

床下暖房システムにおける放熱器配置および2階開口位置の検討

Study on the Heater Positioning and the Location of Opening on the Convection Wall for Convective Warm Air Heating System using Crawl Space

本間義規^{*1}, 仁木康介^{*2}
Yoshinori HONMA^{*1} and Kousuke NIKI^{*2}

To examine the distributing warm air to the second floor rooms using under floor heating system, the combined steady state thermal and ventilation network simulation are executed. It is clarified that the heat supply using partition wall cavity (convection walls) is very important to transport warm air to the 2F rooms. The locations of the inlet openings also influence a bit to the formation of homogeneous room temperature in a house. The higher the height of openings on the convection wall is, the smaller the temperature difference among the 1F and 2F heating rooms become.

Keywords: Air convection, Heating system, Crawl space
空気循環, 暖房システム, 床下空間

1.はじめに

床下暖房システムは、床下空間に集中して熱源（放熱器）を配置し、住宅の構造空隙をダクト代わりにして、空気対流により熱を配分する暖房システムである。空気対流を利用する暖房方式のため、一般に換気システムと組み合わせて計画することが多く、熱量配分と同様に新鮮空気の配分計画も必要になる。基本的に床下空間から暖められた空気（暖気）が各室に供給されるが、暖気の移動経路は温められるため、暖気循環経路部分は壁面暖房にもなるという利点もある。

床下暖房システムでセントラルヒーティングを行う場合、2階への暖気循環が必要で、そのための経路計画はもとより、どこに放熱器を配置するののかの見極めが重要である。こうした暖房設計は、「日本建築学会環境工学委員会熱環境小委員会基礎断熱床下空間利用の暖房・換気方式に関する研究SWG」が編集した「床下暖房システムマニュアル」（北海道住宅環境協議会）¹⁾で基本的な設計基準が示されており、また、その学術的なバックグラウンドは参考文献²⁾に詳述されている。しかし、床下空間と暖気循環用間仕切壁での熱量配分や、一般的に床面に設置される開口の位置の変更など、さまざまな設計要求に対して十分な説明がなされているわけではない。そこで、本研究では数値シミュレーションにより、上記2点の課題、すなわち、熱源配置と開口位置の影響について検討を行った。

2. 数値シミュレーションの詳細

2.1 シミュレーション手法

開口の位置と量、設計外気温度、放熱量とその放熱器の配置場所を条件として与え、住宅内での空気移動量と経路および各室温度を求める。ここでは、定常伝

熱と換気回路網を連成したシミュレーションを行う。具体的には、定常伝熱における各室の熱収支式と、換気回路網計算（節点圧力を仮定し、修正ニュートンラフソン法により風量残差がゼロになるまで収束計算する）を連成させ、各室温の前時間ステップとの残差絶対値のノルムが収束するまで繰返し計算を行う（ $|\Delta T| \leq 0.01^\circ\text{C}$ ）。収束に要する回数は開口条件によって異なるが、概ね100回程度のループで収束した。各室の熱収支および風量収支に関する基礎式は以下のとおりである。なお、風圧力は、内皮の暖気循環を検討する場合、十分に気密であることを前提として、無視している。

各室の熱収支

$$\sum_{p=1}^M S_p \cdot K_p \cdot (T_n - T_p) + \sum_{j=1}^J c \cdot G_{ji} (T_i - T_j) - H_n = 0 \quad \dots (1)$$

$$\text{浮力 } p_t \quad p_t = (\gamma_o - \gamma_m) \cdot h \quad \dots (2)$$

$$\text{室内 } m \text{ 開口 } j \text{ の大} \quad p_{mj} = p_m + p_t \quad \dots (3)$$

気基準室内圧力

$$\text{通気量 } G_{mj} \quad G_{mj} = \text{sgn} \cdot \alpha A_{mj} \cdot \sqrt{2\gamma_i} \cdot \Delta p_i^{\frac{1}{n}} \quad \dots (4)$$

$$\text{連続の式} \quad \sum_{j=1}^n G_{mj} = 0 \quad \dots (5)$$

$$\text{圧力補正係数} \quad \omega = \frac{|p_m^k - p_m^{k-1}|}{\Delta p_m^k} \quad \dots (6)$$

$$\omega > 1 \text{ のとき} \quad p_m^{k+1} = p_m^k - \Delta p_m^k \quad \dots (7)$$

$$\omega \leq 1 \text{ のとき} \quad p_m^{k+1} = p_m^k - \omega \cdot \Delta p_m^k \quad \dots (8)$$

