は-1,260万Kcal/hとなり、単位面積・時間当たりの放散熱量は-63Kcal/m²・hとなる。

(芝生領域)

芝生領域では、198,000m²のうち約10%が樹木によって直射日光が遮られるとして、180,000m²について、平均の放散熱量22Kcal/m²・hとして単位時間当たりの放散熱量計算すると、396万Kcal/hとなる。日影の部分18,000m²では、-23.4万Kcal/hとなる。

したがって、この領域での単位時間当たりの総放散熱量は372.6万Kcal/hなり、単位面積・時間当たりの放散熱量は18.8万Kcal/m²・hとなる。

(池の領域)

面積が34,000㎡の池については、実測値から、水面の平均温度を24.6℃として、単位面積・時間当り放散熱量を計算すると-31.6Kcal/㎡・hとなる。この値から池の単位時間当りの放散熱量を計算すると、-107.4万Kcal/hとなる。

(その他の領域)

建造物、沿道については、約50%が日陰となるとすると、79,750㎡が単位面積・時間当り放散熱量の48Kcal/㎡・hを持つエリアとなり、単位時間当りの放散熱量は382.8万Kcal/hであり、日陰の部分では-103.7万Kcal/hとなる。

この領域での単位時間当りの総放散熱量は279.1万Kcal/hとなり、単位面積・時間当りの放散熱量は17.5Kcal/㎡・hとなる。

これ等、各領域の単位時間当りの放散熱量を合計すると、新宿御苑全域の単位時間当りの放散熱量は-715.7万Kcal/hとなり、単位面積・時間当り放散熱量は、-12.3Kcal/㎡・hとなる。

以上、各領域での単位時間当りの総放散熱量をまとめると次のとおりとなる。

	放散熱量 Kcal/㎡・h	総放散熱量 Kcal/h × 10 ⁴
樹林領域	-63.0	-1,260.0
芝生領域	18.8	372.6
池の領域	-31.6	-107.4
その他	17.5	279.1
公園全体	-12.3	-715.7

この値を地表面温度と平均気温だけを対象にして算出した単位面積・時間当りの55Kcal/㎡・hの放散熱量を有する一般的市街地の面積に換算すると約130,000㎡となり、公園内の樹林面積の約65%に相当する。したがって、1km²の市街からの放散熱量に相当する緑地面積は、0.65km²となる。

この結果から、比較的高温に熱せられる芝生の面積が、樹林部分とほぼ同程度である公園でも、日射による気温上昇に対する抑制効果はかなりあるものと思われる。

以上、各領域での単位時間当りの総放散熱量の推定計算を行ったが、周辺市街地の平均気温に対してマイナスの放散熱量となる領域は樹林領域と池の部分であり、特に樹林領域の公園内のクールアイランドの形成、都市の

ヒートアイランド化に対する抑制効果の大きいことが伺える。

(4) 人工熱排出源との比較

先に記述したように、特定の気象条件（調査対象日の気温、日射強度等）に限定されているが、太陽の直射による地表面の温度の上昇による放散熱量と人工熱排出源の排出熱量との対応、緑地等の気温上昇に対する抑制効果をみるため、主な人工熱排出源の排出熱量との比較を行った結果を示す。

各々の発生源の排出熱量を燃料の燃焼熱量から時間当たりの排出熱量の概算値を算出すると、重油の燃焼熱量を9,000Kcal/ℓ、一般的なビルが所有するボイラーについては、重油使用量を50ℓ/h、自動車については、ガソリンの燃焼熱量を7,300cal/ℓ、車速30km/h、燃費10km/ℓとし、熱効率を30%として、単位時間当りの排出熱量を計算すると次のようになる。

