

## 地盤冷熱と自然換気を利用した住宅のパッシブクーリング手法の検討

林, 徹夫

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

片山, 忠久

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

塩月, 義隆

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

張, 晴原

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

<https://doi.org/10.15017/17687>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 9 (1), pp.73-78, 1987-07-25. 九州大学大学院総合理工学研究科

バージョン :

権利関係 :

## 地盤冷熱と自然換気を利用した住宅の パッシブクーリング手法の検討

林 徹夫\*・片山 忠久\*  
塩月 義隆\*・張 晴 原\*\*  
(昭和62年3月31日 受理)

### A Study on a Passive Cooling Method for Dwellings by Ground Heat Storage and Natural Ventilation

Tetsuo HAYASHI, Tadahisa KATAYAMA  
Yoshitaka SHIOTSUKI and Qingyuan ZHANG

Temperature distributions in the ground including a building are examined to survey the feasibility of heat source for passive cooling of dwellings by means of finite differential methods. The temperature of the underground deeper than 1 meter is below 24°C all the year round, it can be utilized for the cooling heat source. As the daily average temperature on the ground surface in a crawl space is lower than that of the outdoor air, the air temperature in the crawl space is about 2°C lower than the outdoor air temperature in summer.

The effectiveness of a passive cooling method for dwellings is estimated with its thermal performance simulations in summer. The method uses the natural ventilation system inducing cool air of a crawl space into a living room and exhausting it to the outdoor through an attic space. In comparison with an ordinary house, this method prevents the living room air temperature rising in a wooden house about 4°C in the daytime, and it keeps the room air temperature in a house made of concrete 1°C below.

#### 1. はじめに

季節蒸暑地域が大部分の日本では夏季の住居温熱環境は重要である。しかし、その快適性の追求は省エネルギーを念頭において考える必要がある。自然エネルギーを利用したパッシブな冷房方法、すなわちパッシブクーリングでは日射の遮蔽と通風の確保がまず第一の方法として考えられる。この両者の方法と壁体熱容量の適性配置等との組合せにより、室内の温度変動を緩和したり外気温度の変動から位相をずらすことは可能であるが、より積極的に室内を冷やすためにはなんらかの冷熱源が別途必要になる。本研究はこの冷熱源として地盤に着目するものである。

戸建住宅を考える場合、特殊な事例を除けば建物の下部にはかならず地盤が存在する。しかし、一般には(接地床やクールチューブを除けば)建物と地盤は床

下空間を介して接するのみで、地盤の持つ大熱容量や恒温性を積極的に利用しているとは言い難い。そこで、本報告では地盤の熱特性を建物を含めて解析するとともに、床下で空気を地盤と接触させて冷却して居室に導入するパッシブクーリング手法の有効性について検討する。

#### 記号

|          |                 |                          |
|----------|-----------------|--------------------------|
| $AH$     | : 水平面大気放射量      | , kcal/m <sup>2</sup> h  |
| $a_s$    | : 屋外地表面の日射吸収率   |                          |
| $C_a$    | : 空気の容積比熱       | , kcal/m <sup>3</sup> °C |
| $C_e$    | : 土の容積比熱        | , kcal/m <sup>3</sup> °C |
| $C_{sa}$ | : 地表面近傍空気の湿り比熱  | , kcal/kg°C              |
| $k_s$    | : 地表面の蒸発比       |                          |
| $L_s$    | : 地表面温度での水の蒸発潜熱 | , kcal/kg                |
| $S_i$    | : 床下の表面積        | , m <sup>2</sup>         |
| $TH$     | : 水平面全日射量       | , kcal/m <sup>2</sup> h  |
| $V_i$    | : 床下の容積         | , m <sup>3</sup>         |
| $V_a$    | : 床下の換気量        | , m <sup>3</sup> /h      |

\*熱エネルギーシステム工学専攻

\*\*同上博士課程

- $v$  : 屋外風速 , m/s
- $X_a$  : 外気の絶対湿度 , kg/kg'
- $X_s$  : 地表面温度での飽和絶対湿度 , kg/kg'
- $\alpha_{ci}$  : 床下の対流熱伝達率 , kcal/m<sup>2</sup>h°C
- $\alpha_{co}$  : 地表面の対流熱伝達率 , kcal/m<sup>2</sup>h°C
- $\Delta x$  : 距離の刻み , m
- $\Delta t$  : 時間の刻み , h
- $\epsilon_s$  : 地表面の放射率
- $\theta_a$  : 外気温度 , °C
- $\theta_i$  : 床下の空気温度 , °C
- $\theta_j$  : 地中j点の温度 , °C
- $\theta_s$  : 地表面温度 , °C
- $\theta_w$  : 床下の表面温度 , °C
- $\lambda_e$  : 土の熱伝導率 , kcal/mh°C
- $\sigma$  : ステファンボルツマン定数
- 添字
- $j$  : 地盤内の位置 , m
- $n$  : 時刻 , h