ただし、S: 壁表面積(m²)、K: 熱貫流率(W/m²K)、c: 空気比熱(J/gK) H: 発熱量(W)、G_{mj}: 風量(kg/s)、αA: 有効開口面積(m²)、Δp: 圧力差(Pa)
ω: 収束計算時における圧力補正係数(-)、添え字:pは壁数を表わし、Mがn室の壁の総数、jが隣室の数を表わしJが隣室の総数。

*1 生活科学科生活科学専攻・准教授, *2 株式会社サンボット研究開発部

2.2 計算住戸モデル

計算対象住宅は、各階床面積 66.25 m² (9100mm×7280 mm)、軒高さ 6.5m、延床面積 132.5m² の総2階建てとする。断熱仕様および性能を表1に示す。換気回数を 0.5 回/h としたときの熱損失係数 Q 値は 1.75W/m²K であり、次世代省エネルギー基準の I 地域および II 地域の基準値の中間程度である。

換気システムとしてパッシブ換気システムを採用する。給排気口の αA をおのおの 100cm² とし、給排気口高低差 8m とする。住宅モデルを図1に示す。各階を1室とみなし、それに床下空間、暖気上昇用の間仕切壁、天井懐、天井懐から床下に戻るリターン用間仕切壁、階段室、の計7室モデルとした。

床下暖房の暖気循環にかかわる開口設定は、暖気上昇用間仕切壁の出入口に $\alpha A=3000\text{cm}^2$ 、各階居室から階段室へと移動する部分に $\alpha A=1000\text{cm}^2$ 、2階の暖気吹出用床面開口に $\alpha A=4000\text{cm}^2$ 、階段室からリターン用の床下への開口 $\alpha A=2000\text{cm}^2$ 、リターン用の間仕切壁・床下と暖房機設置床下空間との間の開口 $\alpha A=500\text{cm}^2$ を配した。この設定は、パッシブ換気システムを開発したときに測定した間仕切壁および床面開口部材の隙間量実測値に基づいて設定している^{3),5),6)}。

躯体の気密性能は $C=1\text{cm}^2/\text{m}^2$ とし、基礎・土台隙間に 30% 配分、残りを開口部上下、壁と床・屋根との取合部に均等配分した(7室30開口モデル)。なお、床下・天井懐・間仕切壁と居室との間は、吹き出し開口に比べて相対的に小さいので、気密な扱い(隙間ゼロ)とした。開口条件を表2に示す。

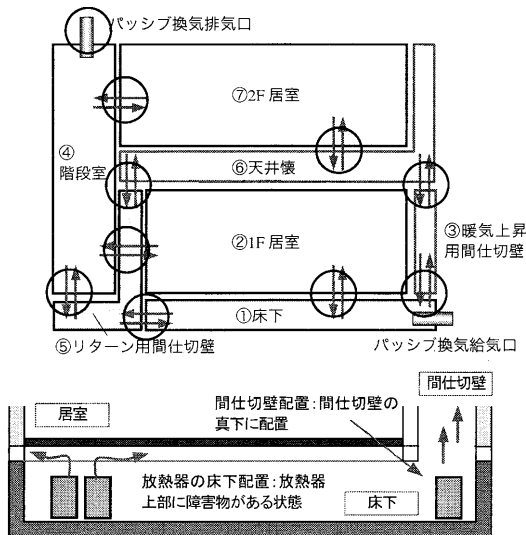


図1 検討用住宅モデルと放熱器配置イメージ図

表1 住宅モデルの断熱仕様および性能

部位	断熱仕様	熱貫流率 (W/m ² K)
外壁	GW24K 100mm	0.372
屋根	GW24K 200mm	0.191
基礎断熱	XPS3 種 B 100mm	0.573 (ペリメータ), 0.075 (スラブ)
窓	Low-Eペア	2.33

