クールチューブの冷却効果に関する実大住宅実験および シミュレーション解析

クールチューブによる室内熱環境の改善に関する研究 第1報

ANALYSIS OF COOLING ABILITY OF COOLING TUBES BY EXPERIMENTS AND SIMULATIONS

Study on effects of cooling tubes on indoor thermal environments Part 1

石原 修*, 張 晴 原**

Osamu ISHIHARA and Qingyuan ZHANG

In summer, the earth is considered a natural cooling source of dwellings. Cooling tubes are one of the methods making use of earth cooling. In this paper, we conducted some experiments with a dwelling house equipped with two pieces of cooling tubes. Then we made a computer program to simulate the thermal performance of a cooling tube. The validity of the program is certified by comparing the results of simulation with measured ones. By using the program, a sensitive analysis about the influence of some factors such as length, airflow rate and the depth of the tubes is made. The effects of cooling tubes in Tokyo and Sendai are also discussed.

Keywords : *cooling tube, field experiment, numerical simulation, cooling ability*

クールチューブ, 屋外実験, シミュレーション, 冷却能力

1. はじめに

夏季における住宅の自然冷却源として大地が注目されてきている。地中冷熱の利用方法として地下室¹⁾, 接地床²⁾, 床下冷気³⁾などがあるが, その1つとしてクールチューブ (Cooling tubes) の利用が考えられる。クールチューブに関する研究は数多く見られる。日本においては, 中島ら⁴⁾は円柱座標系を用いてクールチューブの出口温度, 除去熱量および地中温度に関する数値解析を行っている。木村ら^{5), 6)}はクールチューブを設置した住宅模型を用いて実験およびシミュレーションで室内の温湿度について検討している。また, 斉藤ら⁷⁾は住宅の下部の土壌に管群を埋設した温室システムの熱特性を三次元シミュレーションで解析している。藤井ら⁸⁾は自然循環によるクールチューブ利用システムの可能性を示している。長谷川⁹⁾は実大試験家屋にクールチューブを設置し, 東北地方におけるクールチューブの効果を実験的に明らかにしている。小川ら¹⁰⁾は2次元の差分モデルを用いてクールチューブの影響因子について検討を行って

る。一方, 国外では, D.W. Abrams¹¹⁾はアメリカにおけるクールチューブに関する実験結果や解析例を報告している。

本研究では, 実験および数値シミュレーションによってクールチューブの冷却能力およびそれによる住宅熱環境の改善を検討し, 設計するための基礎資料を提供することを目的とする。本報ではまず熊本の郊外にある実大試験住宅にクールチューブを設置し, その冷却効果を実験的に明らかにした。次に, 屋外地表面熱収支, 床下空間の熱挙動およびクールチューブ内の水分凝縮を考慮した3次元差分プログラムを作成した。実験データと比較することによってそのプログラムの妥当性を検証した後, それを用いてチューブの長さ, 空気流量および埋設深さについて, 冷却能力に対して感度解析を行った。さらに, クールチューブの出口温度の推定式を求めた。最後に, クールチューブの冷却能力の地域性について述べた。

* 熊本大学工学部建築学科 教授・工博

** 熊本大学工学部建築学科 助手・工博

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering Kumamoto Univ., Dr. Eng.

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering Kumamoto Univ., Dr. Eng.

記 号

a : 土の温度拡散率	m^2/h
a_s : 日射吸収率	—
A : 床下の地盤面積	m^2
AR : 大気放射量	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
c : 容積比熱	$\text{kcal}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$
CD : 伝導熱量	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
CV : 対流熱量	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
d : チューブの直径	m
DSR : 直達日射量	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
h : 太陽高度	degree
k : 蒸発比	—
K_t : 熱コンタクトンス	$\text{kcal}/\text{h} \cdot ^\circ\text{C}$
l_t : チューブの厚さ	m
L : 蒸発潜熱	kcal/kg
LR : 長波長放射量	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
LH : 蒸発潜熱量	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
Nu_m : 平均ヌセルト数	—
Pr : プラントル数	—
Q : チューブ内の空気流量	m^3/h
Re : レーノルズ数	—
SR : 水平面全天日射量	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
SSR : 天空日射量	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
t : 通 日	day
v : 風 速	m/s
V_c : 床下の容積	m^3
VR : 換気回数	$1/\text{h}$
x : 絶対湿度	kg/kg'
z : 地表面からの深さ	m
α_c : 対流熱伝達率	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$
α_r : 放射熱伝達率	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$
γ : 空気の比重量	kg/m^3
Δx : 距離差分	m
Δt : 時間差分	h
ε : 放射率	—
θ : 温 度	$^\circ\text{C}$
λ : 熱伝導率	$\text{kcal}/\text{mh} \cdot ^\circ\text{C}$
σ : ステンファン・ボルツマン常数	$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$

