

三次元シミュレーションによる 家庭用地中蓄熱温室の熱特性

Three-Dimensional Simulation of the Garden Greenhouse Performance Utilizing the Underground Soil Thermal Storage

斎藤 彬 夫*
Akio SAITO

宇高 義 郎**
Yoshio UTAKA

渋谷 幸 生***
Sachio SHIBUYA

Abstract

The transient FDM heat transfer analyses were performed concerning a passive type greenhouse, where the house and the soil floor were used as the solar collector and the thermal energy storage material, respectively. The excess solar heat energy in the daytime was carried by the circulating air through the pipes buried in the ground, and stored in the soil. During the night, the stored heat energy was returned to the house also by the circulating air. The periodic variations of the greenhouse temperature, the three-dimensional temperature distribution within the soil and the amount of heat stored-in or removed-from the soil were simulated under the standard winter meteorological conditions in Kanto district, for various arrangements of the buried pipes and the insulators.

As the results, the periodic house temperature variation was not affected so seriously by the mutual positions of the buried pipes. The heat loss through the ground at night was remarkable near the ground surface just under the house wall, and the shallow plate-type insulation at the place was considerably effective.

Key Words Greenhouse, Thermal Energy Storage, Underground Soil, Heat Conduction
Three-Dimensional Simulation, Insulation Effects, Pipe Arrangement Effects

1. はじめに

本研究は、温室内空気を熱媒体として利用し、土中に埋設された管群に循環させることにより、日照時に温室内で得られる過剰熱エネルギーを温室下部の土に一時蓄え、夜間その蓄えられた熱を温室内に開放し、室温の低下を防ぐ、いわゆる省エネルギー温室の数値シミュレーションを行い、土壌を蓄熱体として利用する温室の特性に関する資料を得ることを目的とする。

このような省エネルギー温室の研究は、従来から多くの研究者によって行われている。以下に代表的ないくつかの例を挙げると、山本・岡野・青木^{1),5)}らは、上記の構造を有する温室を試作し、その熱特性を実験的に詳細に検討するとともに、設計上必要となる基本的な指針を示している。さらに岡野・山本・青木ら²⁾

は、2次元非定常シミュレーションモデルを提案し、同モデルを用いて管本数・管長などが温室性能に及ぼす影響を検討している。佐々木^{3),6)}は、地中熱交換温室の実用化試験を行い、トマト生育・収量に対する効果を示したほか、熱的特性、湿度特性などを実験的に検討し、さらには経済性や地中熱交換方式の問題点に及ぶ広い知見を与えている。また、伊藤・岩根⁷⁾および高倉⁴⁾は、簡単な1次元解析により、排気温を算出し、種々の検討を加えている。なお高倉ら¹⁰⁾は水分移

* 東京工業大学 工学部 機械工学科 助教授
Tokyo Institute of Technology, Associate Professor

** 東京工業大学 工学部 機械工学科 助手
ibid. Assistant

*** 株式会社 東芝
Toshiba Co.

動をも考慮した2次元解析の結果についても報告している。その他、地中熱交換温室の効果を総合的に論じた長沢⁸⁾の研究などがある。

以上述べたように、従来の解析的な研究においては土中の伝熱モデルを1次元あるいは2次元熱伝導と考え、実際の3次元場を単純化しているものが多く、より厳密な3次元伝熱モデルによる検討は少ない。また太陽日射を利用する場合に特有な、系の非定常(日周)性を考慮することは重要と考えられるが検討が充分とはいえない。

以上のことを考慮して、本報では以下の検討を行う。

(1) 地中蓄熱を利用する温室について、日射および気温の変化に起因する系の日周非定常性および埋設管を含んだ土中の3次元温度分布を考慮する、実際の系に近い計算機シミュレーションを実行し、埋設管の配置を種々に変化させる場合の温室内温度の日周変化、地中内の温度分布の様子あるいはそれらの経時特性、地中に蓄えられる熱エネルギーの回収率等について詳細な検討を加える。さらに土中蓄熱式の温室に関する一般的な特徴について論じるとともに、管列位置の温室温度に及ぼす影響についても考察を行う。

(2) 上記(1)で行った結果に基づいた考察により、温室の地中蓄熱効率の向上に有効と考えられる温室周縁直下の土中断熱の効果について検討を行う。

記 号

- a : 温度伝導率, m^2/h
- A_f : 温室床面積, m^2
- A_w : 温室表面積, m^2
- C : 比熱, $\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$
- f : 夜間のカーテンによる熱節減率
- h : 熱伝達率または熱通過率, $\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
- I : 全天日射量, $\text{kcal}/(\text{m}^2\text{h})$
- L_h : 温室長さ (=埋設管1本の長さ), m
- N_p : 埋設管本数
- q : 熱流束, $\text{kcal}/(\text{m}^2\text{h})$
- R : 埋設管半径, m
- T : 温度, $^\circ\text{C}$
- t : 時刻, h
- Δt : 時間差分, h
- u : 埋設管内平均空気流速, m/h
- V : 容積, m^3
- x, y, z : 座標系 (図1参照), m
- $\Delta x, \Delta y, \Delta z$: 差分の節点間隔, m
- λ : 熱伝導率, $\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$

ρ : 密度, kg/m^3

Q : 単位時間当りの全出入熱量, kcal/h

(添 字)

a : 空気の値

e : 土壌の値

ep : 埋設管周囲土壌の値

es : 地表面の値 (温室外の値に ' を付す)

h : 温室内の値

out : 外気の値

p : 埋設管内の値

p_{in} : 埋設管入口の値

p_{out} : 埋設管出口の値

1 : 温室内地表面から室内空気への値

2 : 埋設管内空気から土壌への値

3 : 温室表面から外気への値

4 : 地表で吸収される日射の値 (温室外の値に ' を付す)