2. 地盤内の垂直温度分布

地盤の熱特性を検討するため、平坦で遮蔽物のない地表面を想定して、地盤内の垂直温度分布を一次元熱伝導の差分法により求める。

$$\begin{aligned} \text{地表面} \quad & \frac{\Delta x C_e}{2\Delta t} (\theta_{s,n} - \theta_{s,n-1}) \\ & = -\frac{\lambda_e}{\Delta x} (\theta_{j=1,n-1} - \theta_{s,n-1}) + H_{s,n} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} H_n = & a_s TH_n + \epsilon_s \{AH_n - \sigma (\theta_{s,n} + 273)^4\} \\ & + \alpha_{co,n} (\theta_{a,n} - \theta_{s,n}) \\ & + k_s \frac{\alpha_{co,n}}{C_{sa,n}} (X_{a,n} - X_{s,n}) L_{s,n} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{co,n} = & 4.0 + 1.625 V_n \quad (V_n \geq 2)^{1)} \\ \alpha_{co,n} = & 7.25 \quad (V_n < 2)^{1)} \end{aligned} \quad (3)$$

$$C_{sa,n} = 0.24 + 0.441 (X_{a,n} + X_{s,n}) / 2 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{地盤内} \quad & \Delta x \frac{C_e}{\Delta t} (\theta_{j,n} - \theta_{j,n-1}) \\ & = -\frac{\lambda_e}{\Delta x} (\theta_{j+1,n} + \theta_{j-1,n} - 2\theta_{j,n}) \end{aligned} \quad (5)$$

地盤の熱伝導率および容積比熱は含水率によって変化するが<sup>2)</sup>、ここでは一定と仮定する。蒸発潜熱は完

全湿潤面を仮定するルイスの法則で算定される水分蒸発量を蒸発比（可能蒸発量に対する実際の蒸発量の割合）で修正し水の蒸発潜熱を乗じたものであるが、蒸発比は予め求めておく必要がある。そこで、式(1)の中の地表面温度が外気温度に等しいと仮定して地表面の相当外気温度を求め、相当外気温度の年平均値が外気温度の年平均値と等しくなるように蒸発値を決定した<sup>3)</sup>。また、式(1)は非線型であるため二分法による収束計算を行った。

外界気象入力として福岡標準気象データを用いて地盤内の垂直温度分布を計算する。計算時間間隔を1時間、地盤内の距離の刻みを10cm、地下20mの地中温度は外気温度の年平均値(16.2°C)と等しく、かつ年間を通じて一定とする。地表面の日射吸収率と放射率をそれぞれ0.80と0.95とすれば前述の蒸発比は0.6となる。また、土の熱定数は熱伝導率を0.53kcal/mh°C、容積比熱を376kcal/m<sup>3</sup>°Cとする<sup>4)</sup>。

計算開始後10年目の地盤内の各深さにおける地中温度の月平均値の垂直分布を Fig. 1 に示す。地表面温度の月平均値は8月が最高で1月が最低であり、外気温度の高い月の順になる。一方、深さ3mの地中温度は10月が最高で4月が最低であり地表面温度の変動から約3ヵ月の時間遅れがある。また、地下1m以下では年間を通して温度は24°C以下であり、この部分を冷熱源としていかに活用するかが地盤を冷熱源として利用する場合のポイントになろう。

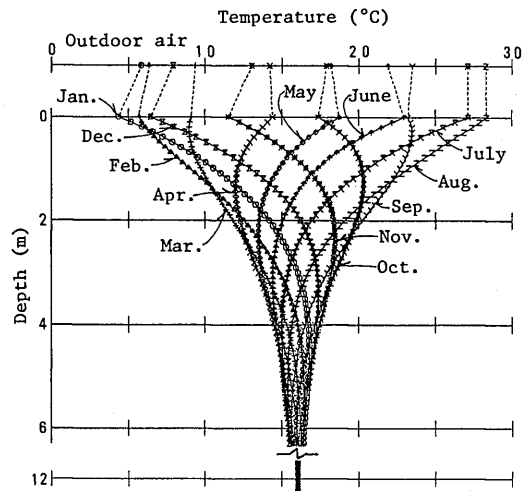


Fig. 1 Monthly average temperatures of the ground and the outdoor air.