下付き

a : 空 気
c : 床 下
e : 土
f : 床の下面
i : クールチューブの入口
i, j, k : 差分の位置を表す番号
i : チューブ軸と垂直な方向
j : 垂直方向
k : チューブの軸方向

 m : 年平均値 n : 時 刻 o : クールチューブの出口 s : 地表面 ta : チューブ内の空気 ts : チューブの内表面

2. クールチューブに関する屋外実験

2.1 実験条件

熊本大学地域共同研究センター（北緯 $32^\circ 49'$ ，東経 $130^\circ 48'$ ）の敷地内に 2 階建の省エネルギー試験住宅（Photo 1）が建設されており，2 本のクールチューブが埋設されている。試験住宅の 1 階平面およびクールチューブの位置を Fig.1，断面図を Fig.2 に示す。チューブは直径 200 mm の塩化硬質ビニールパイプを用いており，長さは 16 m で，埋設深さは 1 m である。クールチューブの冷却効果を明らかにするため，Table 1 に示すように 5 つの実験を行った。実験 No.1～No.3 は自然換気によるものであるが，No.4 および No.5 ではクールチューブの出口に設置した換気扇によって強制送

Photo 1 The test house

Fig.1 Plan of the first floor of the test house

Table 1 Conditions of experiments on effects of cooling tubes

No.	Period	Condition of eastern tube	Condition of western tube
1	July 24 ~ Aug. 1	Closed	Natural ventilation
2	Aug. 2 ~ Aug. 11	Natural ventilation	Closed
3	Aug. 12 ~ Aug. 17	Natural ventilation	Natural ventilation
4	Sept. 7 ~ Sept. 11	Closed	Forced ventilation by a fan (133m ³ /h)
5	Sept. 12 ~ Sept. 17	Forced ventilation by a fan (148m ³ /h)	Closed

Fig. 2 Section of the test house

風を行っている。試験家屋は2階建であるが、クールチューブを利用する対象となる空間は1階の居室と想定する。いずれの実験でも外気に面した窓等は閉鎖しており、クールチューブから取り入れた外気が1階の室内を冷却した後吹き抜けを経て、上部換気口から室外へ排出される。また、すべての実験において、南室と北室との間の間仕切りは開放しており、南東室と北東室、南西室と北西室をそれぞれ1室とみなす。東、西室の容量はいずれもほぼ47m³である。強制送風を行った場合、西側と東側のクールチューブの換気量を熱線風速計で測定したが、その平均換気量は西側で133m³/h、東側では148m³/hである。チューブ内の空気温度を入口および出口で測定している。

2.2 自然換気による実験結果

予備実験として、試験住宅の両側のクールチューブを閉鎖して自然室温を測定し、その結果をFig.3に示す。南西室、南東室の室温の差はわずかであり、室の方位による室温の差が小さいことを示している。

実験No.1は東側のクールチューブを閉鎖し、西側のチューブを開放して、室温の上昇による煙突効果の吸引

Fig. 3 Weather conditions and fluctuation of air temperature of southeast room (SE room) and southwest room (SW room) in the cases when the cooling tubes are not used in both rooms

Fig. 4 Weather conditions and fluctuation of air temperature of southeast room (SE room) and southwest room (SW room) in the cases when only western cooling tube is naturally ventilated (July 28~29) and when only eastern tube is naturally ventilated (Aug. 5~6)

力で外気をクールチューブを通して取り入れ、地中冷熱を利用しようとするものである。南東室と南西室の空気温度をFig.4 (July 28~29)に示す。午前中にはクールチューブを利用している南西室の温度は南東室に比べ僅かに低いが、午後は逆に高くなっており、クールチューブの効果はほとんど見られない。それはFig.4に示すように、17時の前に室内空気温度が外気温よりも低く、煙突効果による吸引力は生じないためである。

実験No.2では西側のクールチューブを閉鎖し、東側のチューブを開放した。そのときの気象条件および室温の経時変化をFig.4 (Aug. 5~6)に示す。実験No.1と同じように煙突効果の吸引力によるクールチューブの効果は見られなかった。

