

# 建物における蓄熱の数値実験\*

榊原保志\*\*

## 要旨

建物の蓄熱の特性を知ることはヒートアイランド形成の原因解明において重要である。それゆえ、本研究では一辺 1 m の正方形モデルを考え、二次元的にこの建物の熱収支を計算した。それは単純な建物の方が建物のいろいろなパラメーターの解析がしやすいからである。その結果、熱伝導率は大きいほど、日射の吸収量は大きく、夕方の熱放出量も多い。定積比熱は多くなればなるほど、日射をよく吸収し、夜間多くの熱を放出する。アルベドは大きくなればなるほど日射を余り吸収しなくなり、夜間の放出量も小さくなる。また、外を吹く風が弱まると日射をよく吸収し、夜間よく熱を放出するようになる。季節による違いは夜間放出する熱フラックスの値では差はない。ただし、日没後のピーク時の値では1月が大きい。構成物質の違いではコンクリートが日射をよく吸収し、夜間熱を多く放出していた。

## 1. まえがき

都市域がその周辺の郊外と比べ高温になるヒートアイランド現象とその形成原因は多くの人々によって研究されてきた。そしてヒートアイランド形成の原因はいくつか考えられている。その諸原因の一つに都市を構成する物質の熱特性が郊外のそれと異なることがあげられる。つまり、都市や郊外を構成する物質が日中に日射を吸収し、その熱を夜間放出し、まわりの大気を暖めることにより、その差がヒートアイランド現象の形成をさせるからである。本研究ではこれを都市の蓄熱効果と呼ぶことにする。都市域の道路はアスファルトで舗装され、建物は木造から鉄筋コンクリート造へと移り変わっている。さらに、建物は高層化し、単位面積当りの熱容量も増加している。それゆえ、都市域ではますます蓄熱効果が強くなり、夜間の高温化が進むと考えられる。

河村(1964)は Brunt の夜間冷却の式を用いて都市構成物質の熱的性質  $1/c\rho\sqrt{k}$  の値を見積り、無風時の市街地の気温との間に逆相関的分布関係があることを指摘した。この研究では土地利用図から家屋・道路・空き地などの面積を計測し、道路はアスファルト・コンクリート・無舗装に分け、屋根はすべて瓦・スレートとし、

空き地は土壌とし、各々の構成物質の  $c$ ,  $\rho$ ,  $k$  の値を代入する方法を取っている。しかし、蓄熱効果を見積るという観点からすれば、建物の場合に屋根の構成物質で置き換えることは妥当な方法ではない。建物の中で屋根の瓦が占める割合は小さいので、建物における屋根の代表性は小さいと考えられるからである。

また、一般に都市を構成する物質といっても物理的に都市のどの構成部分を指しているのか明確になっていない。

以上のことから、本研究では都市を構成するものの中で大きな割合を占めるものを建物と考え、二次元建物モデルにおいて、建物を構成する物質の比熱、熱伝導率とアルベド、そして屋外の風速や設定する季節を変えることにより、それらの蓄熱効果に対する感度解析を行ったので、その結果をここに報告する。

## 2. 建物における蓄熱と放熱のメカニズム

簡単のため壁が濡れていない時の壁面の熱収支を考える(第1図)。外壁を通過する熱流  $q$  は正味日射  $K^*$  と正味の長波放射  $L^*$  の和から顕熱  $Q_H$  を引いたものであるので、

$$q = K^* + L^* - Q_H \quad (1)$$

とする。ここで、正味の短波放射  $K^*$  は

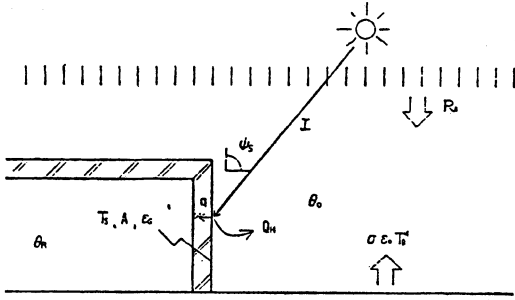
$$K^* = (1 - A)I \quad (2)$$

\* Numerical study of heat storage in a building.

\*\* Yasushi Sakakibara, 東京都中央区立佃中学校。

—— 1987年8月10日受領 ——

—— 1989年4月17日受理 ——



第1図 建物周囲の熱放射環境

- $R_a$  : 下向きの長波放射量
- $I$  : 全日射量
- $\Psi_S$  : 壁面における天空比
- $T$  :  $\theta$  の絶対温度
- $\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数
- $\epsilon_0$  : 地面および周辺建物の長波放射率
- $\theta_0$  : 外気温 (地表面温度も同じ)
- $T_S$  : 建物の表面温度
- $A$  : 建物表面のアルベド
- $\epsilon_S$  : 建物表面の長波放射率
- $\theta_R$  : 室温
- $q$  : 壁にはいる熱フラックス
- $Q_H$  : 顕熱フラックス