5 : 地表面から土壌への値 (温室外の値に ' を付す)

6 : 温室外地表面から外気への値

2. 解析モデルおよび基礎式

図1に本解析に用いるモデルを示す。ここで、白の太矢印は日照時、黒の太矢印は日没時における熱の移動方向の概略をそれぞれ示しており、また実線の矢印は空気の移動を示している。同図に見られるように、温室に地中埋設管を設置し、それらの管に熱媒体として温室内空気を循環させることにより、日照時の余熱を一時地中に蓄え、室温の低下する夜間にこの蓄えられた熱エネルギーを温室内へ供給する効果が生じ、温室内気温の低下を防ぐことが可能となる。

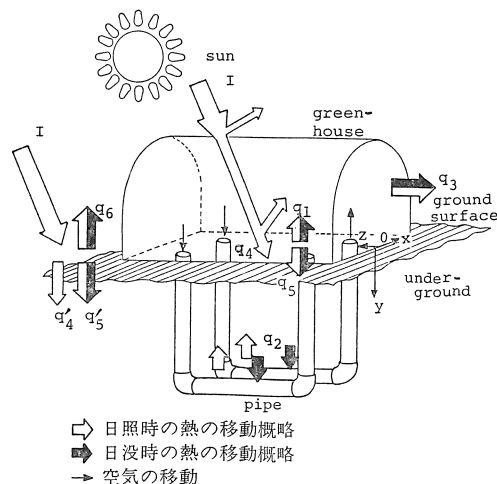


図1 地中蓄熱温室モデル

本論文では、同図の系における、温室内空気、管内空気、土壌の各非定常周期温度変化を解析する。解析を容易にするために、温室内空気は場所によらず一様温度とし、管内空気は管軸方向にのみ温度分布があるものとする。また熱の移動は顕熱のみによるものとし、土壌内の熱移動は、3次元熱伝導であるとする。図1をもとに熱収支を考えることにより、基礎式は表1に示すようにまとめられる。ここで q_2 を埋設管全体にわたって、また q_1 を温室内全地表面にわたって積分するとそれぞれ Q_2 および Q_1 となる。なお、地表面に吸収される日射の熱流束 q_4 、 q_4' は山本ら^{1),2)}の値を参考に決め、温室内外でそれぞれ、全天日射量 I の0.65倍、0.9倍とおいた。この値は温室特性の見積りに大きく影響するため、今後より正確な値の算定が重要であると思われる。

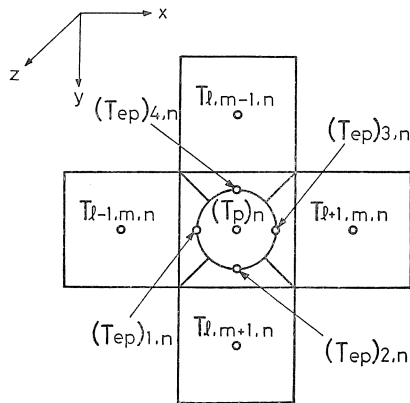


図2 埋設管周囲土壌の要素の決め方

以上に示した基礎式(1)~(3)および境界条件を数値解析のため、Explicit形の差分式に変換して表2に示す。差分式の誘導に当たって、微小要素の形状は、管周辺の土壌に対し図2の要素を、管から離れた土壌に対し通常の $4x \times 4y \times 4z$ の直方体要素を、管内空気に対し長さ $4z$ 、半径 R の円柱要素をそれぞれ用いた。なお、差分式を誘導する過程は周知であるので⁹⁾、ここでは説明を省略する。

3. 解析の方法

3.1 解析の手順

前章で示した差分式(5)~(9)を用いて数値計算を行った。本研究のような3次元の非定常計算に際しては、計算機の計算時間の短縮をはかるための工夫が必要となる。ここでは要素によって時間差分の大きさを変化させる方法を用いた。すなわち、埋設管内空気温度の計算では、速度項のための安定条件がきびしく、時間差分を最小とし、地表面付近の地中の温度分布および室温の計算にはやや大きな時間差分を用い、さらに大きな時間差分を埋設管周辺の土壌に適用した。埋設管および地表から離れた土壌に対しては温度分布がゆるやかな上、経時変化も小さいため、最大の時間差分を用いて計算を実行した。また、時間差分に対応して節点の間隔も場所により大きく変化させた。

また節点数を減らし、計算時間を短縮するため、温度場をいきなりこまかい要素に分割することをさけ、2段階に分けて計算を実行した。すなわち、第1段階

表1 基礎式および境界条件

	場所および種類		備 考
基礎式	温室内空気	$C_a \rho_a V_h \frac{dT_h}{dt} = Q_1 - Q_2 - Q_3$ (1)	
	管内空気	$C_a \rho_a \pi R^2 \frac{\partial T_p}{\partial t} = -C_a \rho_a \pi R^2 u \frac{\partial T_p}{\partial z} - 2\pi R q_2$ (2)	u : 管内平均流速 z : 流れの方向
	土 壌 温 度	$\frac{\partial T_e}{\partial t} = a_e \left(\frac{\partial^2 T_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} \right)$ (3)	x : 裏面方向 y : 深さ方向 z : 奥行方向
境界条件	埋設管内空気と周囲土壌間	$q_2 = h_2(T_p - T_{ep})$	
	温室内外地表面	$q_4 = q_5 + q_1$ (温室内) (4) $q_4' = q_5' + q_6$ (温室外) (4)'	$q_5, q_5' = -\lambda_e \left(\frac{\partial T_e}{\partial y} \right)_{y=0}$ $q_1 = h_1(T_{es} - T_h)$ $q_6 = h_6(T_{es}' - T_{out})$
	温 室 表 面	$q_3 = h_3(T_h - T_{out})$	
	埋設管入口空気温度	T_h	
	十分深い位置の土壌温度	年間平均外気温	
	温室から十分離れた位置での地表付近土壌温度	水平方向に均一	