Fig.5は実験No.3の結果を示す。東側と西側のクールチューブを同時に開放しており、両室の室温の相違が

Fig. 5 Weather conditions and fluctuation of air temperature of southeast room (SE room) and southwest room (SW room) in the cases when both cooling tubes are naturally ventilated

わずかである。

2.3 強制送風による冷却効果

実験 No. 1～No. 3 の結果によれば、煙突効果による吸引力でクールチューブを利用するのは困難であり、換気扇による強制送風の必要があると思われる。

実験 No. 4 は西側のクールチューブの出口に換気扇を設けた場合の冷却効果を実験したものである。実験時の外気温、水平面全天日射量、南西室と南東室の室温および西側のクールチューブの出口温度を Fig. 6 に示す。南西室にクールチューブによって地中冷熱を利用しているため、その空気温度は南東室より低い。両室の空気温度差は最大 1°C 以上である。また、日中において南西室のクールチューブの出口温度は入口温度（外気温）より常時低くなっている。9 月 8 日の日中、入口温度 33°C に対して、出口温度は 28°C 弱となっており、その差は 5°C 以上となっている。入口と出口の空気の顕

Fig. 6 Fluctuation of southeast room (SE room) temperature, southwest room (SW room) temperature and outlet temperature of a cooling tube used at southwest room

Fig. 7 Fluctuation of southwest room (SW room) temperature, southeast room (SE room) temperature and outlet temperature of a cooling tube used at southeast room

熱の差、すなわち冷却顕熱量にすると、約 220 kcal/h となる。一方、夜間においては、入口と出口の空気温度が日中と逆転しており、土への蓄冷過程を示唆している。

実験 No. 5 では西側のチューブを閉鎖し、東側のクールチューブの出口に換気扇を取り付けた。その結果を Fig. 7 に示す。クールチューブを利用している南東室は常に南西室より低温である。日射や外気温の影響で南西室と南東室の室温差は午前中は小さいが、午後は大きくなり、その状態は次の朝まで続く。両室の差は最大 1.6°C である。また、夜間（20 時～6 時）における外気温が 23°C 前後まで下がっているため、出口温度はかえって外気温より高くなっている。夜間の蓄冷は日中の冷却効果に寄与していると考えられる。

3. クールチューブのシミュレーション

3.1 計算モデルと計算式

前章で試験家屋を用いてクールチューブの効果を明らかにしたが、屋外実験には気象条件、試験家屋の仕様およびその周辺の環境などの影響を受けやすい。したがって、屋外実験のみで各因子の影響、いわゆる感度解析を行うのは困難である。一方、数値シミュレーションは屋外実験におけるこのような短所を補うことができる。そこで本章ではクールチューブのシミュレーションプログラムを作成し、その妥当性を確かめた後、それを用いてチューブの長さ、流量および埋設深さなどの冷却能力に及ぼす影響を調べる。

計算に用いる物理的モデルを Fig. 8 に示す。換気の駆動力として自然換気と強制送風があるが、本計算モデルでは強制送風を前提とする。

地中温度場は次のような熱伝導方程式で表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \dots \dots \dots (1)$$

Fig. 8 The simulation model

この式を差分で近似し、地中要素、地表面要素および床下地表面要素の差分式、チューブ内の熱収支式および水分収支式を付録に記述する。

地中の初期温度を推定するために、最近1年間（平成元年7月～2年6月）の月平均外気温を用いて調和分析を行い、1年間の外気温をフーリエ級数で表す。

$$\theta_{at} = \theta_m + \sum a_n \cos \{n\pi/6 \cdot (t/30.42 + 0.5)\} + \sum b_n \sin \{n\pi/6 \cdot (t/30.42 + 0.5)\} \cdots (2)$$

ここで、 a_n , b_n はフーリエ係数である。

さらに、地表面温度が外気温に等しいと仮定し、周期定常の境界条件における地中温度 θ_{zt} を求め、これを地中温度の初期値として与える。

$$\theta_{zt} = \theta_m + \sum \exp \{ -\sqrt{\pi/(a \cdot 12)} \cdot z \} \cdot [a_n \cos \{n\pi/6 \cdot (t/30.42 + 0.5)\} - \sqrt{\pi/(a \cdot 12)} \cdot z + b_n \sin \{n\pi/6 \cdot (t/30.42 + 0.5)\} - \sqrt{\pi/(a \cdot 12)} \cdot z] \cdots (3)$$

計算対象となる土の深さ d は5mとしており、その境界では、(3)式で求めた温度を与える。他の境界を断熱境界と仮定する。また、水平方向の計算範囲 w は3mである。

