

外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その179）
 温水床暖房システムの開発

Development of an Integrated Energy Simulation Tool for Buildings and MEP Systems, the BEST(Part 179)

Development of a Floor Heating System

正会員 ○飯田 玲香（日建設計） 特別会員 村上 周三（建築環境・省エネルギー機構）
 技術フェロー 長井 達夫（東京理科大学教授） 技術フェロー 石野 久彌（首都大学東京名誉教授）
 正会員 大浦 理路（日建設計） 正会員 二宮 博史（日建設計）
 正会員 小林 弘造（日建設計） 技術フェロー 長谷川 巖（日建設計）

Reika IIDA*1 Shuzo MURAKAMI*2 Tatsuo NAGAI*3 Hisaya ISHINO*4

Masamichi OURA*1 Hiroshi NINOMIYA*1 Kozo KOBAYASHI*1 Iwao HASEGAWA*1

*1 Nikken Sekkei Ltd. *2 Institute for Building Environment and Energy Conservation

*3 Tokyo Univ. of Science *4 Tokyo Metropolitan University

This paper showed an outline of the development of floor heating system. In this study, the parameter study in the module simple substance and the case study in 1 zone model was carried out and the characteristic and control characteristics of the floor heater system was shown..

はじめに

近年では、快適性の高い空調システムとして、住宅のみならず、オフィスビルなどでも放射空調システムが採用される事例が増えつつある。本報では、主に躯体埋め込みを想定した温水床暖房モジュール(冷房利用も可能)の開発を行い、その計算方法とケーススタディの報告を行う。

1. 計算方法

宇田川の床パネルの計算モデル^{文1)}を引用し、差分法によるスラブ内部温度及び表面温度の計算を行う。

1.1 床暖房部材の計算概要(図-1)

一次元の熱流のみを対象とし、一様な面発熱を仮定することで、発熱面温度は式(1)にて算出可能である。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{0.5(CAP_m + CAP_{m+1})} \left\{ \frac{1}{R_{m+1}}(T_{m+1} + T_m) - \frac{1}{R_m}(T_m - T_{m-1}) + \frac{H_p}{A} \right\} \quad (1)$$

温水配管1本の片面あたりの放熱面を配管ピッチ $w[m]$ で代表することでフィン効率を求め、加熱量 $H_p[W]$ を式(2)の発熱面の平均温度 $T_{mp}[^{\circ}C]$ の関数として求める^{文1)}。

$$H_p = c_w G_w \varepsilon_{PNL} (T_{wi} - T_{px}) \quad (2)$$

c_w : 水の比熱 $[J/kgK]$, G_w : 水量 $[kg/s]$, ε_{PNL} : 配管から発熱面への熱通過有効度 $[-]$

(1) 前進差分法による計算

前進差分法を用い、発熱面温度を式(3)～(7)より算出する^{文1)} (発熱面以外の温度は $P_c = 0$)。尚、環境温度は、床(放射)面から見た室内平均表面温度 AST_p 、室温、対流/放射熱伝達率により求める。

$$T_{mp} = u_{Lm} T_{m-1}^* + (1 - u_{Lm} - u_{Rm} - P_c W_p) T_m^* + u_{Rm} T_{m+1}^* + P_c W_p T_{wi}^* \quad (3)$$