の計算では、計算領域を十分に大きくとった（十分遠方の土壌をも含めた）同様の系を考え、差分要素の寸法を大きく選んで計算を行った。その際、温室から十分離れた位置において地中を半無限の1次元と考えたときの地中の周期定常温度分布を与えた。

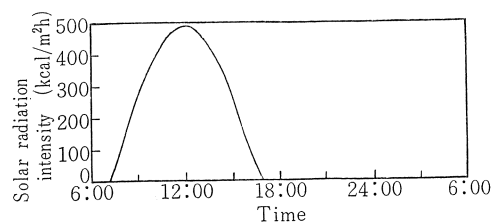
次に第2段階では、温室近傍の土壌だけをこまかい要素に再分割し直し、第1段階で得られた温室近傍土壌周囲の各位置における温度の経時変化を境界条件として用いて数値計算を行った。第2段階の計算では、 $\Delta x = \Delta y = 0.125\text{m}$, $\Delta z = 0.5\text{m}$ とした。

解析に必要な日射量および外気温は、山本らの実測による関東付近における冬の晴天日の標準的な値を参考に用い^{1),2)}、時刻 t の関数として与えた。

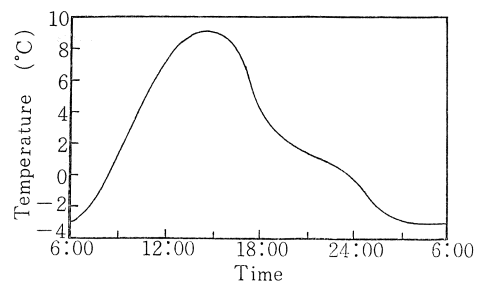
以上のようにして、24時間を1周期とし、周期定常になるまで数値計算を繰り返し行った。

3.2 解析のための温室に与える条件

モデルの解析に必要な日射量および外気温を図3 (a) (b) のように時刻 t の関数で与えた。



(a) 全天日射量



(b) 外気温

図3 解析に用いる全天日射量と外気温の日周変化¹⁾²⁾

表2 基礎式および境界条件の差分式

位置および種類		備 考
土 壌 要 素	地表面および埋設管に接しない要素 $T_{l,m,n}^{p+1} = T_{l,m,n}^p + \frac{a_e \Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{l-1,m,n}^p + T_{l+1,m,n}^p - 2T_{l,m,n}^p) + \frac{a_e \Delta t}{(\Delta y)^2} (T_{l,m-1,n}^p + T_{l,m+1,n}^p - 2T_{l,m,n}^p) + \frac{a_e \Delta t}{(\Delta z)^2} (T_{l,m,n-1}^p + T_{l,m,n+1}^p - 2T_{l,m,n}^p) \quad (5)$	位置: $x = l\Delta x$, $y = m\Delta y$, $z = n\Delta z$, 時刻: $t = p\Delta t$ の温度を $T_{l,m,n}^p$ とする.
	温室内の地表面に接した要素 $T_{l,0,n}^{p+1} = T_{l,0,n}^p + \frac{a_e \Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{l-1,0,n}^p + T_{l+1,0,n}^p - 2T_{l,0,n}^p) + \frac{a_e \Delta t}{(\Delta z)^2} (T_{l,0,n-1}^p + T_{l,0,n+1}^p - 2T_{l,0,n}^p) + \frac{2 \cdot \Delta t}{C_e \rho_e \Delta y} [0.65 I + h_1 \cdot (T_h^p - T_{l,0,n}^p) + \frac{\lambda_e}{\Delta y} (T_{l,1,n}^p - T_{l,0,n}^p)] \quad (6)$	
	温室外の地表面に接した要素 上記(6)式の右辺の第4項の括弧内を $0.65 I \rightarrow 0.9 I$, $h_1 \rightarrow h_6$, $T_h^p \rightarrow T_{out}^p$ と置き換える	
	埋設管周囲の土壌要素 (図2参照) $(T_{ep})_{1,n}^{p+1} = (T_{ep})_{1,n}^p + \frac{2\pi R \cdot h_2 \cdot \Delta t}{C_e \rho_e (\Delta x \Delta y - \pi R^2)} \cdot ((T_p)^p_n - (T_{ep})_{1,n}^p) + a_e \cdot \frac{4 \Delta y \Delta t}{(\Delta x \Delta y - \pi R^2)(\Delta x - R)} \cdot (T_{l-1,m,n}^p - (T_{ep})_{1,n}^p) + a_e \cdot \frac{8(\Delta x / \sqrt{2} - R) \Delta t}{\pi R (\Delta x \Delta y - \pi R^2)} \cdot ((T_{ep})_{2,n}^p + (T_{ep})_{4,n}^p - 2(T_{ep})_{1,n}^p) + \frac{a_e \Delta t}{(\Delta z)^2} \cdot ((T_{ep})_{1,n-1}^p + (T_{ep})_{1,n+1}^p - 2(T_{ep})_{1,n}^p) \quad (7)$	埋設管位置: $x = l\Delta x$, $y = m\Delta y$, 埋設管周囲土壌温度: $(T_{ep})_{i,n}$ ($i=1\sim 4$, n は $z = n\Delta z$ の n に対応) 左式は図2中 $i=1$ の場合を示しているが、 $i=2\sim 4$ の場合についても同様である.
管内空気温度	$(T_p)_n^{p+1} = (T_p)_n^p + \frac{u \Delta t}{\Delta z} ((T_p)_n^p - (T_p)_{n-1}^p) + \frac{h_2 \Delta t}{2RC_{a\rho_a}} ((T_{ep})_{1,n}^p + (T_{ep})_{2,n}^p + (T_{ep})_{3,n}^p + (T_{ep})_{4,n}^p - 4(T_p)_n^p) \quad (8)$	位置 $z = n\Delta z$, 時刻 $t = p\Delta t$ の温度を $(T_p)_n^p$ とする.
温室内空気温度	$T_h^{p+1} = T_h^p + \frac{h_1 \Delta t}{C_a \rho_a V_h} \cdot \sum_i (A_f)_i \cdot ((T_{es})_i^p - T_h^p) + \frac{\pi R^2 u \Delta t}{V_h} \cdot \sum_j^N ((T_{pout})_j^p - (T_{pin})_j^p) + \frac{h_3 A_w \Delta t}{C_a \rho_a V_h} \cdot (T_{out}^p - T_h^p) \quad (9)$	$Q_1 = \sum_i h_1 \cdot (A_f)_i \cdot ((T_{es})_i^p - T_h^p)$ $Q_2 = - \sum_j^N \pi R^2 u C_a \rho_a ((T_{pout})_j^p - (T_{pin})_j^p)$ $Q_3 = -h_3 \cdot A_w \cdot (T_{out}^p - T_h^p)$