深さ2 mまでの2, 5, 8, 11月の地中温度の月平均値, 日最高温度と日最低温度の月平均値を Fig. 2 に示す. 深さ50cm以下では地中温度の日変動はほとんどない.

なお, 以前の地盤内垂直温度分布の解析では, 式(2)を蒸発を考慮した相当外気温度を用いて表現し

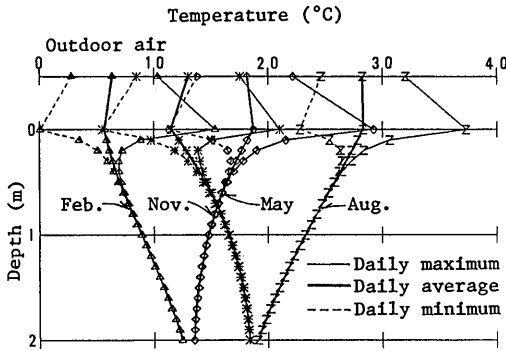


Fig. 2 Monthly average of daily maximum, average and minimum temperatures of the ground and the outdoor air.

ていた<sup>5)</sup>. 同表現を用いた場合, 月平均温度は今回の解析と大差ないが, 8月の日最高温度月平均値などは高めに算定されるため, 今回の定式化のほうがより適切と考えられる.

### 3. 地盤内の二次元温度分布

次に, 建物の床下空間の地表面も含む地盤の二次元温度分布を解析する. 想定した建物の概要を Fig. 3

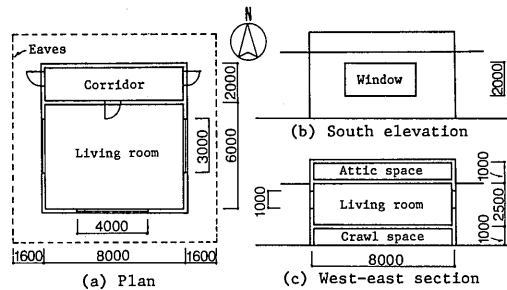


Fig. 3 A model house.

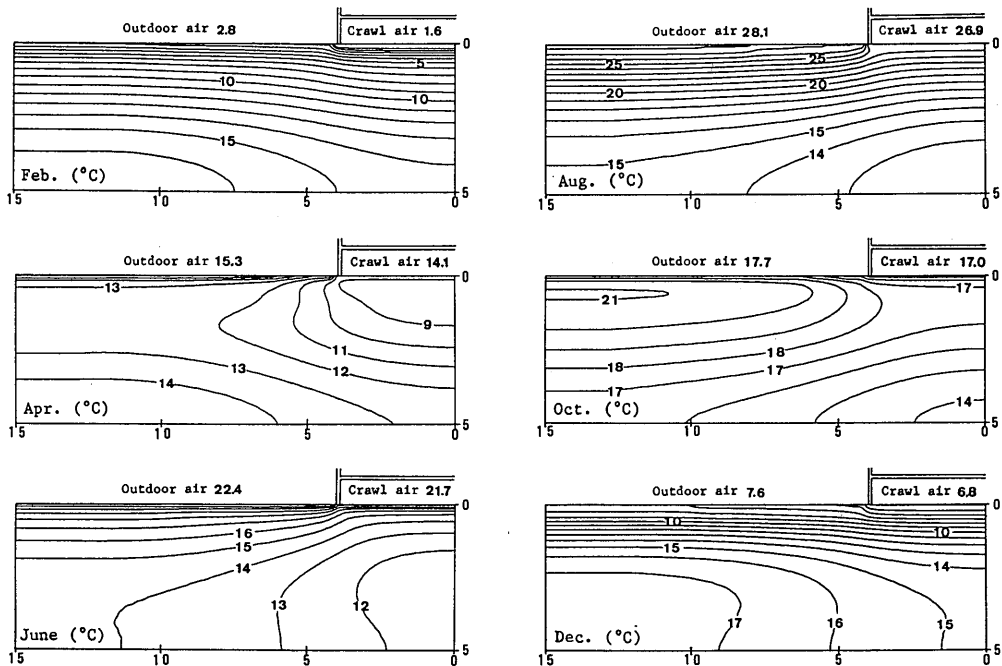


Fig. 4 Daily average temperature distributions of the ground on 15th of each month. Vertical axis is the depth from the ground surface and horizontal axis is the length from the center of the model house, (m).