である。ここで  $I$  は壁に入射する全日射量,  $A$  は壁のアルベドである。

壁面に入射する正味の長波放射  $L^*$  は天空からの長波放射と地面やまわりの木, 建物からの長波放射の和と考えられる。ここで, 壁面における天空率を  $\Psi_S$  とすると, 正味の長波放射  $L^*$  は

$$L^* = \Psi_S \epsilon_S R_a + (1 - \Psi_S) \sigma \epsilon_0 \epsilon_S T_0^4 - \sigma \epsilon_S T_S^4 \quad (3)$$

になる。ここで  $R_a$  は天球からの下向きの長波放射で天空の角度によらず一定と仮定 (簡単化のため大胆な仮定),  $\epsilon_S$  は壁の長波放射率,  $\sigma$  はステファン・ボルツマンの定数,  $\epsilon_0$  は地面および周辺建物の長波放射率,  $T_0$  は地面および周辺建物の表面温度,  $T_S$  は建物の外表面温度とする。ここで簡単のため  $\epsilon_0 = 1$  とすると

$$L^* = \Psi_S \epsilon_S (R_a - \sigma T_0^4) + \alpha_R (T_0 - T_S) \quad (4)$$

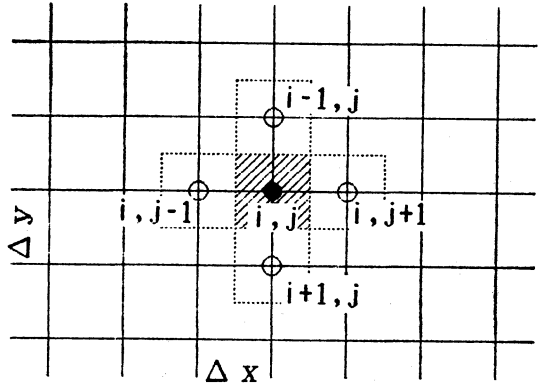
となる。ただし,  $\alpha_R = \sigma \epsilon_S (T_0^3 + T_0^2 T_S + T_0 T_S^2 + T_S^3)$  とした。

次に顕熱  $Q_H$  は建物の外表面温度  $T_S$  と外気温  $\theta_0$  の差に比例するので,

$$Q_H = \alpha_c (T_S - \theta_0) \quad (5)$$

と表される。ただし,  $\alpha_c$  は対流熱伝達係数である。

したがって, (1) 式は (4), (5) 式を用いて変形すると次のようになる。



第2図 温度分布を計算しようとする平面の格子点

$$q = (1 - A)I - \Psi_S \epsilon_S R + \alpha_0 (\theta_0 - \theta_S) \quad (6)$$

ただし,  $R = \sigma T_0^4 - R_a$  とし, また  $T_0$  は  $\theta_0$  の絶対温度であることを考慮し, さらに  $\alpha_0 = \alpha_R - \alpha_c$  とした。 $\alpha_0$  は表面熱伝達率と呼ばれ, 実験的に求められている (斉藤, 1974)。

### 2.1 壁体内部の熱流

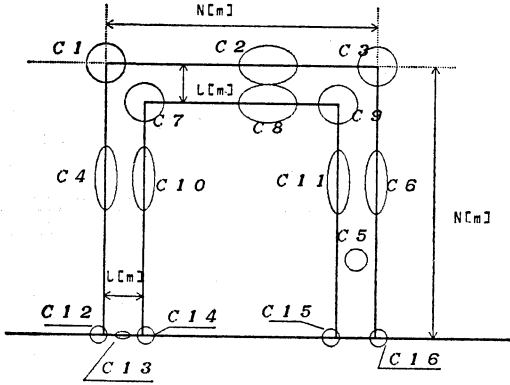
壁体内は流体ではないので, 物質自体は移動せず, 高温の分子から低温の分子へと熱エネルギーが伝わる。本研究ではとりあえず二次元のモデルを考えることにし, その場合の熱伝導方程式は次式により表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{C\rho} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

ただし,  $\lambda$  は熱伝導率,  $C$  は比熱,  $\rho$  は密度とする。この式の解析解は複雑であり, 実際に計算する際は電子計算機に頼らざるを得ない。しかも, 長方形, 直方体など整った形状のものについてのみ求めることが可能であり, 一般に建築部材のように凹凸や隅部を持つものについて, これを求めることは不可能である (小原, 1974)。したがって, 本研究では偏微分方程式を差分化した形の弛緩法で計算を行うことにした。

まず温度分布を計算しようとする平面を格子状に分割する (第2図)。格子点  $(I, J)$  を中心とするブロック (斜面部分) の温度を点  $(I, J)$  の温度で代表させる。ある時刻におけるこの温度を  $\theta_{i,j}(t)$  で表すと,  $\Delta t$  時刻後の温度  $\theta_{i,j}(t + \Delta t)$  は以下のように求められる。第2図の紙面に垂直な方向の厚みを 1 m として隣接する各ブロックからブロック  $(I, J)$  へ流入する熱量  $Q_{i,j}$  は

$$Q_{i,j} = \lambda \Delta t \left\{ \frac{\Delta x}{\Delta y} (\theta_{i-1,j}(t) - \theta_{i,j}(t)) \right\}$$