3.2 シミュレーションプログラムの検証

前節のようにして作成したシミュレーションプログラムを用いて、実験 No. 4 における西側のクールチューブのシミュレーションを行った。地中の水分移動に伴う熱移動や、土の温度および含水率の熱常数に及ぼす影響を考慮せず、土の温度拡散率を $0.0014 \text{ m}^2/\text{h}$ 、熱伝導率を $0.53 \text{ kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$ と一定した¹²⁾。また、時間差分を1時間、距離差分を0.2mとした。実験時の日射量、外気温と湿度をプログラムに入力し、チューブの長さや建物の方角等は試験住宅に合わせて計算を行った。実験

Fig. 9 Comparison between measured and calculated values of outlet air temperature of a cooling tube

No. 4 における西側のクールチューブの計算結果を例として Fig. 9 に示す。計算値は実験結果とよく一致しており、両者の差は 0.6°C 以内である。また、実験 No. 5 における東側のクールチューブのシミュレーションにおいても、同じような結果を得た。

4. 冷却能力に対する感度解析

4.1 チューブの長さについて（ケース1）

上述した計算プログラムを使用し、クールチューブの冷却能力およびその影響要素について調べる。計算は Table 2 に示す6のケースについて行っている。床下の換気回数を3回とする。また、チューブの直径を200mmとする。

計算に必要な気象条件として熊本市の標準気象データを用いる。計算の助走期間は1年間とし、クールチューブの使用期間は8月1日～31日とする。

クールチューブの入口と出口における空気のエントルピーの差を冷却エネルギーと定義し、ケース1における8月15日の14時のチューブ内の空気温度、絶対湿度と入口からの距離との関係を Fig. 10 に示す。入口から20mまで空気温度はほぼ距離に比例して下がっているが、それ以降温度の低下は緩やかになっている。チューブの

Table 2 Factors discussed in sensitive analyses

Factor	Case	Length (m)	Airflow rate (m^3/h)	Depth (m)	Numbers of tubes
Influence of length	1	40	100	2	1
Influence of airflow rate	2	20	100	2	1
	3	20	200	2	1
	4	20	300	2	1
Influence of depth	5	20	100	1	1
	6	20	100	3	1

Fig. 10 Relation between air temperature, humidity in the tube and distance from the inlet of the tube (Aug. 15, 14:00, Kumamoto)

Fig. 11 The maximum, average, minimum temperature and absolute humidity, and cooling energy of the tube at different distance from the inlet of the tube

入口温度の 30.6°C に対して 40 m では出口温度は 23.4°C となっており、その差は 7.2°C になっている。チューブ内空気絶対湿度は入口から 20 m まで変化はなかったが、それ以降はチューブの表面における水分凝縮のため下がり始める。クールチューブが十分に長い場合、温度低下で示す顕熱冷却量だけでなく、チューブの内表面温度が空気の露点温度以下にもなり得るため、クールチューブによる除湿効果も期待できる。

次に、クールチューブの入口から 5 m , 10 m , 15 m , ... 40 m における空気温度と絶対湿度の $8\text{月}1\text{日} \sim 31$ における最大値、平均値および最小値を求めて Fig. 11 に示す。 0 m における値は外気の状態を示す。入口からの距離につれてチューブ内の空気温度の変動幅は小さくなっていく。外気の温度変動幅の 15.5°C に対して、 40 m では 3°C になっている。言い換えれば、外気温度のいかんにかかわらず出口温度は常に $23.2 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ の範囲に入る。また、最低温度については外気に比較して、出口は高くなっており、夜間における地中への蓄冷を示唆している。絶対湿度の変化を見ると、最低値は変わっていないが、最高値と平均値にはわずかな低下が認められる。棒グラフで示しているのは冷却エネルギー量で、顕熱と潜熱を分けて示す。入口からの距離が 10 m 以下では潜熱成分はなく、凝縮が起こらないことを意味して

Fig. 12 Fluctuation of outlet air temperature of cooling tubes with airflow rate of 100, 200 and $300\text{ m}^3/\text{h}$

いる。 20 m 以下では、潜熱成分は全冷却エネルギーの 10% 以下である。 40 m の出口では潜熱成分は 600 kcal/day となり、全冷却エネルギーの約 15% である。

4.2 流量について (ケース 2, 3, 4)