ボイラー	45.0万Kcal/h
自動車	1.5万Kcal/h

これらの値と太陽熱による地表面温度と周囲気温から算出した放散熱量とを、一概に比較することはできないが、目安として単純に比較すると次のようになる。

なお、市街地の平均的値としての放散熱量を55Kcal/㎡・h、樹林領域を-63Kcal/㎡・h、御苑の総放散熱量を-715.7万Kcal/hとした。

ボイラー1基の排出熱量は市街地の8,181㎡の面積から放散される熱量に相当し、気温上昇に対して抑制方向に作用する樹林の必要面積は、7,142㎡となる。

新宿御苑の単位時間当りのマイナスの総放散熱量は、16基のボイラーの排出熱量に相当する。同様に自動車について計算してまとめると次のようになる。

	市街地	樹林	新宿御苑
ボイラー	8,181㎡	7,142㎡	16基
自動車	273㎡	238㎡	477台

以上の結果から、気温上昇に対して抑制作用のある緑地を確保するとともに、大規模な緑の増大計画が必要と思われる。

4 まとめ

以上、調査対象日の気温、日射強度等の条件に限定されているが、飛行船に赤外線映像装置を搭載しての地表面温度分布調査の主な結果をまとめると、次のようにな

る。

(1) 公園内の地表面の温度分布は、水面、樹林、芝生、砂利道、建造物の順に高く、公園内の気温分布と一致している。樹林領域では、25.5～30.5℃であるのに対し、芝生領域の温度は比較的高く30～34.5℃に達する。

(2) 市街地の地表面の温度分布は、建造物の密集の度合、形状によって異なり、40～50℃程度である。一般道路は、建造物より低く、40℃程度である。市街地の比較的大きい街路樹の温度は低く、ベルト状に28℃程度の低温域を作っている。

(3) 公園内の地表面温度分布と公園周辺市街地の平均気温(29.5℃)から放散熱量を求めると、樹林領域では、葉面積指数を5とし、日陰の部分を考慮して算出すると、 $-63\text{Kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ となる。同様に、芝生では $18.8\text{Kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 、池では $-31.6\text{Kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 、その他の領域では $17.5\text{Kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ であり、公園全体の時間当たりの総放散熱量は $-715.7\text{万Kcal}/\text{h}$ となり、気温上昇に対する抑制効果は大きい。

(4) 市街地での地表面温度か放散熱量は、平均気温を30℃として算出すると、建造物が立ち並んでいるエリアでは $52\sim 58\text{Kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ である。

(5) 以上の結果から、1km²の市街地の地表面温度からの放散熱量に相当する気温上昇に対して、抑制方向に作用する樹林面積は、0.65km²となる。

(6) 単純に地表面温度と熱発生源との対比をみると、重油を50ℓ/h使用するボイラー1基の排出熱量に対して、気温上昇に対して抑制方向に作用する樹林の必要面積は7,142m²となり、新宿御苑規模の公園のマイナス総放散熱量は、16基のボイラーの排出熱量に相当する。同様に自動車1台では、238m²の樹林面積、公園は477台の自動車の排出熱量に相当する。

以上のことが明らかとなったが、都市化に伴う熱汚

染に対しては、快適な生活環境を確保するために、計画的かつ、大規模な緑化対策の推進が望まれる。

先に記述したように、本解析結果については、不確定要素が多々あり、問題点が多く残されているが、今後は、赤外線映像装置に広角レンズを取り付け、地上の気温調査と並行してきめ細かい調査を行ない、地表面温度と気温との関係について検討を加えたい。おわりに、この観測に際して協力をいただいた、警視庁航空隊の各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松本 淳ら：最近の東京における都市気温分布の変化について、東京都環境科学研究所年報, p.11-17 (1990).
- 2) 三上岳彦ら：ランドサットTM熱バンド情報の利用, 国土情報利用の高度化に関する研究 特別研究(1) 62 1124038 (1988).
- 3) 三上岳彦：都市内部における公園緑地の気候, お茶の水女子大学人文科学紀要, p.21 (1982).
- 4) 本条 毅ら：緑地が都市熱環境に及ぼす影響(1) 実測に基づく熱収支の解析, 農業気象 (J.Agr.Met) 40 (3), p.257-261 (1984).
- 5) 本条 毅ら：緑地が都市熱環境に及ぼす影響(2) リモートセンシングによる緑地の抽出と表面温度の解析, 農業気象 (J.Agr.Met) 43 (1), p.31-36 (1987).
- 6) 本条 毅ら：リモートセンシングによる都市内緑地の温度分布の解析, 造園雑誌 49 (5), p.301-304 (1986).
- 7) 土屋 巖：緑地と都市気象—都市における自然緑地人工緑地, 河川等の熱的特性, 水利科学, 16, p.26-56 (1972).
- 8) 土屋 巖：NOAA-9 AVHRRによる都市ヒートアイランドの検出, 天気 29, p.81-83 (1982).