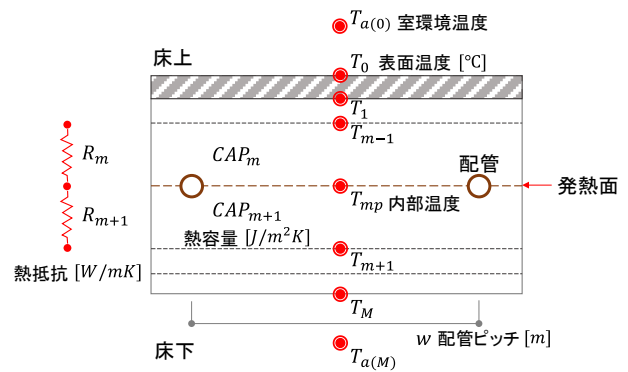


図-1 床暖房の計算モデル断面

$$P_c = \frac{\Delta t}{0.5(CAP_m + CAP_{m+1})} \quad (4)$$

$$W_p = \frac{\varepsilon_{PNL}(C_w G_w)}{A_f} \quad (5)$$

$$u_{Lm} = \frac{\Delta t}{0.5(CAP_m + CAP_{m+1})R_m} \quad (6)$$

$$u_{Rm} = \frac{\Delta t}{0.5(CAP_m + CAP_{m+1})R_{m+1}} \quad (7)$$

Δt : 計算時間間隔 $[sec]$, A_f : 床面積 $[m^2]$

また、式(8)の安定条件を満足しない場合は、モジュール内で短い時間間隔で繰り返し計算を行うこととした。

$$\Delta t_m \leq \frac{0.5(CAP_m + CAP_{m+1})}{1/R_m + 1/R_{m+1}} \quad (8)$$

表-1 対流熱伝達率算出のためのc値

部位	c値
上面暖房 若しくは 下面冷房	2.67
下面暖房 若しくは 上面冷房	0.87

(2) 対流熱伝達率の計算

床面から室への対流熱伝達率 α_c は、床表面温度 θ_s と室温 θ_f の関数^{文2)}で算出し(式(9))、各計算ステップにて室との熱抵抗を更新する。c値を表-1に示す。

$$\alpha_c = c(\theta_s - \theta_f)^{0.25} \dots (9)$$

1.2 建築側エンジンへの受け渡し

BEST 建築側では、設備システム側で計算した放射、対流熱量を受け取り、建築側で計算した床部材の躯体負荷と合成することで室温や AST^{注1)}等の計算を行っている(図-2)。そのため、床暖房モジュールでは、配管のある床部材(床暖全体)と配管の無い床部材の計算を行い、その差分を建築側へ受け渡すこととした(図-3)。

尚、透過日射や内部発熱から受ける放射性分は建築側で考慮している。

1.3 入力方法と結果出力

(1) 入力パラメータ

入力画面を図-4に示す。床暖房が接する上下のゾーン、埋設配管の仕様、構成部材の入力を行う。尚、構成部材は、建築側で設定したものと同様のものとする。

(2) シーケンス接続(Input/Output)

基本的な接続端子の他、入口温水(L0_watIn)、出口温水(L0_watOut)及び、制御用の出力として床暖表面温度(L0_valOutObs)等がある(図-5)。

(3) 出力

出力は、床暖システムが処理した熱負荷や、出口水温、建築側へ受け渡した放射、対流成分とした。

2. 試算

本報では、床暖房モジュール単体計算と、1ゾーンモデルによる試算を行う。

2.1 床暖房モジュール単体計算

(1) 計算概要

単体計算では、表-2に示す通り、床暖房の初期温度を0°Cとし、上下のゾーンの環境温度を固定した際の温度変化を確認する。計算対象は、図-6に示す a)コンクリートと b)木造の2パターンの床暖房部材とし、計算ケースは、床暖房部材の異なる2パターンと、パラメータスタディとして基準ケースに対して送水温度、送水量、配管ピッチ、断熱厚を比較した7ケース(表-3)の計14ケース行う。

(2) 計算結果(図-7)