表3 解析に用いた物性値および数値

A_f	12.5	m^2
A_w	34.6	m^2
V_h	19.4	m^3
L_h	5	m
R	0.05	m
u	3.6×10^3 or 1.44×10^4	m/h
h_3 (*)	2.3	$\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
f	0.4	
h_1	15	$\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
h_6	40	$\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
h_2	5.3 14.8	$(u=1\text{ m/s})$ $(u=4\text{ m/s})$ $\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$
$C_a \rho_a$	0.28	$\text{kcal/m}^3^\circ\text{C}$
$C_e \rho_e$	300	$\text{kcal/m}^3^\circ\text{C}$
λ_e	0.72	$\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$

(*) 温室表面熱通過率として、昼間は上表の h_3 を、夜間には保温用のカーテンを引くことにより上表の h_3 の代わりに $(1-f)h_3$ を用いる。

また、解析に用いた物性値および数値を表3に、温室の寸法を図4に示す。なお、図4の寸法の温室は小型であるが、同程度の寸法のものは最近家庭用の温室として用いられている。物性値および熱伝達率などは、山本ら^{1),2),5)}の文献値を参考にして決めた。熱伝達率の見積りは、保温効果の大きい二重被覆を考えている。

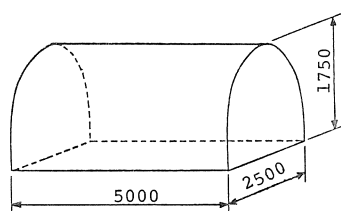


図4 温室寸法

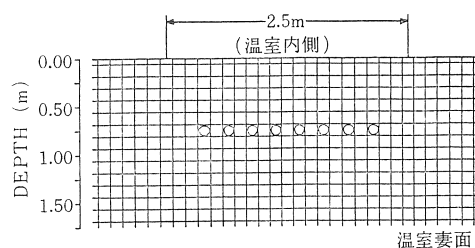
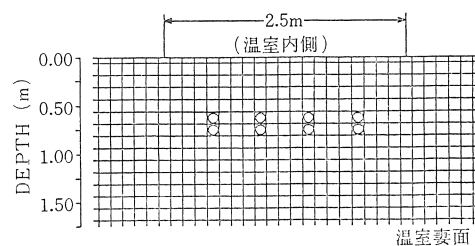
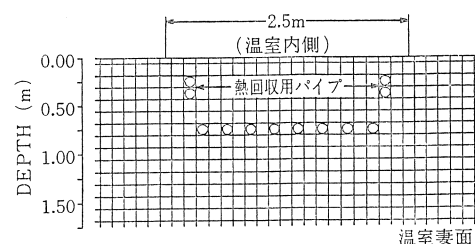
4. 結果

4.1 地中内温度分布、熱回収率等に及ぼす埋設管配置の影響

本シミュレーションにおいては、温室下方の土壌中に設置される地中蓄熱用配管の埋設位置の温室性能に及ぼす影響について明らかにするため、管配置を変化させるだけで、他の温室諸元を図4および表3に示される値とした場合について考えることとした。図5に示すような空気流量を等しくとったA～Cの3通りについての計算を行い、各々の場合について、室温の経時変化、熱回収率、地中温度分布等を求めた。なお、理由は後述するが、地表からの日周温度変化の及ばなくなる深さ（地表から約0.3～0.5m）に埋設管を配置した。

4.1.1 埋設管ピッチの影響

図5のAタイプとBタイプの場合の比較を行った。両者とも管内流速4 (m/s)、埋設管本数8本であるがBタイプの場合は、Aタイプに対して、上・下2本の埋設管を一本とみなすことにより、熱交換能力を高めて管ピッチを広げたことに相当している。図7、8にAタイプとBタイプの場合の各時刻における地中温度分布の経時変化の比較を示した。図中の等温線は全て1°C 間隔であり、後出の温度分布図についても同様である。図6に示したように、図7、8におけるA—A'は空気の入口付近、B—B'は管の中央部、C—C'は空気の出口付近の管に垂直な断面を表している。なお、図7、8および後出の図10のスケールは図7(a)

(a) タイプA ($u=1.44 \times 10^4 \text{ m/h}$, 埋設管本数8本)(b) タイプB ($u=1.44 \times 10^4 \text{ m/h}$, 埋設管本数8本)(c) タイプC ($u=1.44 \times 10^4 \text{ m/h}$, 埋設管本数12本)