チューブを流れる空気の量はクールチューブの効果の重要なパラメータである。上記の検討は流量を $100\text{ m}^3/\text{h}$ として計算したが、次に流量をそれぞれ $200\text{ m}^3/\text{h}$, $300\text{ m}^3/\text{h}$ にし、冷却エネルギー量に及ぼす影響を調べる。チューブの長さや埋設深さはそれぞれ 20 m , 2 m である。4.1での検討によれば、チューブの長さが 20 m である場合、チューブの内表面温度はほとんど空気の露点温度以下に低下しないため、潜熱成分を無視することができ、以下に用いる冷却エネルギー量とは入口と出口の空気の顕熱量の差を意味する。また、以下の検討においては、ケース 2 を比較の基準ケースとする。

熊本市の標準気象データを用いてケース 2 (流量 = $100\text{ m}^3/\text{h}$)、ケース 3 (流量 = $200\text{ m}^3/\text{h}$) およびケース 4 (流量 = $300\text{ m}^3/\text{h}$) のシミュレーションを行い、 $8\text{月}15\text{日} \sim 17\text{日}$ の間の計算結果を例にして Fig. 12 に示す。全体的にはケース 2 における出口温度は最も低く、ケース 4 は最も高い。ケース 3 における出口温度は両者の間にあり、ケース 4 における変動に近い。外気温の高い 17日 においては、ケース 2, 3, 4 の出口温度はそれぞれ外気温より最大 8.5 , 6.0 , 4.5°C 低い。

Fig. 13 に 8月 におけるチューブの出口空気温度の最大、平均および最小値、日平均冷却エネルギーと流量との関係を示す。外気温の最高、平均および最低値も参考に示す。流量の増大にしたがって、出口の空気温度が高くなっていく。流量 $100\text{ m}^3/\text{h}$ のときの平均値 23.9°C に対して、流量が $300\text{ m}^3/\text{h}$ になると、平均出口温度が 25.7°C となっている。冷却エネルギー量から見ると、流量が大きいほど増大する傾向にあり、流量 $100\text{ m}^3/\text{h}$ の場合の 2200 kcal/day に対して、 $300\text{ m}^3/\text{h}$ の場合には 3000 kcal/day となっている。流量が大きいほうは地

Fig. 13 The maximum, average, minimum temperature at the outlet and cooling energy of the tube at the airflow rate of 100, 200 and 300 m³/h

Fig. 15 The maximum, average and minimum temperature at the outlet and cooling energy of the tube at the depth of 1 m, 2 m and 3 m

Fig. 14 Fluctuation of outlet air temperatures of cooling tubes with depth of 1 m, 2 m and 3 m

Fig. 16 Correlation between the outdoor air temperature and the outlet temperature of the cooling tube at the tube length of 20 m, airflow rate of 100 m³/h and depth of 2 m in Kumamoto

中から多くの冷熱が取れることになるが、パッシブクーリングにおいては温度の低い冷熱は「質」の高い冷熱と考えられ、流量についてクールチューブや建物の仕様等を総合的に考える必要がある。

4.3 埋設深さについて (ケース 5, 6)

次に、チューブの埋設深さがチューブの冷却効果に及ぼす影響について調べる。埋設深さを 1 m (ケース 5), 3 m (ケース 6) とした場合のシミュレーションを行い、ケース 2 の結果と比べ、8 月 15~17 日の計算結果を例にして Fig. 14 に示す。深さが 1 m の場合は、地上の影響を受けやすく、チューブの出口温度は最も高い。2 m の場合、出口温度はケース 5 より単純に 1.2°C 前後低下する。また、3 m の場合は更に約 0.7°C 低下する。

Fig. 15 にケース 5, 2, 6 におけるクールチューブの出口温度の最高、平均、最低値および冷却エネルギーを示す。チューブの埋設深さが深いほど、出口温度が低く、冷却エネルギー量が増大するが、設置する際の費用も考えなければならない。

5. クールチューブの出口温度の推定式

クールチューブの入口温度 (外気温) と出口温度の関係がわかれば、クールチューブの設計に有効であると思われる。しかし、空気はクールチューブを介して土との熱交換は非定常な過程であるため、ある入口温度に対して出口温度は必ずしも一定ではない。そこで本論文において検討した 6 のケースについて入口と出口の相関を求めてみた。Fig. 16 はケース 2 における入口温度と出口温度の相関を示す。8 月 1 日~5 日の間は出口温度がそれ以外の期間における値より若干低く、計算を始めてから暫くの間、地中温度が自然地中温から徐々に上昇し、周期定常状態に達する助走期間として考えられ、相関図から外している。Fig. 16 によれば、入口と出口との間、相関係数 0.99 の高い相関を示しており、回帰式による推定の誤差は 0.5°C 以内である。