表2 計算モデルの開口条件(7室30開口モデル)

	自室	隣室	$\alpha A(\text{cm}^2)$	高さ(m)	n 値
1	床下	外気 S	19.87	0.4	1.5
2	床下	外気 N	19.87	0.4	1.5
3	床下	2室	200	0.4	1.7
4	床下	間仕切壁	3000	0.4	2
5	床下	リターン	500	0.2	2
6	床下	給気口	100	0.2	2
7	2室	床下	200	0	1.7
8	2室	階段室4室	1000	0.3	1.5
9	2室	隙間下	11.54	0	1.5
10	2室	窓下	11.54	0.8	1.5
11	2室	窓上	11.54	2	1.5
12	2室	隙間上	11.54	2.4	1.5
13	3室	床下1室	3000	0	2
14	3室	6室(懐)	3000	2.4	2
15	4室	2室	1000	0.3	1.5
16	4室	5室(ダウン間仕切)	2000	0	2
17	4室	7室(2F居室)	1000	3.5	1.5
18	4室	排気口	100	8	1.5
19	5室	床下	500	0.2	2
20	5室	4室(階段室)	2000	0.6	2
21	5室	6室(懐)	500	2.9	2
22	6室	3室間仕切	3000	0	2
23	6室	5室(ダウン間仕切)	500	0	2
24	6室	7室(2F)	4000	0.6	1.5
25	7室	4室(階段ホール)	1000	0.5	1.5
26	7室	6室(懐)	4000	0	1.5
27	7室	隙間下	11.54	0	1.5
28	7室	窓下	11.54	0.8	1.5
29	7室	窓上	11.54	2	1.5
30	7室	隙間上	11.54	2.4	1.5

3. シミュレーション結果

3.1 床下空間における放熱器からの熱量配分の影響

一般に、いくつかの異なる開口が付いた空間に加圧空気を送り込むとき、その空間と外部との間に温度差がなければ、各々の開口から流出する空気量はその有効開口面積の比率に依存する。しかし、空間同士のつながりが温度差のある場合とか、また接続する開口に高低差がある場合では、単純に開口比率で空気は流れない。床下暖房のように住宅の低い位置に放熱器を配置することは、物理的な流れを素直に利用する方法であり、その場合の空気流れはピストンフロー^{注1)}になる。しかし、住宅内の空気流れが温度成層を持つピストンフローの場合、なかなか2階にまで必要な暖房熱量を供給することは難しい。

ここでは、平均室温を 22°C と想定した熱負荷を床下空間に 100% 配置するののか、それとも暖気循環用の間仕切壁下に 100% 配置するののかによって、どのような循環空気量の違いを生じるののか、また各室温度性状はどうなるのかについて検討する。表3に暖気循環用間仕切壁(③室)と床下空間(①室)との暖房熱量比率を示す。外気温度 0°C の時のシミュレーション結果(暖房熱量 4650W) を図2~6に示す。

暖気上昇用間仕切壁下に放熱器を 100% 配置すると当該空間の温度は 35.56°C と高くなり、浮力に応じて天井懐へ流入し、床下から空気が供給される。床下へは外気は給気されるが、その風量の約 4 倍強の風量がア

アップ^{※2)}用間仕切壁に生じるため、天井懐からリターン用の間仕切壁を通じて床下へ戻る分と室内へ吹き出した空気が階段室を経由して床下に循環するという流れができる。この場合の床下温度は17.30°Cで、通常の基礎断熱した床下温度より2°Cほど高い程度である。1F居室は床下へのリターンになっているので、1F居室の室温形成はアップ開口間仕切壁面からの放熱および天井懐からの放熱であることがわかる。そのほかのパターンも空気循環性状は同様で、放熱器配置に応じて風量と温度分布が異なるだけである。床下への放熱器配置の比率が大きくなると床下温度は上昇し、アップ開口用間仕切壁の風量は減少、2F居室の温度が低下することがわかる。アップ開口用間仕切壁の風量と2F居室温度の関係を示したのが図7である。風量が増加するにつれて2F居室の温度が上昇することがわかる。間仕切壁直下への放熱器配置は、2Fの室温形成には重要であることがこの結果からもわかり、一方で1F居室へはアップ開口間仕切壁が1F居室に面する所謂壁暖房的なものとなるならば、風量に変化してもターゲット温度をほぼ維持できることがわかる。