第3図 二次元建物モデル

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\Delta x}{\Delta y} (\theta_{i+1,j}(t) - \theta_{i,j}(t)) \\
 & + \frac{\Delta y}{\Delta x} (\theta_{i-1,j}(t) - \theta_{i,j}(t)) \} \quad (8)
 \end{aligned}$$

となる。また、 $\Delta t$  時間内に生ずるブロック  $(I, J)$  の温度上昇  $\Delta \theta_{i,j}$  は

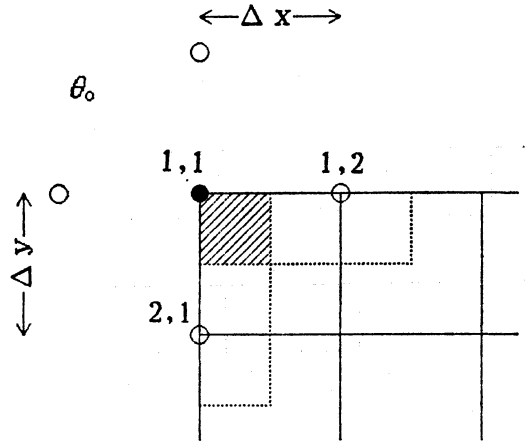
$$\Delta \theta_{i,j} = \theta_{i,j}(t + \Delta t) - \theta_{i,j}(t) = \frac{Q_{i,j}}{C_p \Delta x \Delta y} \quad (9)$$

上の両式より

$$\begin{aligned}
 \theta_{i,j}(t + \Delta t) &= \theta_{i,j}(t) + \frac{\lambda \Delta t}{C_p} \left[ \frac{1}{(\Delta x)^2} (\theta_{i,j-1}(t) \right. \\
 & + \theta_{i,j+1}(t)) + \frac{1}{(\Delta y)^2} (\theta_{i-1,j}(t) + \theta_{i+1,j}(t)) \\
 & \left. - 2 \left\{ \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta x)^2} \right\} \theta_{i,j}(t) \right] \quad (10)
 \end{aligned}$$

となる。このような方法で厚さ  $L$ (m) の壁を持つ一辺  $N$ (m) の正方形で、地面とモデルの熱交換はないと仮定して、16個の熱収支のケースを考えた(第3図)。まず、ケース1について考える(第4図)。隣接するブロックからブロック(1, 1)に流入する熱量  $Q_{1,1}$  は(6)式と(8)式を用いて、さらにブロック(1, 1)からの方位も考えて

$$\begin{aligned}
 Q_{1,1} &= \lambda \Delta t \left[ \frac{\theta_{2,1}(t) - \theta_{1,1}(t)}{\Delta y} \frac{\Delta x}{2} \right. \\
 & + \frac{\theta_{1,2}(t) - \theta_{1,1}(t)}{\Delta x} \frac{\Delta y}{2} \left. \right] + \Delta t [(1-A)I_S(t) \\
 & - \Psi_{s\epsilon_s} R(t) + \alpha_0 (\theta_0(t) - \theta_{1,1}(t))] \frac{\Delta y}{2} \\
 & + \Delta t [(1-A)I_H(t) - \Psi_{\epsilon_s} R(t) + \alpha_0 (\theta_0(t) \\
 & - \theta_{1,1}(t))] \frac{\Delta x}{2} \quad (11)
 \end{aligned}$$



第4図 出隅部の格子点

ただし、 $\Psi$  は屋根面における天空率とし、 $I_H$  と  $I_S$  は屋根面と南壁面における全天日射量である。また、外気温は建物の周りの地点にかかわらず一定とした。

次に、 $\Delta t$  時間内に  $Q_{1,1}$  の熱が流入し、ブロック(1, 1)が  $\Delta \theta_{1,1}$  温度上昇したとして、

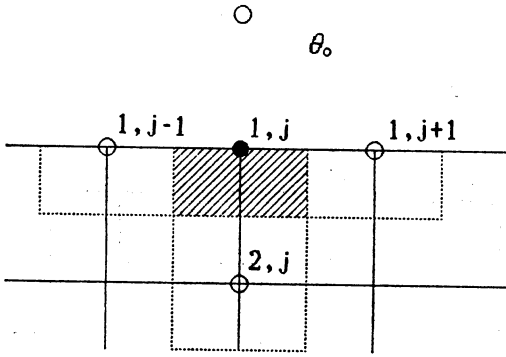
$$\Delta \theta_{1,1} = \theta_{1,1}(t + \Delta t) - \theta_{1,1}(t) = \frac{Q_{1,1}}{C_p \frac{\Delta x}{2} \frac{\Delta y}{2}} \quad (12)$$