Table 3 は本論文で扱っている各ケースにおける入口空気温度とクールチューブの出口空気温度の回帰式および相関係数を示す。ケース 1 を除いて入口と出口は 0.98 以上の相関を示している。これらの回帰式を用い

Table 3 Expression dictating outlet air temperature of a cooling tube (Kumamoto)

Case	Expression	Coefficient of correlation	Overall expression
1	$\theta_o = 0.118 \theta_i + 19.27$	0.776	
2	$\theta_o = 0.351 \theta_i + 14.34$	0.990	$\theta_o(Q) = 19.168 - 0.055Q + 0.0000675Q^2$ $+ (0.0927 + 0.0029875Q$ $+ 0.000004045Q^2) \theta_i$
3	$\theta_o = 0.526 \theta_i + 10.87$	0.992	
4	$\theta_o = 0.625 \theta_i + 8.74$	0.997	
5	$\theta_o = 0.371 \theta_i + 14.97$	0.986	$\theta_o(d) = 0.07945d^2 - 0.38665d + 15.4341$ $+ (0.01055d^2 - 0.05205d + 0.4129) \theta_i$
2'	$\theta_o = 0.351 \theta_i + 14.34$	0.990	
6	$\theta_o = 0.352 \theta_i + 13.56$	0.990	

*Repeated for the purpose of comparison

Fig. 17 Correlation between the outdoor air temperature and the outlet temperature of the cooling tube at the tube length of 20 m, airflow rate of 100 m³/h and depth of 2 m in Tokyo **Fig. 18** Correlation between the outdoor air temperature and the outlet temperature of the cooling tube at the tube length of 20 m, airflow rate of 100 m³/h and depth of 2 m in Sendai

て、熊本におけるクールチューブの出口温度、冷熱エネルギーを簡単に推定することができる。

クールチューブの効果の地域性を調べるために、東京および仙台の標準気象データおよびケース2と同じパラメータを用いてクールチューブのシミュレーションを行う。東京および仙台における入口と出口の相関図を

Fig. 17 と Fig. 18 に示す。Fig. 17 に示すように東京において、入口温度と出口温度は高い相関を示している。しかし、Fig. 18 に示す仙台の場合、一定の入口温度に対して、出口温度は 2°C 以上のばらつきが見られる。その原因として、チューブ内の凝縮が考えられる。仙台においては、地中温度が低く、凝縮が起こりやすい。外気の絶対湿度が低い時に凝縮せず、出口温度は低いが、外気の絶対湿度が高い時、チューブの内表面に生じる凝縮に伴う凝縮熱により、空気温度は凝縮がない場合ほど低下しない。

6. 終わりに

本論文では実大試験住宅を用いて、自然換気と強制送風によりクールチューブの冷却効果に関する実験を行った。また、地表面熱収支、建物の影響およびチューブ内の水分凝縮を考慮した 3 次元熱伝導計算プログラムを作成し、チューブの長さ、流量および埋設深さの冷却能力に及ぼす影響を検討した。さらに、クールチューブの入口温度と出口温度の相関が高いことが分かり、その回帰式を示した。本研究で得た知見を次のようにまとめられる。

- ① 自然換気を行った場合、顕著な冷却効果は得られなかった。
- ② 熊本の夏季において、強制送風により 1 本のクールチューブを利用した室の空気温度は、使用していない室より日中 1°C 以上低下する結果を得た。
- ③ 本研究で開発したクールチューブのシミュレーションプログラムは十分な精度を有する。
- ④ 熊本の 8 月において、チューブの長さが 40 m になると、出口温度が 23.2 ± 1.5°C の範囲内に入る。その場合、冷却エネルギー量の月平均値は 4 000 kcal/day 以上になる。
- ⑤ 流量が 100 m³/h から 300 m³/h に増えると、冷却エネルギー量は増大するが、出口温度が高くなる。
- ⑥ 埋設深さが 1 m から 2 m, 3 m になると、出口温度が低くなる。

本論文では、実大試験住宅を用いた実験およびシミュレーションによってクールチューブの冷却能力を解析したが、九州のような蒸暑地域において 1 本のチューブのみで快適な住宅室内熱環境を造ることは難しいことが判明した。したがって、必要なクールチューブの本数の検討も必要と思われる。また、室内の空気温度が外気温より低いとき、クールチューブ内に室内空気を強制循環させる方法も有効と考えられる。これらの問題について第