メッシュ間隔=0.125(m)

図5 埋設管配置

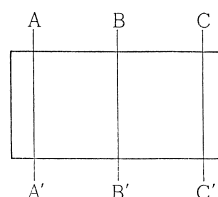


図6 温室断面位置 (図7、8、10に対応)

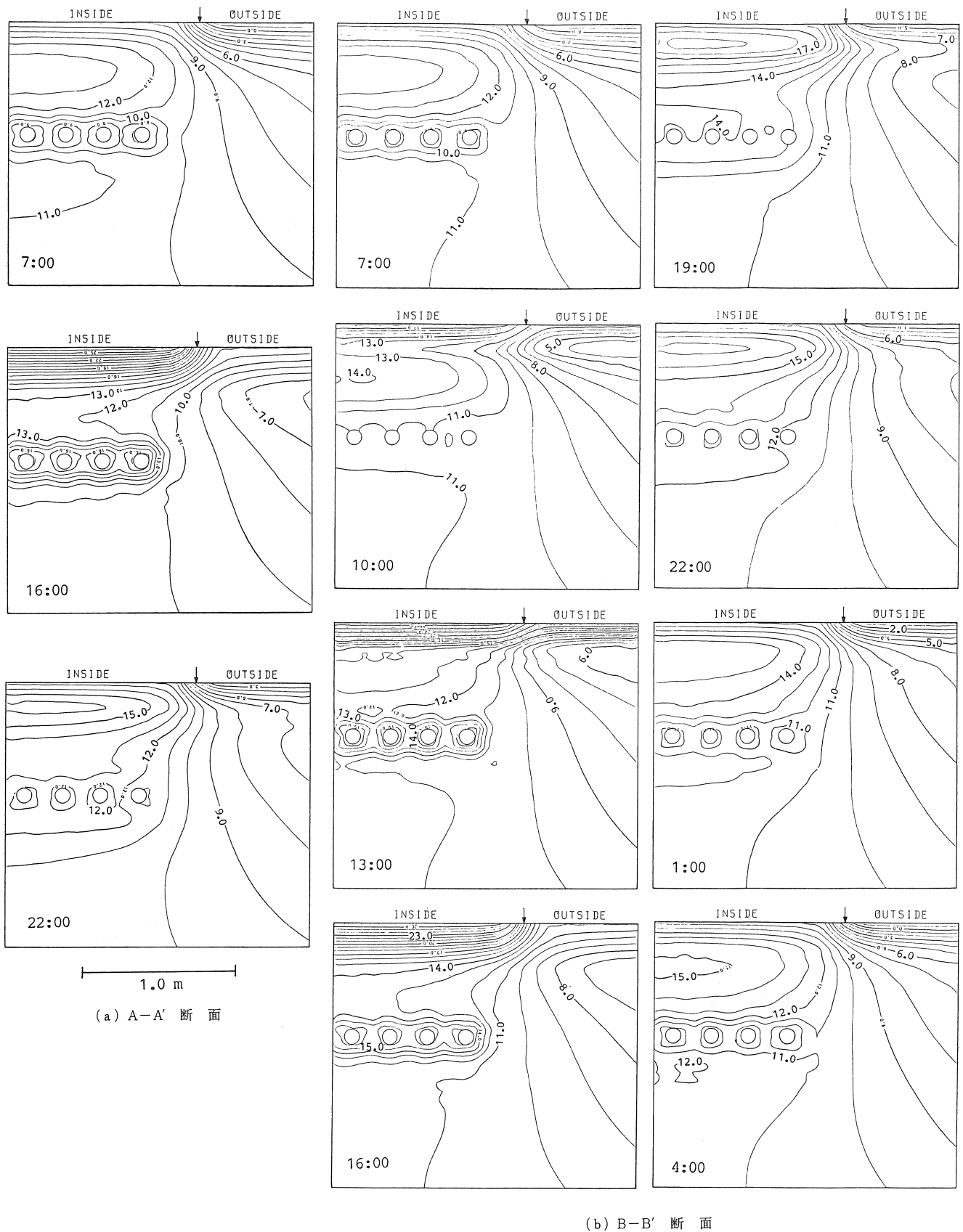
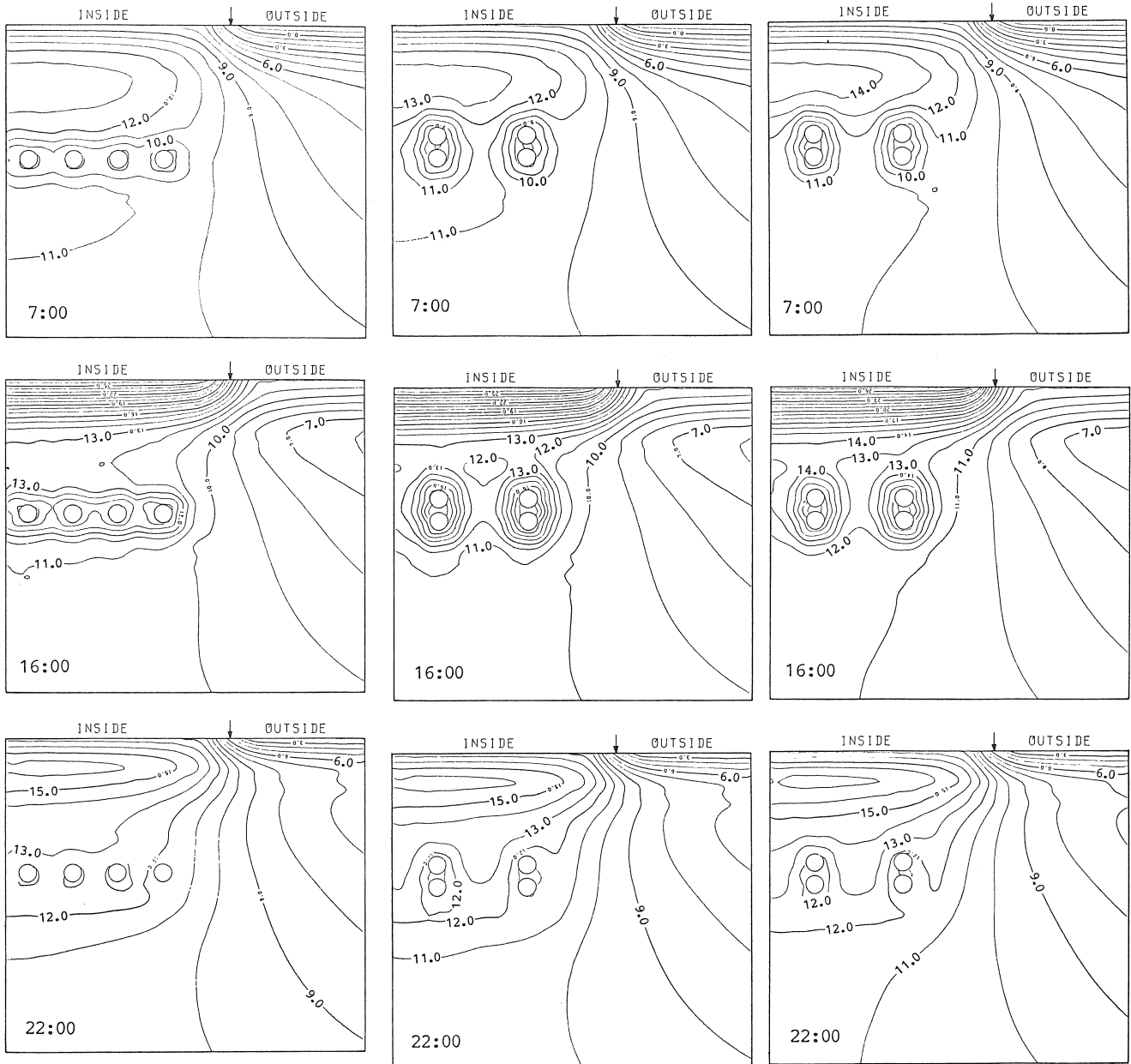