となる。上の両式より

$$\begin{aligned}
 \theta_{1,1}(t + \Delta t) &= \theta_{1,1}(t) + \frac{2\lambda \Delta t}{C_p} \left[ \frac{\theta_{1,2}(t)}{(\Delta x)^2} \right. \\
 & + \frac{\theta_{2,1}(t)}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{\lambda} \{ (1-A)I_S(t) - \Psi_{s\epsilon_s} R(t) \\
 & + \alpha_0 \theta_0(t) \} \frac{1}{\Delta x} + \frac{1}{\lambda} \{ (1-A)I_H(t) - \Psi_{\epsilon_s} R(t) \\
 & + \alpha_0 \theta_0(t) \} \frac{1}{\Delta y} - \left\{ \frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} \right. \\
 & \left. + \frac{\alpha_0}{\lambda} \left( \frac{1}{\Delta x} + \frac{1}{\Delta y} \right) \right\} \theta_{1,1}(t) \left. \right] \quad (13)
 \end{aligned}$$

となる。ただし、 $\alpha_0$  は表面熱伝達率とする。次にケース2を考える(第5図)。隣接する各ブロックからブロック(1,  $J$ )へ流入する熱量  $Q_{1,J}$  はケース1と同様にして

$$\begin{aligned}
 Q_{1,J} &= \lambda \Delta t \left\{ \frac{\theta_{1,j+1}(t) - \theta_{1,j}(t)}{\Delta x} \frac{\Delta y}{2} \right. \\
 & \left. + \frac{\theta_{1,j-1}(t) - \theta_{1,j}(t)}{\Delta x} \frac{\Delta y}{2} \right.
 \end{aligned}$$



第5図 屋根面における格子点

$$\left. \begin{aligned}
 & + \frac{\theta_{2,j}(t) - \theta_{1,j}(t)}{\Delta y} \Delta x \} \\
 & + \Delta t [(1-A)I_H(t) - \Psi \epsilon_S R(t) \\
 & + \alpha_0(\theta_0(t) - \theta_{1,j}(t))] \Delta x
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

となる。ここで、 $\Delta t$  時間内に生ずるブロック (1, J) の温度上昇  $\Delta\theta_{1,J}$  は

$$\Delta\theta_{1,J} = \theta_{1,J}(t + \Delta t) - \theta_{1,J}(t) = \frac{Q_{1,j}(t)}{C_p \Delta x \frac{\Delta y}{2}} \quad (15)$$

上の両式より

$$\begin{aligned}
 \theta_{1,j}(t + \Delta t) &= \theta_{1,j}(t) \\
 & + \frac{2\lambda \Delta t}{C_p} \left[ \frac{\theta_{1,j+1}(t) + \theta_{1,j-1}(t)}{2(\Delta x)^2} + \frac{\theta_{2,j}(t)}{(\Delta y)^2} \right. \\
 & + \frac{1}{\lambda} \frac{1}{\Delta y} \{ (1-A)I_H(t) - \Psi \epsilon_S R(t) + \alpha_0 \theta_0(t) \} \\
 & \left. - \left[ \frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{\alpha_0}{\lambda \Delta y} \right] \theta_{1,j}(t) \right] \quad (16)
 \end{aligned}$$

となる。以下同様にしてケース 3~16を求める。室温は簡単のためどの位置でも同じ値  $\theta_R(t)$  を取るものとし、 $\Delta t$  の時間に流入する熱を  $Q_R(t)$  とすると、 $Q_R(t)$  はケース 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15 から求めた室内に流入する熱の和となる。そこで、 $\Delta t$  の時間に  $Q_R(t)$  の熱が流入したとして

$$\theta_R(t + \Delta t) = \theta_R(t) + \frac{Q_R(t)}{C_a \rho_a (N-L)(N-2L)} \quad (17)$$

ただし  $C_a$  は空気の比熱、 $\rho_a$  は空気の密度とする。

3. 数値実験に用いた気象データと諸条件

気象条件として気温、全天日射量、正味の長波放射量を用いた (第1表)。気温は目黒区役所の屋上 (地上高

第1表 1月の気温、方位別全天日射量、長波放射収支

時刻 h	気温 °C	全天日射量 W/m <sup>2</sup>			長波放射収支 W/m <sup>2</sup>
		水平面	垂直面		
			南	北	
0	1.6	0	0	0	-73
1	1.3	0	0	0	-72
2	1.0	0	0	0	-68
3	0.7	0	0	0	-69
4	0.5	0	0	0	-71
5	0.1	0	0	0	-72
6	-0.2	0	0	0	-71
7	-0.3	2	1	1	-72
8	0.1	113	134	28	-76
9	1.4	259	342	58	-72
10	2.8	373	471	66	-72
11	3.9	405	537	66	-68
12	4.8	448	560	62	-69
13	5.5	400	518	52	-66
14	5.8	309	433	45	-72
15	5.8	201	287	44	-75
16	5.6	85	80	34	-71
17	5.1	0	0	0	-73
18	4.5	0	0	0	-77
19	4.1	0	0	0	-79
20	3.6	0	0	0	-78
21	3.2	0	0	0	-77
22	2.5	0	0	0	-78
23	1.9	0	0	0	-78