2 報以降に検討する予定である。

付 録

地中温度は熱伝導方程式（本文の式（1）の3次元 Explicit 形差分式を用いて計算する。すなわち、

$$\frac{\theta_{i,j,k,n} - \theta_{i,j,k,n-1}}{\Delta t} = \frac{a}{\Delta x^2} (\theta_{i+1,j,k,n-1} + \theta_{i-1,j,k,n-1} + \theta_{i,j+1,k,n-1} + \theta_{i,j,k+1,n-1} + \theta_{i,j,k-1,n-1} - 6\theta_{i,j,k,n-1}) \quad (1)$$

地表面要素の熱収支は次式で表される。

$$c_e \frac{\Delta x}{2 \Delta t} (\theta_{i,1,k,n} - \theta_{i,1,k,n-1}) = CD + CV + SR + LR + LH \quad (2)$$

ただし、

$$CD = \frac{\lambda_e}{\Delta x} (\theta_{i,2,k,n-1} + \theta_{i+1,1,k,n-1} + \theta_{i-1,1,k,n-1} + \theta_{i,1,k+1,n-1} + \theta_{i,1,k-1,n-1} - 5\theta_{i,1,k,n-1}) \quad (3)$$

$$CV = \alpha_c (\theta_{a,n} - \theta_{s,n}) \quad (4)$$

$$SR = (DSR \cdot \sinh + SSR) \cdot \alpha_s \quad (5)$$

$$LR = AR - \varepsilon \sigma T_{s,n}^4 \approx AR - 4.88 \varepsilon (53.8 + 0.956 \theta_{s,n}) \quad (6)$$

$$LH = k \frac{\alpha_c}{c_a} (x_{a,n} - x_{s,n}) L \quad (7)$$

$$\alpha_c = 4.0 + 1.63 v^{1.3} \quad (8)$$

式⑦の中のkは蒸発比¹⁴⁾であり、その値を0.6とする。

また、床下の土間表面温度を計算するとき、床下空間の熱収支を解析する必要がある。ここでは計算を簡略化するために、床の下面で断熱していると仮定し、床下空間と上部の建物の熱授受がないものとする。したがって、床の下面での熱収支は放射成分と対流成分との和になり、次式で表すことができる。

$$\alpha_r (\theta_{s,n} - \theta_{f,n}) + \alpha_{cf} (\theta_{can} - \theta_{f,n}) = 0 \quad (9)$$

床下空氣の熱収支は次のように示される。

$$c_a V_c (\theta_{can} - \theta_{can-1}) / \Delta t = c_a V_R V_c (\theta_{an} - \theta_{can}) + \alpha_{ce} A (\theta_{s,n-1} - \theta_{can}) + \alpha_{cf} A (\theta_{f,n-1} - \theta_{can}) \quad (10)$$

床下土間表面の熱収支は基本的に室外の地表面熱収支②と同じであるが、日射SRと天空放射AHがゼロとなる。このように⑨、⑩および床下土間表面の熱収支を連立させて解き、床下土間表面温度を求める。

チューブの内表面の温度が空氣の露点温度より低い時、その表面で水分の凝縮が生ずる。本論文では凝縮した水分は全部排水されるものと仮定し、水滴がチューブの内表面に付着し再び蒸発することを考慮しない。なお、同一断面のチューブの内表面温度 $\theta_{ts,k}$ を一様と仮定する。チューブの内表面の熱収支を次式で表す。

付図—①

$$CV + CD + EV = 0 \quad (11)$$

式⑪に対応する差分式は次のようになる。

$$\alpha_c \pi d \Delta x (\theta_{ta,k,n} - \theta_{ts,k,n}) + K_t (\theta_{i,j+1,k,n-1} + \theta_{i,j-1,k,n-1} + \theta_{i,j,k+1,n-1} + \theta_{i,j,k-1,n-1} - 4\theta_{ts,k,n-1}) + EV = 0 \quad (12)$$

ただし、

$$EV = \frac{\alpha_c}{C_s} \pi \cdot d \cdot \Delta x \cdot L \cdot (x_{ta,k} - x_{ts,k}) \geq 0 \quad (13)$$

K_t は熱コンタクトランスである。 Δx がチューブの外径に等しいことに注意しながら、付図—①からわかるように、 K_t は次式のようにになる。

$$K_t = \frac{1}{\frac{\Delta x}{2\lambda_e} + \frac{\Delta x^2/2 - \pi \Delta x^2/8}{\Delta x \lambda_e} + \frac{l_t}{\lambda_t} \cdot \Delta x^2} \cdot \Delta x^2 = \frac{\Delta x}{\frac{8-\pi}{8\lambda_e} + \frac{l_t}{\lambda_t} \cdot \Delta x} \quad (14)$$