各部開口面積および断熱仕様を同一とし、外気温度をパラメータとした場合の、アップ用間仕切壁風量と2F居室温度の関係のみたものが図8である。間仕切壁に100%配置するならば(パターン1)、2F室温は外気温度にほとんど影響されないが、床下に100%配置(パターン5)すると風量は大きくても2F室温は低下する。すなわち、寒冷地になるほど放熱器の配置が室温形成に与える影響は大きいということである。

表 3 暖気循環用間仕切壁(③室)への熱供給と床下空間(①室)への熱供給の割合

Pattern	暖気循環用間仕切壁③室への熱量割合	床下空間①室の熱量割合
1	100%	0%
2	75%	25%
3	50%	50%
4	25%	75%
5	0%	100%

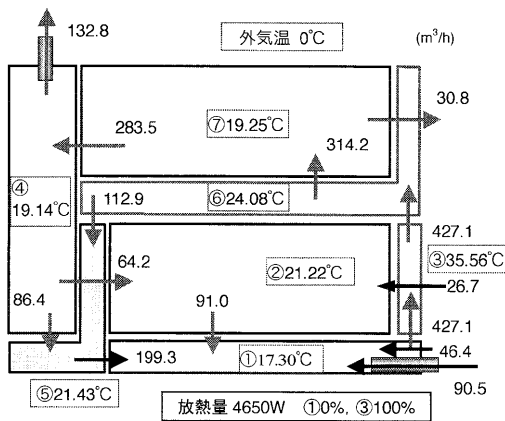


図2 パターン1結果(外気温0°C)

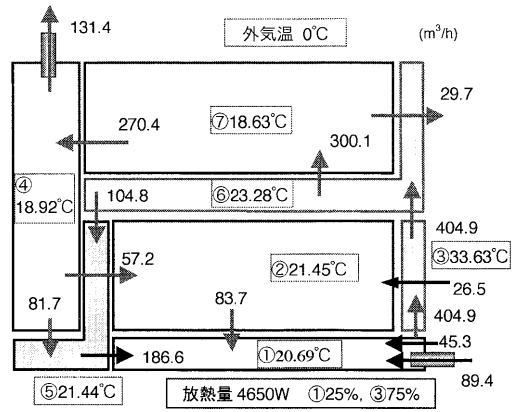


図3 パターン2結果(外気温0°C)

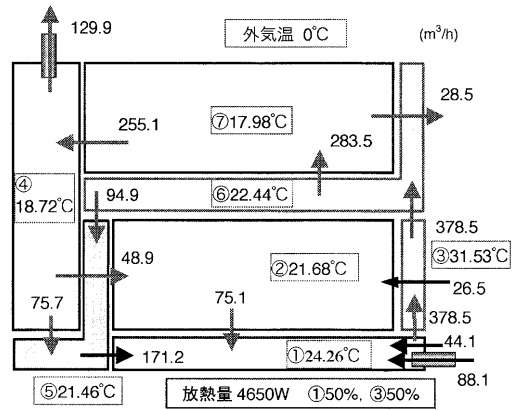


図4 パターン3結果(外気温0°C)

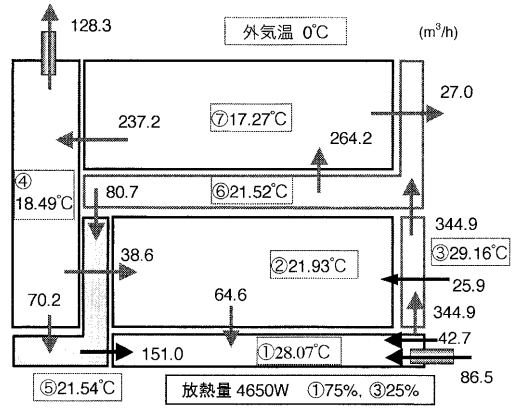


図4 パターン4結果(外気温0°C)