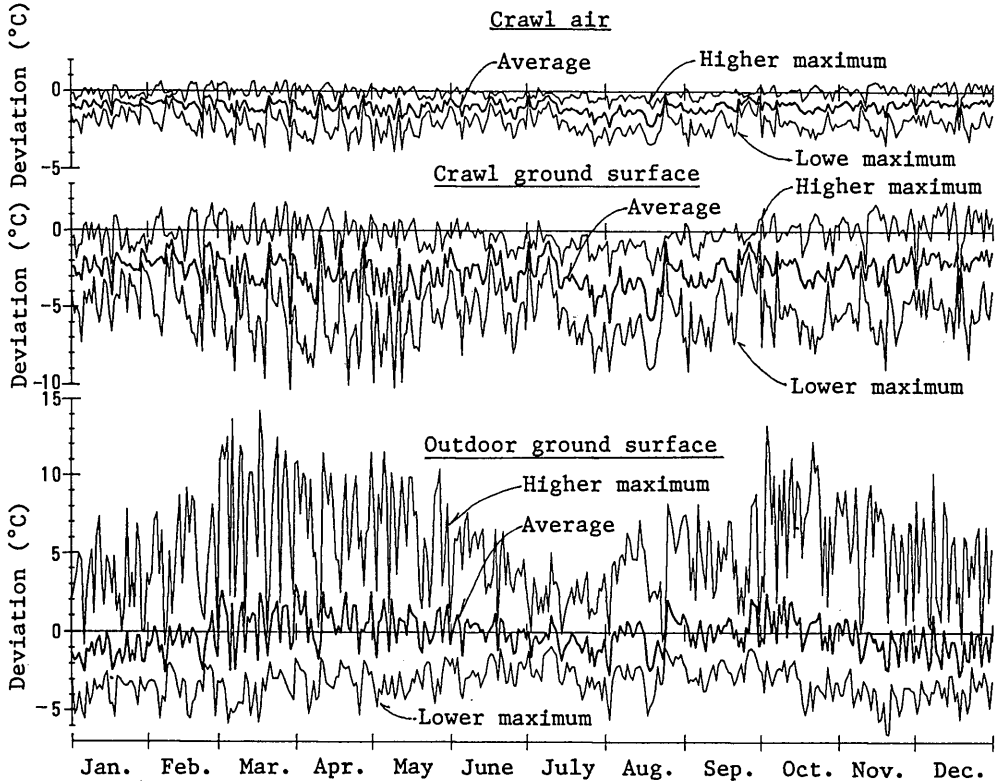


Fig. 5 Daily temperature deviations of the outdoor ground surface, the crawl ground surface and the crawl air from the outdoor air.

に示す。建物の中心から水平方向に 15m、垂直方向に 5m の地表面を含む地盤内の温度と床下空間の空気温度を計算対象とする。

地盤の温度の計算は前節の差分式の熱伝導項を二次元に拡張して使用するが、建物の基礎からの熱伝導は考慮していない。また、屋外の表面温度計算点の日射受熱量は建物や庇の影響により方位と建物からの距離によって異なるが、建物の南北および東西軸上の建物からの距離が等しい 4 点での平均値を用いている。床下の空気温度は換気回数を常時 10 回として、次式で差分化した。

$$V_i \frac{C_a}{\Delta t} (\theta_{i,n} - \theta_{i,n-1}) = S_i \alpha_{ci,n} (\theta_{w,n} - \theta_{i,n}) + C_a V_{a,n} (\theta_{a,n} - \theta_{i,n}) \quad (6)$$

なお、床下の対流熱伝達率は  $3.5 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  で一定、

床下の表面温度は外気温度と床下地表面温度の平均値とした。計算時間間隔は 2 時間、地盤内の距離の刻みは水平および垂直方向とも 0.2m である。境界条件は、建物中心から水平距離 0m の垂直方向および地盤内の深さ 5m の水平方向はともに断熱、水平距離 15m の垂直方向では前節と同様の方法で計算した垂直温度分布を各計算時間ステップごとに与えた。