チューブを長さ方向に地中の差分距離 Δx と同じように差分化し、その1つに関する空氣の熱平衡式は次のようになる。

$$\frac{c_a \cdot \pi \cdot d^2/4 \cdot \Delta x \cdot (\theta_{ta,k,n} - \theta_{ta,k,n-1})}{\Delta t} = C_a \cdot Q \cdot (\theta_{ta,k-1,n} - \theta_{ta,k,n}) + \alpha_{ct} \pi d \Delta x (\theta_{ts,k,n} - \theta_{ta,k,n}) \quad (15)$$

チューブ内表面における空氣との対流熱伝達率は次式により求められる。

$$Nu_m = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/4} \quad (16)$$

チューブ内の空氣の絶対湿度は次式で表す。

$$\frac{\gamma \pi \cdot d^2/4 \cdot \Delta x \cdot (x_{ta,k,n} - x_{ta,k,n-1})}{\Delta t (1 + x_{ta,k,n-1})} = \gamma Q \frac{(x_{ta,k-1,n} - x_{ta,k,n})}{(1 + x_{ta,k,n-1})} - EV/L \quad (17)$$

チューブ内の表面温度、空氣温度および絶対湿度を式⑫、⑮および⑰を連立させて求める。

参考文献

- 1) Inoue, T., Matsuo, Y. and Honma, T. : Estimation of the Thermal Performance of Underground Architecture, Proc. of Int. Symp. on Earth Architecture, pp.153~159, 1985.
- 2) Watanabe, T., Urano, Y., Hayashi, T. and Ryu, Y. : Case Study on Thermal Insulation Systems for the Earth-Contact Floor, Proc. of Int. Symp. on Earth Architecture, pp.427~437, 1985.
- 3) Zhang, Q., Katayama, T., Hayashi, T., Shiotsuki, Y. and Tsutsumi, J. : Combined Effect of Earth Cooling and Ventilation on Passive Cooling of Dwellings, Trans. of AIJ, No.392, pp.1~10, Oct., 1988.
- 4) 中島康孝, 伊藤幸雄, 鈴木厚志: クールチューブのシミュレーション解析, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.189~192, 1982年10月.
- 5) 木村建一, 前田健二, 小野島一: クールチューブの涼房効果に関する研究, その1 夏季および冬季の実験効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.675~676, 1983年9月.
- 6) 木村建一, 前田健二, 小野島一: クールチューブの涼房効果に関する研究, その2 数値計算による効果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.677~678, 1983年9月.
- 7) 齊藤彬夫, 宇高義郎, 渋谷幸生: 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, 太陽エネルギー,

- Vol. 11, No. 5, pp. 21~30, 1985 年.
- 8) 藤井 哲, 小山 繁: 太陽熱による空気の自然循環と室内温度調節に関する研究, 文部省科学研究費補助金・エネルギー特別研究・自然エネルギーの研究・研究成果報告書, pp. 27~30, 1987 年.
 - 9) 長谷川房雄, 木村建一, 吉野 博, 石川善美: パッシブソーラーシステム試験家屋に設置したクールチューブの冷却性能に関する研究 (その 1), 太陽エネルギー, Vol. 14, No. 4, pp. 23~30, 1988 年.
 - 10) 小川順一, 浦野良美, 渡辺俊行, ほか: 蒸暑地域における付設地下室住宅の涼房効果 その 3, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 31 号, pp. 149~152, 1989 年.
 - 11) D. W. Abrams: Low Energy Cooling, Van Nostrand Rinehold, pp. 256~278, 1986.
 - 12) 松尾 陽, 横山浩一, 石野久弥, 川元昭吾: 空調設備の動的熱負荷計算入門, 日本建築設備士協会, p. 55, 1980 年.
 - 13) KEN-ICHI KIMURA: Scientific Basic of Air Conditioning, Applied Science Publishers, 1977.
 - 14) 林 徹夫, 片山忠久, 塩月義隆, 張 晴原: 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, 九州大学総合理工学研究科報告, 第 9 巻, 第 1 号, pp. 73~78, 1987 年.
 - 15) 甲藤好郎: 伝熱学特論, 養賢堂, p. 43, 1984 年.
- (1991 年 4 月 10 日原稿受理, 1991 年 9 月 13 日採用決定)
-