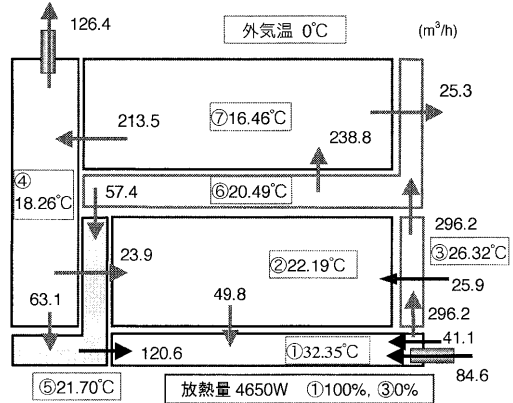


図5 パターン5結果(外気温0°C)

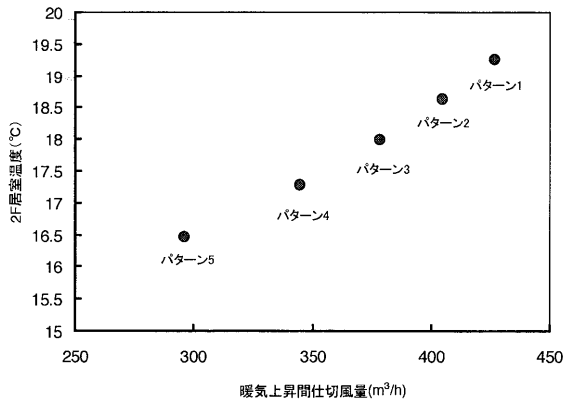


図7 アップ開口流量と2F室温の関係

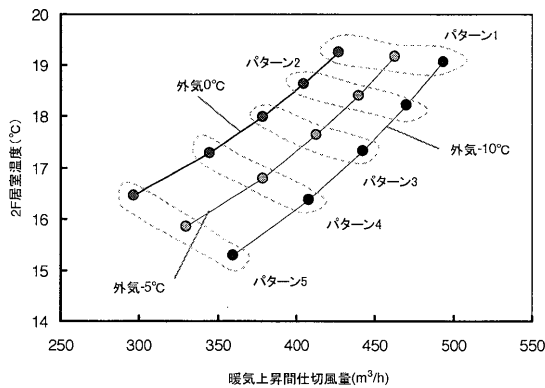


図8 暖気上昇間仕切壁開口流量と2F室温の関係に与える外気温の影響

3.2 2階吹き出し口の高さ位置の影響

ここでは、2階への積極的な熱量配分を行う方法として、暖気循環経路のうち2階居室へ吹き出す開口の位置（床面からの高さ）が、室温形成や空気流れにどのくらい影響を及ぼすのか検討する。

シミュレーションの結果より1F居室の室温形成は暖気の吹き出しは不要であるので、2F居室への吹き出し方法のみについて検討した。基本となるモデルは2F居室温度が最も低温になる外気温度-10°C、床下に放熱器を100%配置した場合とし、2Fの吹き出し口高さを表6のように変化させた。

表6 2階吹き出し口の高さ別の計算パターン

パターン	開口の $\alpha A(\text{cm}^2)$	2F居室床面からの高さ(cm)
A	4000	0
B		10
C		60
D		120
E		180
F		240

注) 基本モデルは床下に放熱器を100%配置した場合で、このパターンが2階への熱配分では最も不利になる。また外気温度を-10°Cで計算する。

シミュレーション結果を図9～14に示す。床面から直接吹き出すパターンAでは、2F居室温度が15.28°Cで1F居室との温度差は7.71°Cになっている。このときの天井懐からの吹き出し風量は301.1m³/hであり、アップ用間仕切壁風量よりも小さいため、リターン間仕切壁から床下へ戻ることがわかる。開口の位置が高くなるにつれて⑥室（天井懐・2F間仕切壁）からの流入空気量が増加し、それとともに室温が上昇する。

また、吹き出し位置が高くなることで③間仕切壁でのアップ側風量よりも吹き出し量が大きくなるため、リターン用間仕切壁からも空気が上昇するようになる（開口高さ120cm→180cmの間に流れの向きが変わる高さが存在する）。その一方で④階段室および②1F居室を経由する流量が増加し、結果的に循環経路が室内および間仕切壁の両方だったものが、リターンは全て室内経路になってしまう。