15 m) で 1983 年 2 月から 1984 年 1 月に測定された実測値、全天日射量は東京における方位別 (南, 北, 垂直面) の計算値 (齊藤, 1974)、正味の長波放射量は 1974 年の 9 月から 1975 年の 8 月にかけての東京・文京区における齊藤らによる実測値である。なおいずれの値も時刻別の月平均値を用いた。次に、モデルを作るにあたっての設定した仮定や条件を第 2 表にまとめた。以下断らない限り、これらの条件の一部を変化させ、その他の仮定や条件を固定したまま、その条件の熱フラックスに対する影響を考えることにする。

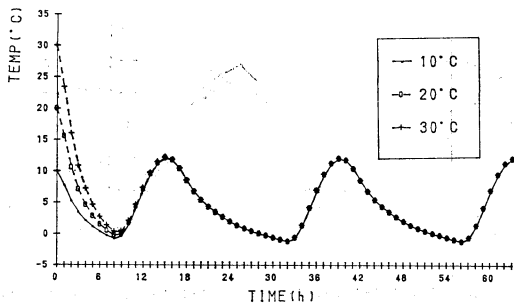
4. 結果

4.1 室温の変化とはじめの室温

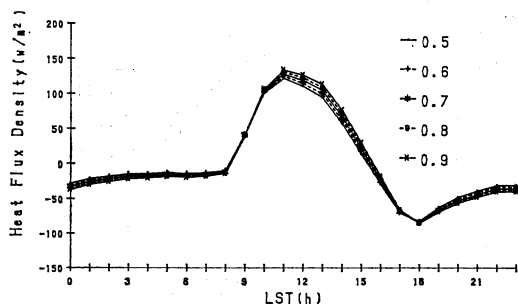
モデルに用いた材質はコンクリートとし、さきに述べ

第2表 実験に用いた基礎条件

a.	地面との熱交換はない。
b.	建物内部の発生熱は0とする。
c.	外気と室内の空気の交換はない。
d.	壁も屋根も同じ物質からできている。
e.	時期は1月とする。
f.	場所は東京とする。
g.	時間間隔 $\Delta t=1/145$ hour
h.	格子間隔 $\Delta x=\Delta y=0.02$ m
i.	イタレーションの始めの室温 $10^\circ\text{C}$
j.	空気の定圧比熱 $c_a=1000$ Jkg $^{-1}$ K $^{-1}$
k.	空気の密度 $\rho_a=1.2$ kgm $^{-3}$
l.	屋根における天空比 $\psi=1$
m.	壁面における天空比 $\psi_s=0.5$
n.	正方形の一辺の長さ $N=1$ m
o.	壁の材質 コンクリート
p.	壁厚 $L=0.1$ m
q.	外壁のアルベド $A=0.2$
r.	地面および周辺建物の長波放射率 $\epsilon_0=1$
s.	建物表面の長波放射率 $\epsilon_s=0.8$
t.	表面熱伝達率 $\alpha_0=23.3$ Wm $^{-2}$ K $^{-1}$ (屋外用, 3 m/s の風が吹いている) $\alpha_2=9.3$ Wm $^{-2}$ K $^{-1}$ (室内用)



第6図 はじめの室温の取り方による室温変化の違い



第7図 計算時間  $\Delta t$  の取り方による熱フラックスの違い

た条件においてはじめの室温を  $10^\circ\text{C}$  と  $20^\circ\text{C}$  と  $30^\circ\text{C}$  の三つの場合を考える (第6図)。ただし、ここでいうはじめの室温は壁に囲まれた空気の温度と等しいだけでなく、全ての壁の温度もこのはじめの室温と等しいとした。イタレーションする日数が増えると日変化のパターンは定常的になっていく。また、イタレーションする日数を半日もすればはじめの室温の取り方に関係なく日変化が同じになる。そこで、本研究では日平均気温が前日の日平均気温と比べ、その差の絶対値が  $0.01^\circ\text{C}$  以下になったとき日変化が定常的になったと判断し、計算を打ち切った。

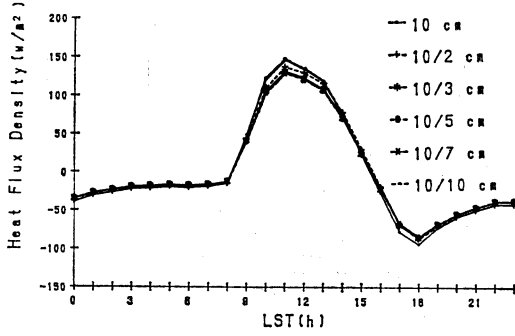
#### 4.2 計算時間間隔と格子間隔の取り方による熱フラックスの違い

本研究で用いる数値計算法は微少な時間間隔と微少な格子を取り、逐次温度を求めて行くため、これらを小さくとればとるほど計算値と実際の値との差が小さくなると思われるが、計算は長時間かかるようになる。そのため適当なところでこれらを定める必要がある。斉藤他(1982)の考えを本研究の式に当てはめられるならば(10)式における  $\theta_{i,j}(t)$  の係数に着目し、つまりその係数は