偶数月 15 日の日平均地盤内温度分布を Fig. 4 に示す。地盤内の温度は建物の影響を強く受け、特に建物外壁の屋外側で温度が急変している。また、建物地下 1m の地盤温度は 6 月で約  $13^\circ\text{C}$ 、8 月で約  $19^\circ\text{C}$  であり夏季の冷房用冷熱源として十分有効である。Fig. 5 に屋外地表面温度、床下地表面温度、および床下空気温度の外気温度からの偏差を示す。屋外地表面温度日平均値は春季および秋季に外気温度日平均値を上回ることが多い。一方、床下地表面温度日平均値は常に外気温度日平均値以下であり、夏季には床下地表面温度

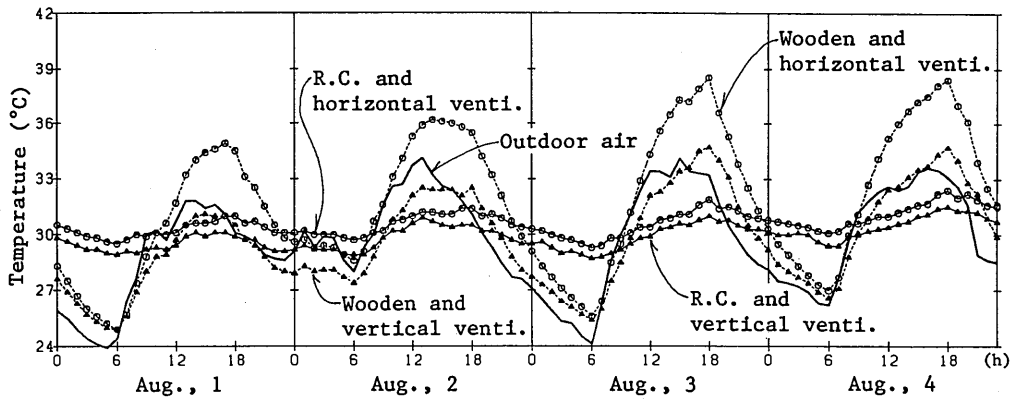


Fig. 6 Comparison of the living room air temperatures between the room made of reinforced concrete and wood, and the one-way vertical and horizontal natural ventilation.

はほぼ終日外気温度以下である。床下空気は床下地表面に冷却されるため、8月では約2℃程度外気温度よりも日平均値で低くなっている。

4. 床下から居室を経て小屋裏へ抜ける通風方式の  
パッシブクーリング効果

床下の冷気を居室に導入して、居室を冷房し、小屋裏から排気する通気方式のパッシブクーリング効果を検討する。通気は風圧力および浮力を併用する自然換気で行う。

Fig. 3 に示す建物で床下および小屋裏の東西南北の外壁と居室の床および天井に0.1m<sup>2</sup>の開口を設定する。床下外壁の開口は前後差圧が正（床下に流入する方向が正）と場合のみに通風する逆流防止ダンパーが付いていると仮定する（垂直換気と略称）。比較のため、外壁の開口に逆流防止ダンパーが無く、居室の床および天井の開口も無い通常の建物（水平換気と略称）についても計算も行った。

建物はコンクリート造および木造の二種類を考え、コンクリート造は壁体はすべて厚さ12cmで外壁外側と天井の小屋裏側は厚さ2cmのフォームポリスチレンで断熱されている。木造は瓦葺屋根で壁は厚さ9mmの合板の間に10cmの空気層があり、外壁および天井は空気層にグラスウールが充填されている。窓は3mmの普通板ガラスで、東西の窓にはカーテンが引かれている。

前節の解析では、床下は換気回数10回、床下表面の

対流熱伝達率は3.5kcal/m<sup>2</sup>h℃でともに一定と仮定し、床下地表面での水分蒸発に伴う床下の湿度上昇も考慮していない。そこで、前節で求めた建物下部0.5mの地中温度と福岡標準気象データにより、多数室室温変動解析プログラム(PSSP/MV1)<sup>6)</sup>を一部改良してシ