パッシブ換気システムの給排気量はほとんど変化せず、内皮の開口設計が全体換気量に与える影響は小さいことがわかるが、換気経路を変えてしまうため、汚染質濃度も変化することに注意が必要であろう。

暖房時の室温改善という観点からみると、2F居室の温度上昇は0.5°C程度であり、それほど大きな効果はないが、1階居室との温度差はパターンAで7.71°CだったものがパターンFでは6.64°Cとなって、約1°C強の改善効果が見られる。また床下の過度の温度上昇を抑制する効果も期待できる。

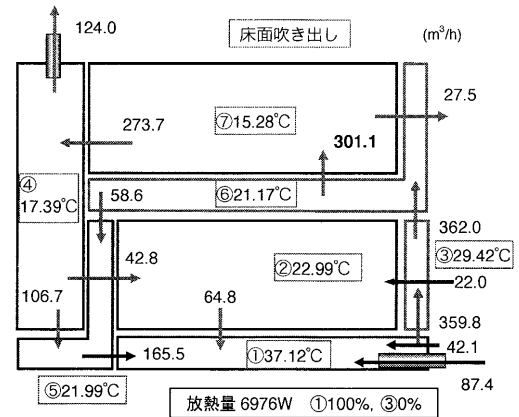


図9 パターンA結果(外気温-10°C)

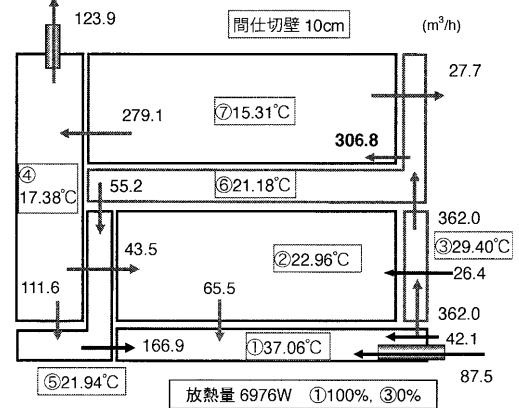


図10 パターンB結果(外気温-10°C)

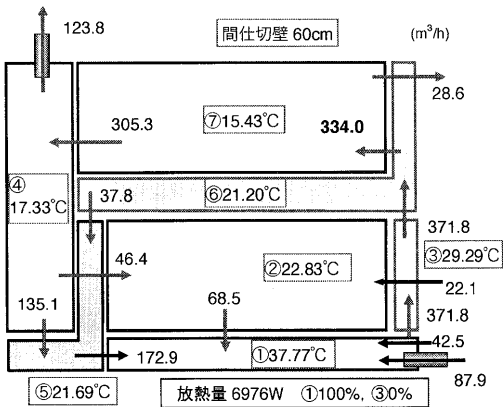


図 11 パターン C 結果(外気温-10°C)

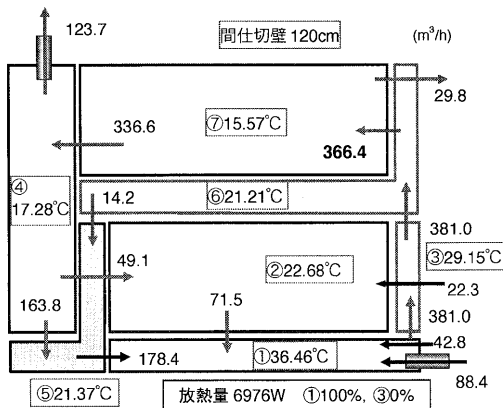


図 12 パターン D 結果(外気温-10°C)

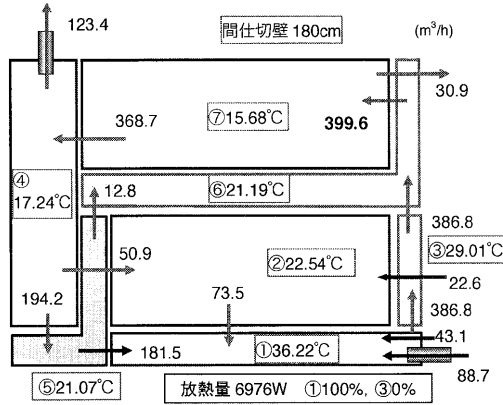


図 13 パターン E 結果(外気温-10°C)