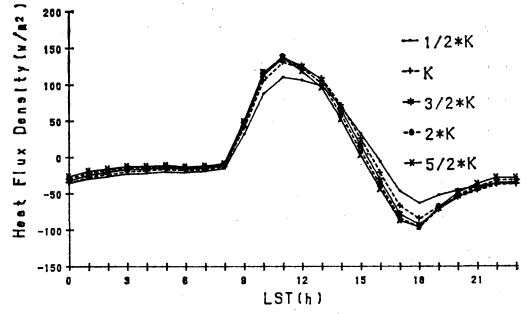
$$\text{ここでは } @=1-\frac{2\lambda\Delta t}{Cp}\left(\frac{1}{(\Delta x)^2}+\frac{1}{(\Delta y)^2}\right)$$

となり、この値@が5/6、4/5程度あることを彼らは述べている。ここではこの値@を0.1から0.9まで0.1ずつ増やすように  $\Delta t$  の値を前の基本条件の中で変化させて、熱フラックスに対する影響を考えた。計算結果は@の値が0.4以下では計算値が発散してしまい、計算できなかった。そこで0.5~0.9の値について述べる。第7図はその結果を示している。これによると@の値が大きくなると日射を多く吸収し、夜間に多く熱を放出するようになる。その差は@=0.9と@=0.5において日射が一番吸収するときで  $13$  W/m $^2$ 、夕方の流出熱のピーク時ではほぼ同じ、早朝では  $5$  W/m $^2$  の差となっている。

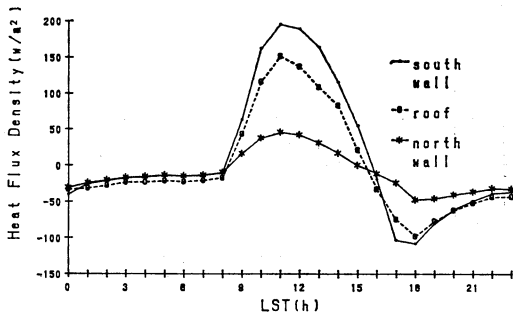
次に、格子間隔のとり方による熱フラックスの違いについて考える。1つの格子の長さ  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  ともに同じ値とし、それを  $10$  cm、 $10/2$  cm、 $10/3$  cm、 $10/5$  cm、 $10/7$  cm、 $10/10$  cm とした。ただし時間間隔  $\Delta t$  は前に述べた係数の値@が0.8になるようにそれぞれ1/6、1/24、



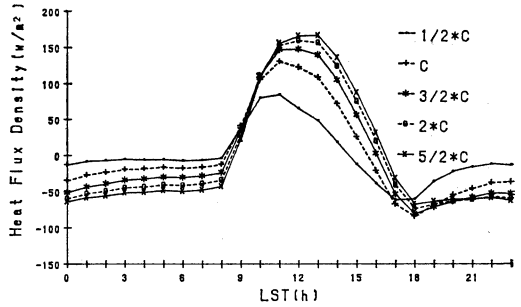
第8図 格子間隔 ( $=\Delta x=\Delta y$ ) の取り方による熱フラックスの違い



第10図 熱伝導率と熱フラックス



第9図 各壁面、屋根における熱フラックス



第11図 容積比熱と熱フラックス

1/53, 1/146, 1/186, 1/583とした。その計算結果を第8図に示す。これによると格子間隔を狭くすれば、日中熱を少なく吸収し、夜間少なく放出することがわかる。しかし、10/3 cm より細かくすれば、熱フラックスにおける差はみられず、ほぼ同じ結果になっている。

4.3 各壁面における熱フラックス

基礎条件において南壁、北壁、屋根面における熱フラックスの日変化をシミュレートした(第9図)。ただし図中の正の値は外から室内へ向かう熱フラックス、負の値は室内から外へ向かう熱フラックスを示すものとする。ただし、数値実験に想定した月は1月であり、その月の平均日の出時刻、日没時刻はそれぞれ6:47, 6:52である。結果は日中各壁面や屋根面で熱を吸収し、夜間に熱をそれぞれ放出しているのがわかる。特に、直射日光がよく当たる屋根面や南壁面は日中よく熱を吸収している。日没後その吸収した熱を急激に放出し、徐々に夜明けまで熱を放出する。このことは以下に述べる種々のケースの熱フラックスの日変化についてもいえることなので、今後南壁、北壁、屋根面の平均値を取り、その値で議論することにする。

4.4 種々のケース

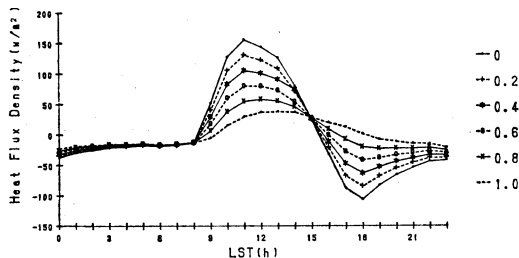
ここではいろいろなパラメーターの蓄熱に対する影響を考えるために前に述べた条件の一つを取り出して、そのパラメーターに対する熱フラックスの感度解析を行った。