図7 地中温度分布の変化
Aタイプ ($u=1.44 \times 10^4 \text{m/h}$, 埋設管本数8本)



(c) C-C' 断面

(a) A-A' 断面

(b) B-B' 断面

図7 地中温度分布の変化

Aタイプ ($u=1.44 \times 10^4 \text{ m/h}$, 埋設管本数8本)

図8 地中温度分布の変化

Bタイプ ($u=1.44 \times 10^4 \text{ m/h}$, 埋設管本数8本)

と同様である。図7と8いずれの場合にも、管入口、中央、出口の3者をそれぞれ比較することにより地中温度分布は管軸方向には小さく、ほぼ2次元的事であること、および図7と8の比較より、埋設管近傍の温度分布を除いて、両者にはほとんど差がないことがわかる。さらにAタイプとBタイプの室温経時変化を示した図9および熱回収率を示した表4を見ても両者にほとんど差はない。この結果から、埋設管に同等の熱交換能力を与えさえすれば、管の間隔を広げて埋設管の本数を減らすことが可能であることがわかる。

ここで管の埋設深さについて考えてみる。図7(b)

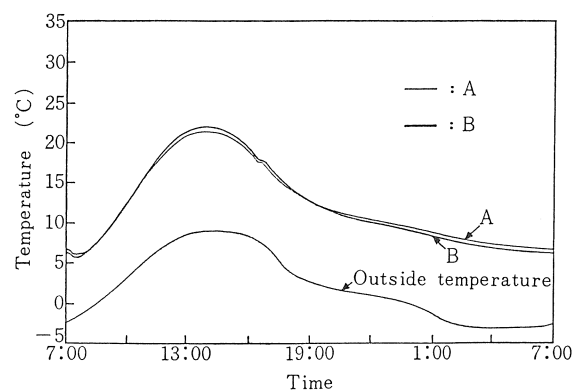


図9 埋設管間隔による室温経時変化の比較

表4 タイプAからEにおける熱回収率

	蓄熱量		回収熱量		熱回収率
A	P	3.475×10^2	P	3.169×10^2	91.2%
	S	9.880×10^2	S	3.105×10^2	31.4%
	P+S	1.336×10^3	P+S	6.273×10^2	47.0%
B	P	3.150×10^2	P	2.934×10^2	93.4%
	S	1.003×10^3	S	3.211×10^2	32.0%
	P+S	1.319×10^3	P+S	6.152×10^2	46.7%
C	P	3.465×10^2	P	3.671×10^2	105.9%
	S	9.921×10^2	S	2.774×10^2	27.7%
	P+S	1.339×10^3	P+S	6.415×10^2	47.9%
D	P	3.287×10^2	P	2.950×10^2	89.7%
	S	1.007×10^3	S	3.298×10^2	32.8%
	P+S	1.336×10^3	P+S	6.274×10^2	46.8%
E	P	3.178×10^2	P	2.492×10^2	78.4%
	S	8.555×10^2	S	6.771×10^2	79.7%
	P+S	1.173×10^3	P+S	9.263×10^2	78.9%

P: パイプでの熱の出入り

S: 温室内地表面での熱の出入り

 表の数値は単位床面積当りの熱量 (kcal/m²day)