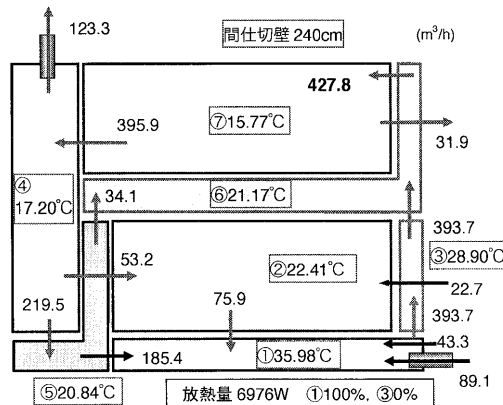


図 14 パターン F 結果(外気温-10°C)

4. まとめ

床下暖房システムにおける放熱器配置および開口位置が、室温形成および空気循環にどのような影響を与えるのかについて数値シミュレーションにより検討した。その結果、床下における放熱器の配置、特に2階への熱配分には、間仕切壁直下に配置することが室温形成に直接影響することがわかった。一般に、2階への熱量供給が難しいのが床下暖房の特徴であるが、2階への熱量配分がうまく実現できれば、1階居室は基本的に問題ないことになる。

また、2階吹き出し位置の検討から、暖気上昇用の間仕切壁直下に適切に放熱器を配置できれば熱量配分に問題は生じない。それが難しい場合、すなわち、間仕切壁直下に放熱器を配置できない場合でも、2階間仕切壁の通気開口位置を変更することによって、多少なりとも室温分布を改善できることを示した。また2Fの場合、吹き出し位置は必ずしも床面ではなく壁面でも良いことがわかり、また高い位置に設置できれば通気にかかる開口面積は小さくできることもわかった。

注1) ピストンフロー：ピストンとはシリンダー、たとえば注射器の容器のようなもので、その中の流体もしくは気体を漏れなく押し出すための器具のことをいう。ピストンフローとは、このような状況における一方向流れのことをいう。

注2) アップ：「上」のこと。ここでは、流れが上向きとなることをいい、アップ開口とは上向きの気流が生じている開口を指す。

参考文献

- 1) 床下暖房システムマニュアル, 北海道住宅環境協議会, 1999
- 2) 福島明・鎌田紀彦・本間義規・絵内正道・西田和宏: 床下空間を利用した空気循環型全室暖房システムの開発と適用, 日本建築学会技術報告集第14号, 177-180, 2001年12月
- 3) 北海道立寒地住宅都市研究所, パッシブ換気システム設計施工マニュアル, 財団法人北海道建築指導センター, 1997
- 4) 本間義規・仁木康介・寺嶋由香利・濱田靖弘: 紫波環境共生住宅における温熱環境・エネルギー性能の実測結果, 日本建築学会東北支部研究報告集, 計画系, 第67号, 29-32, 2004年6月
- 5) 本間義規・福島明・絵内正道: 木造戸建住宅における間仕切り壁の通気特性把握, 空気調和衛生工学会北海道支部第33回学術講演会論文集, pp.205-208, 1999.3
- 6) 本間義規・鈴木大隆・坂本雄三・廣田誠一・福島明: 戸建住宅の基礎断熱工法に関する研究その10, プラットホーム床面の隙間測定と間仕切壁の通気・隙間特性, 日本建築学会学術講演梗概集(広島), D-2, pp.35-36, 1999
- 7) 鈴木憲三: 隙間換気計算プログラムの応用, 住宅の気密化と排気ガスの逆流現象の解析, 日本建築学会北海道支部研究報告集, pp.1-4, 1989

謝辞

本研究は、株式会社サンポットからの委託研究「換気部材の有効開口面積測定とその流れ性状に関する検討」(平成16年度)によって実施した研究成果の一部である。ここに記して謝意を表する。