4.4.1 熱伝導率

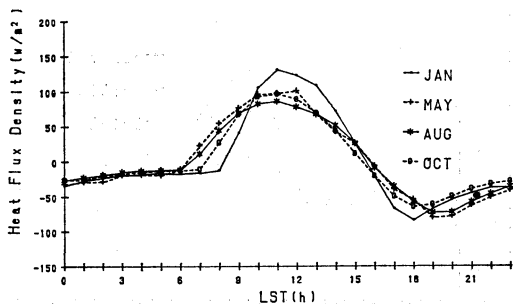
コンクリートの熱伝導率を0.5倍から2.5倍まで5段階で変えて、他の条件は前に述べた通りにして、構成物質の熱伝導率と熱フラックスの日変化の関係を調べた(第10図)。ただし、建物の中にはいる熱フラックスをプラスとした。それによるとコンクリートの熱伝導率を0.5倍にした場合は日中に他の場合と比べ、日射をあまり吸収しないが、夕方の熱放出のピーク時に多く放出しないため夜間にその熱を多く放出している。そして、熱伝導率を大きくすれば、日中によく日射を吸収し、夕方に急激に熱を放出してしまい、そのため夜間の熱の放出量は小さい。

4.4.2 容積比熱

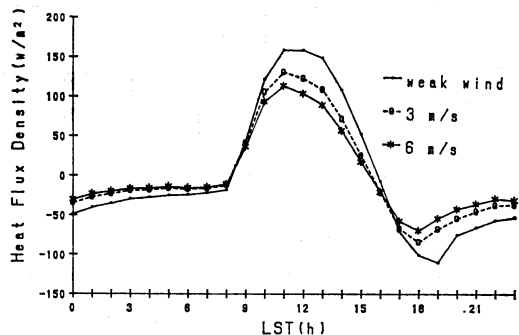
コンクリートの容積比熱を0.5倍から2.5倍まで5段階で変えて、他の条件は前に述べた通りにして、構成物質



第12図 アルベドと熱フラックス



第14図 季節による熱フラックスの違い



第13図 外気の風速と熱フラックス

の容積比熱と熱フラックスの日変化の関係を調べた(第11図)。これによるとコンクリートの容積比熱を0.5倍にした場合は日中に他の場合と比べ、日射を吸収しにくくなり、夜間の熱放出量も小さい。そして、容積比熱が大きくなれば、日射をよく吸収するようになる。また、日没後の熱放出のピークではコンクリートの容積比熱が1倍の時が最も多く熱を放出し、それ以上になると逆にその値は小さくなる。夜間や早朝では容積比熱が大きいほど多くの熱を放出している。

#### 4.4.3 アルベド

ここでは壁面、屋根面のアルベドの値を0から1まで6段階に分けて、アルベドと熱フラックスの日変化の関係を調べた(第12図)。これによるとアルベドが大きければ大きいほど、日中に日射をよく吸収し、夜間によく放出するのがわかる。そして、18時の放出熱のピークを過ぎた後、だんだんとどのケースも同じ値に近づき、0時から夜明け前では熱フラックスはほぼ同じ値になっている。

#### 4.4.4 屋外の風速

外を吹く風が建物を出入りする熱フラックスにどのように影響するかを調べるため、微風、3m/s、6m/sの場合について数値実験を行った。風速と表面熱伝導率の

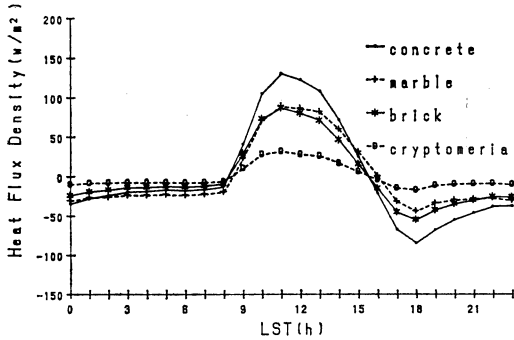
関係は齊藤ら(1974)によって実測により求められている(第3表)。したがって、表面熱伝導率を変えることにより、風速と建物を出入りする熱フラックスの関係を求めた。第13図はその結果である。それによると、風速が弱くなればなるほど日射を吸収し、その熱をよく放出するようになる。また、夕方に生じる放出熱フラックスのピークは遅れて生じる。