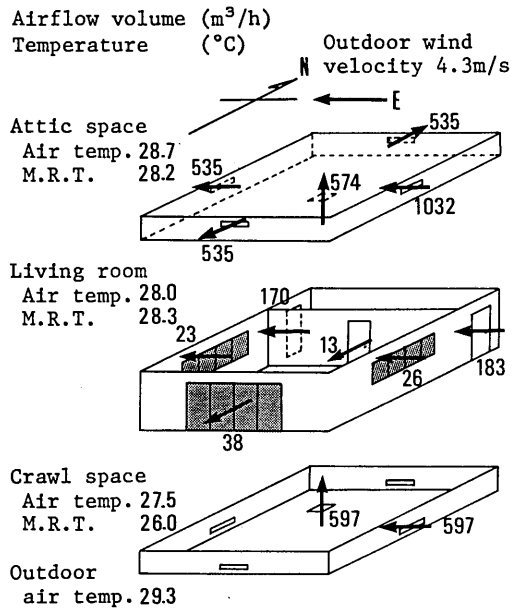


Fig. 7 Distribution of airflow volume, room air temperatures and mean radiative temperatures at 2:00 a.m. on 2nd of August.

シミュレーションを行った。同プログラムは室内の相互換気を考慮し、壁体表面の対流熱伝達率も時変させている。

盛夏である8月上旬の居室空気温度の計算結果をFig. 6に示す。窓を締め切っているため、木造水平換気の居室は40℃弱まで室内空気温度が上昇するが、床下からの冷気の導入により最大4℃程度日中の室温上昇を阻止できる。この効果の中には、室温よりも低い外気の床下を通しての導入の影響も与えられる。しかし、木造垂直換気の居室は午前中に室内空気温度が外気温度よりも低くなっている。これは本通り方式による床下冷気の導入の効果である。一方、コンクリート造は熱容量が大きくかつ外断熱であるため温度変動が木造に比べて緩やかであるが、垂直換気は水平換気より常時1℃程度低温である。

木造垂直換気の居室の空気温度が外気よりも2℃程度低い8月2日2時の通風量をFig. 7に示す。風上である東側の外壁から床下に外気が約600m<sup>3</sup>/h流入し、約2℃冷却されて居室に導入され、居室から小屋裏を経て約570m<sup>3</sup>/h屋外に排気されている。

## 5. む す び

地盤を住宅のパッシブクーリングの冷熱源として利用するために、地盤の熱特性を建物を含めて解析するとともに、床下から居室を経て小屋裏へ抜ける通風方式を有する建物のパッシブクーリング効果について検討した。今回のシミュレーションによる解析で得られた結論を以下に列記する。

- 1) 平坦で遮蔽物のない地盤でも地下1 m以下は年間を通して24℃以下であり、夏季の冷房用冷熱源として活用することが可能である。
- 2) 建物の床下空間を含む地盤の二次元温度分布の計

算結果によれば、床下地表面温度は日平均値で常に外気温度以下であり、床下空気は床下地表面に冷却されるため8月には約2℃程度外気温度より低くなっている。

- 3) 夏季には床下の冷気を居室に導入して冷房し屋根裏から排気する通り方式は、通常の木造家屋よりも最大4℃程度日中の室温上昇を阻止できる。また、通常コンクリート造家屋よりも常時1℃程度低温になる。
- 4) 上記の通り方式によるパッシブクーリングは床下地盤の冷房能力に限界があるため、建物の構造や通気特性、床下地盤と空気の接触方法、結露対策などが今後の課題である。

なお、本研究の一部は「昭和61年度文部省科学研究費補助金 奨励研究 (A) (課題番号61750614) 研究課題：地中長期蓄冷を利用した冷房方式に関する研究」によるものである。

## 参 考 文 献

- 1) Ken-ichi KIMURA: Scientific Basis of Air Conditioning, Applied Science Publishers, p. 93, (1977).
- 2) 土壌物理研究会編：土の物理学 —土質工学の基礎—, 森北出版, p. 284, (1979).
- 3) Toshiyuki WATANABE, Yoshimi URANO, Tetsuo HAYASI and Yuji RYU: Case Study on Thermal Insulation System for the Earth-contact Floor, Proc. of the Int. Symp. on Earth Architecture, pp. 427-434, (1985).
- 4) 日本建築学会編：建築設計資料集成 第1巻環境, 丸善, p. 119, (1987).
- 5) 林 徹夫, 浦野良美：都市の地表面熱収支に関する研究 —地表面被覆状況を考慮した福岡市における解析—, 九州大学工学集報 59巻 4号, pp. 503-509, (1986).
- 6) Tetsuo HAYASI, Yoshimi URANO, Toshiyuki WATANABE and Yuji RYU: Passive System Simulation Program "PSSP" and its Application, Proc. of the Building Energy Simulation Conf., pp. 346-353, (1985).