あるいは図8の13:00および16:00にみられるように、前述のように日周温度変化の及ばない深さに管を位置させることにより、管周囲の温度分布は地表面近くの温度の高い部分と干渉していない。仮に管を地表付近に配置すると管周囲の土壌は日射により高温になり、(地表面温度は温室内空気温度より高い) 管内空気からの出熱量は大巾に減じる(あるいは空気が地中から受熱する場合も考えられる)ことになり、蓄熱効果は減少する。また、管深さをこれ以上増すことも不必要なことは明らかである。

4.1.2 熱回収用埋設管の増設に関する検討

図7, 8に示した地中温度分布の図より、夜間において、温室の内側と外側の境界地表面付近からの熱損失が大きいことがわかる。そこで、この熱の回収を目的とした熱回収用管を図5のCタイプのように埋設した場合の影響を調べた。ただし、回収用の埋設管の位置は、図7, 8の地中温度分布を参考にして、同時刻の室温より地温が高く境界地表面にできるだけ近い、熱の回収の可能な場所を選んだ。作動時間は、境界地表面付近の熱の流れが外側地表面に向いている19:00から7:00の12時間とし、流速4(m/s)で空気を流した。したがって、Cの場合には埋設管を通る分の空気流量の増加を与えることになる。

図10の温度分布およびその経時変化からわかるように、Cタイプの場合でも前出のA, Bタイプにおける場合(図7, 8)と比較して大きな変化は生じていない。また、図11に示したようにCタイプとAタイプの室温経時変化にほとんど差のみられないのは温度分布の類似から当然であり、熱回収管の設置の実用上の効

果は得られなかった。これは、図10にみられるように、管を埋めた位置が熱の回収の期待できる地温の室内気温より高いところであり、熱損失の多い境界地表面近くの等温線が密な部分からはずれており、充分な熱の回収が不可能であるためと考えられる。

4.2 温室周囲土壌の断熱の検討

前節の検討により、温室内外の境界地表面付近の熱損失を地中に埋設した管により回収できないことがわかった。そこで、図12のEのように、温室周囲の地表面付近(深さ約0.45m)を断熱(完全断熱とした)し、その影響を調べた。

図13は、断熱を施さない場合(図12のDタイプ)と施した場合の温室内気温の日周変化の計算結果を比較して示したものである。同図からわかるように、大幅な室温の上昇がみられ、断熱の効果が確認される。ま

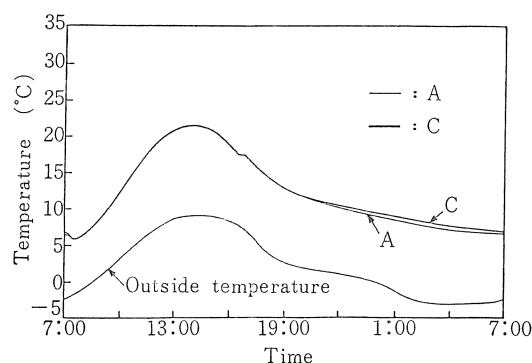
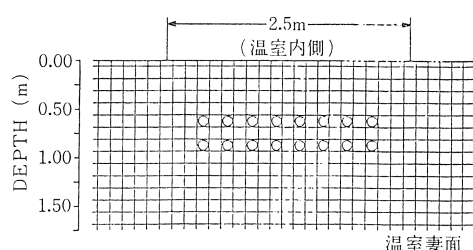
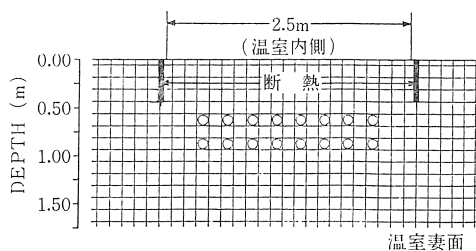


図11 熱回収用埋設管の増設による室温経時変化の比較


 (a) タイプD ($u = 3.6 \times 10^3$ m/h, 埋設管本数16本)

 (b) タイプE ($u = 3.6 \times 10^3$ m/h, 埋設管本数16本)

メッシュ間隔: 0.125 (m)

図12 埋設管および断熱部の配置

た、表4に示した熱回収率は、断熱を施すことにより46.8%から78.9%と飛躍的に増大している。なお、図13中の破線で示されているE'は、断熱深さをさらに大きく0.95mにとった場合の結果である。前記の0.45mの場合と比較して大きな変化はみられない。すなわち、断熱は、ある程度の深さ（目安として地中の温度が日周変化しなくなる深さ）まで施せば十分でありそれ以上深くても回収率の向上は期待できないと考えられる。