#### 4.4.5 季節

季節による建物を出入りする熱フラックスの違いを調べるため、1月、5月、8月、10月について調べた。すなわち、時刻別気温、時刻別方位別全天日射量、時刻別正味長波放射量をその月のデータにそれぞれ変えて数値実験を行った(第14図)。これによると1月が日中に日射をよく吸収し、夜間によく放出するのがわかる。5月は日射吸収のピークの値が小さいのかかわらず、夕方の熱フラックスの値は比較的大きい。それは昼間の長さが長いからだと考えられる。10月は日中の日射の吸収量は一番小さく、日没後に生じる流出熱の最大値も小さい。日没後に生じる放出熱の最大値が生じる時刻は日没時刻が異なるため違っているが、どれも日没直後に生じることは同じである。さらに0時以降の建物から放出する熱フラックスの大きさは日の出の時刻までどの月もあまり変わらない。

#### 4.4.6 構成物質

建物を構成する物質の違いによる熱フラックスの違いを調べるため、コンクリート、煉瓦、大理石、大谷石、杉、檜を考え、それらの容積比熱と熱伝導率に変え、数値実験をすることにした(第4表)。ただし、アルベドは変えていない。その結果を第15図に示す。それによると、コンクリートがこれらの物質の中で日射を一番吸収し、夜間熱を放出していることがわかる。夕方における熱放出のピークの値で比較すると、コンクリートの場合には杉の場合の5倍、煉瓦の場合の1.5倍ほど熱を放出し



第15図 構成物質と熱フラックス

ている。また、早朝の6時では杉の場合の2.4倍、煉瓦の場合の1.4倍ほど熱を放出している。

5. おわりに

都市を構成する主なものとして建物を考え、その建物における平均的な熱の出入りの数値実験を行った。その結果、建物が日射を吸収し、夜間にその熱を放出する熱フラックスのパターンが得られた。それによるとその放出熱のフラックスのピークは夕方が生じていた。また、そのフラックスの壁面成分を見ると南壁がよく日射を吸収し、夜間も多くの熱が放出することを示した。

次に、構成物質の物理的性質がどのように熱フラックスの出入りに影響があるのか感度解析を行った。熱伝導率は大きいほど、日射の吸収量は大きく、夕方の熱放出量も多い。しかし、夜間の放出量は小さくなる。容積比熱は多くなればなるほど、日射をよく吸収し、夜間多くの熱を放出した。しかし、夕方の熱放出量ばらつきがある。アルベドは大きくなればなるほど日射を余り吸収しなくなり、夜間の放出量も小さくなる。また、外を吹く風が弱まると日射をよく吸収し、夜間よく熱を放出するようになる。季節による違いは夜間放出する熱フラックスの値では差はない。ただし、日没後のピーク時の値では1月が大きい。構成物質の違いではコンクリートが日射をよく吸収し、夜間熱を多く放出した。夕方における熱放出のピークの値と比較すると、コンクリートの場合には杉の場合の5倍、煉瓦の場合の1.5倍ほど熱を放出した。また、早朝の6時では杉の場合の2.4倍、煉瓦の場合の1.4倍ほど熱を放出した。

以上の結果より、都市ではコンクリート造の建物が多くなることや、アルベドが郊外と比べ小さいことは夜間

第3表 風速と表面伝達率

風速	微風	3m/s	6m/s
表面伝達率 $Wm^{-2}K^{-1}$	11.7	23.3	35.0

出典：建築気候（斉藤平蔵，1974）

第4表 各物質の熱特性

	コンクリート	煉瓦	杉	檜	大理石	大谷石
容積比熱 $Jm^{-3}K^{-1}$	$2.02 \times 10^6$	$1.394 \times 10^6$	$0.785 \times 10^6$	$0.937 \times 10^6$	$2.356 \times 10^6$	$1.675 \times 10^6$
熱伝導率 $Wm^{-1}K^{-1}$	1.63	0.613	0.097	0.103	0.408	1.40

出典：建築気候（斉藤平蔵，1974）

のヒートアイランド現象の形成原因の一つであると示している。さらに風がなくなることも夜間のヒートアイランド現象の形成原因の一つであると示している。

今後は蓄熱効果と人工熱のどちらが大気に大きな影響を与えているのか調べる必要がある。そのため人工熱を見積る必要がある。したがって、実際の建物を数値実験の対象とし、内部発生熱を推定する方法が考えられる。

結局、建物のいろいろなパラメータと気象条件を変化させることにより、人工熱のない場合の建物の蓄熱と放熱の感度解析に成功した。

本論文を書くにあたって、筑波大学地球科学系の西沢利栄教授に御教示いただいた。また、建築研究所の坂本光男博士には貴重な資料やアドバイスを受けました。心から御礼申し上げます。

なお、本研究は1985年度科学研究費補助金（奨励研究（B）課題番号 60916011）の一部を使用した。また、本論文は1986年日本気象学会春季大会で発表した内容に加筆・修正したものである。

文献

河村 武，1964：熊谷市の都市温度の成因に関する二、三の考察，地理評，37，560-565。  
 斉藤平蔵，1974：建築気候，共立出版，18，144-147，151。  
 斉藤利忠，堀内三郎，石黒一郎，成瀬哲生，1982：建物環境工学の技術，明現社，130。  
 小原俊平，1974：建築の熱設計，鹿島出版，90。