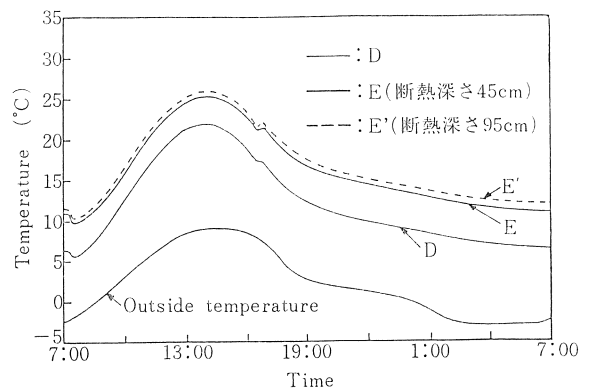


図13 温室周囲土壌の断熱による室温の経時変化の比較

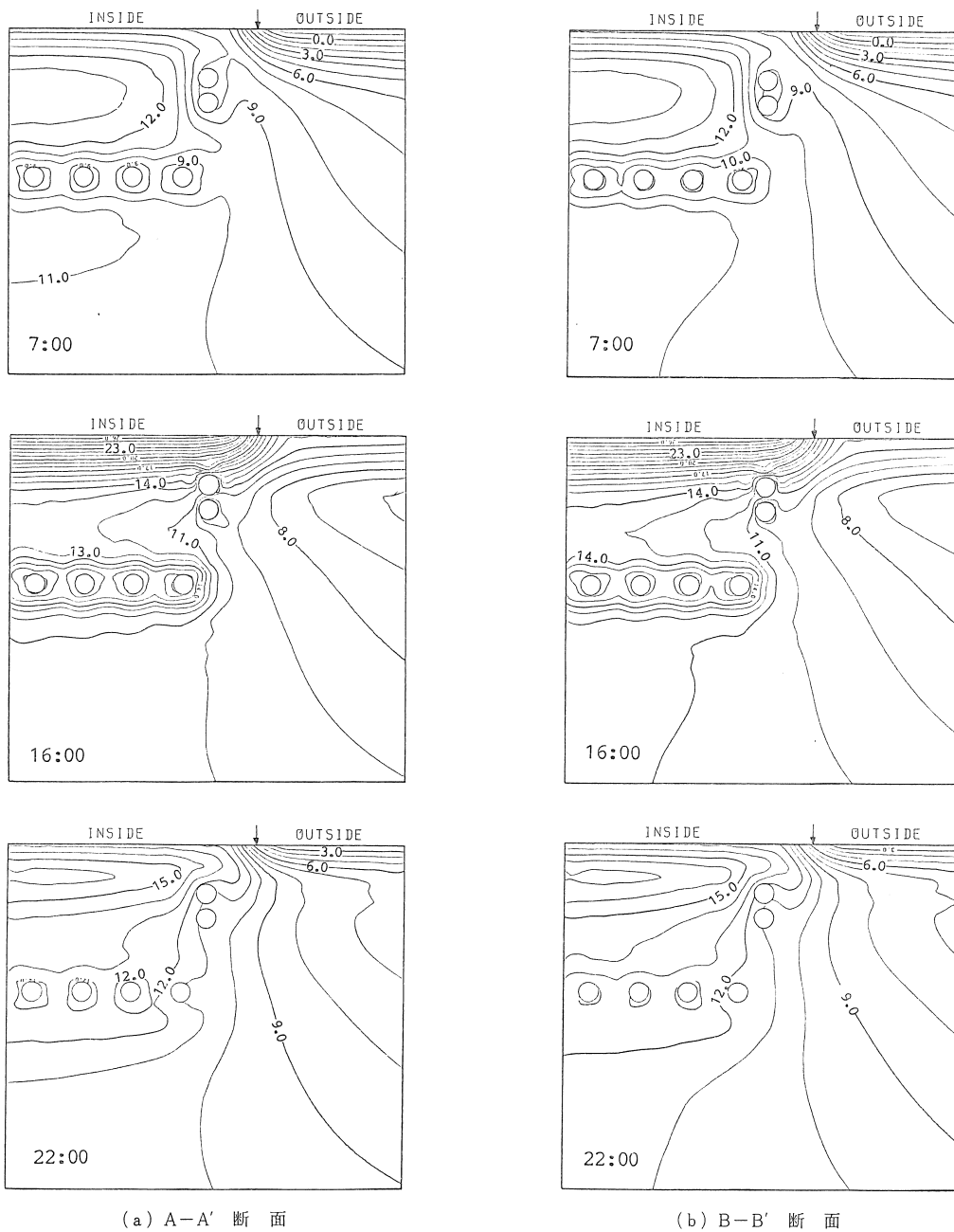


図10 地中温度分布の変化
Cタイプ ($u=1.44 \times 10^4 \text{m/h}$, 埋設管本数12本)

5. ま と め

温室下部の土壌中の埋設管に温室内空気を通し、土中蓄熱を利用する省エネルギー温室について、系の日周変動を考慮に入れた非定常3次元シミュレーションを行い、管配置を変化させたときの、3次元地中温度分布の経時変化、温室内気温変化、熱回収率などについて示した。それによると、地中蓄熱用の埋設管の配置は、位置を極端に地表に近づける場合や、管を極端に集中させる場合などを除いて、熱回収率に与える影響は小さい。

また、温室側壁直下の地中を通しての熱損失が非常に大きく、温室側壁下部の地表面付近に断熱材を垂直に設置することが熱回収率の向上に極めて有効であることが明らかとなった。

文 献

- 1) 山本雄二郎・他, 1977, 地中熱交換方式による栽培用ハウスの暖房に関する研究, 電力中央研究所報告, NO.476007
- 2) 岡野利明・他, 1982, 地中熱交換温室の熱的性質に関する非定常シミュレーションモデルの開発, 電力中央研究所報告, NO.482011
- 3) 佐々木皓二・他, 1979, 地中熱交換方式による施設暖房の実用化に関する研究(第一報), 神奈川県試験報 Vol.27, p.26~34
- 4) 高倉 直・他, 1981, 地中熱交換ハウス設計1. 定常1次元モデルによる解析, 農業気象 Vol.37, NO.3
- 5) 山本雄二郎・他, 1982, 地中熱交換ハウスの基本設計, 電力中央研究所報告
- 6) 佐々木皓二, 地中熱交換方式の暖房効果と運用上の問題点, 農業施設, 12-2, p.41~47
- 7) 伊藤 実, 岩根和夫, 地中熱交換方式による排気温の算出法について, 同上, 13-1, p.21~28
- 8) 長沢和雄, 太陽熱利用ハウスに関する試験研究について, 同上, 12-2, p.54~58
- 9) 片山功蔵・他, 伝熱工学の進展(第3巻), 1976 養賢堂
- 10) Takakura, T., et al., A Simulation Analysis of Solar Greenhouse with Underground Heat Storage Units, Energy Conservation and Use of Renewable Energies in the Bio-Industries 2, 1982.

(昭和59年11月21日 原稿受理)