コンクリート(図-7a)は、熱容量が大きいいため、定常に

表-2 単体計算の条件

項目	条件
配管内径	5mm
床暖房寸法	2m×2m
上下ゾーンの環境温度(固定)	下:0°C、上:20°C

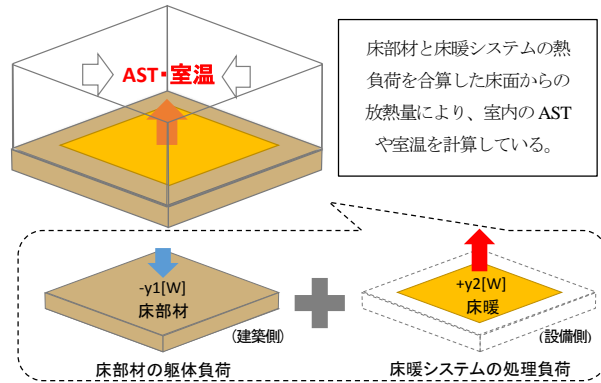


図-2 建築側エンジンの計算イメージ



図-3 設備側の床暖計算イメージ

室グループ/室/ゾーン(床暖房表面側)	フロア1/室/1.5	[-]
室グループ/室/ゾーン(床暖房裏面側)	フロア1/室/床下空間	[-]
■床部材の構成■		
層数	5	[-]
各層の熱伝導率	0.16 0.5 0.5 0.023 1.6	[W/(mK)・°]
各層の熱容量	720 1600 1600 60 2000	[kJ/(m3K)・°]
各層の厚み	0.012 0.055 0.04 0.030 0.2	[m・°]
配管がある層番号	3	[-]
■敷設配管の仕様■		
配管内径	0.02	[m]
配管厚み	0.001	[m]
配管ピッチ	0.075	[m]
配管直管方向長さ	2	[m]
配管ピッチ方向長さ	3	[m]
配管熱伝導率	0.4	[W/(mK)]
■その他■		
両側の床暖房表面長波放射率	0.95 0.95	[-]
表面の向き	上向き	[-]

図-4 床暖房システムの入力画面

接続端子名	接続機器数	ノード区分	媒体区分	InOut区分
L2_recOut	1	記録	メモリ	出口
L1_swCIn	1	制御	On/Off信号	入口
L1_modIn	1	制御	制御モード	入口
L0_watIn	1	状態	水	入口
L0_watOut	0	状態	水	出口
L0_valOutObs	0	状態	double値	出口
L0_airInObs1	0	状態	空気	入口
L0_valInObs1	0	状態	double値	入口

図-5 床暖房システムのシーケンス接続画面

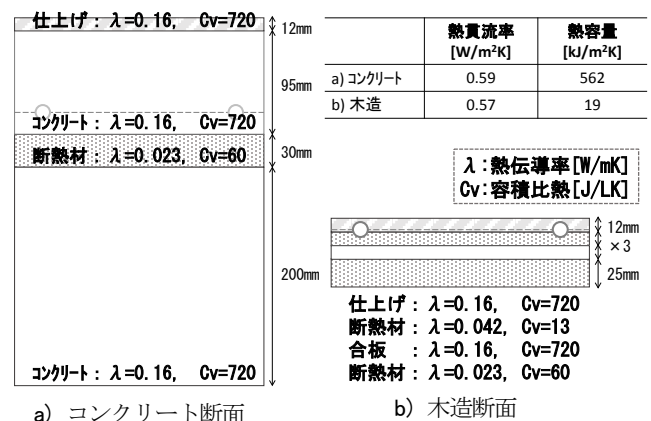


図-6 床暖房の部材断面構成と熱性能

達するまで15時間以上要する。コンクリートの断熱厚さを25mmから15mm(図-7 b)にした場合、床下への放熱比率が大きくなり、居室への放熱量が小さくなる。配管ピッチを150mmから75mm(図-7 c)にすると定常に達するスピードは速く、放熱量は大きくなるが、200mmにした場合は、その逆となる(図省略)。送水量を0.5倍、1.5倍とした場合は、殆ど差は生じない(図省略)。送水温度を45℃から55℃(図-7 d)とした場合、定常に達するスピードは変わらないが、表面温度は高く、放熱量も大きくなる。

木造の場合(図-7 e))は、3~4時間で定常に達した。また、配管上部の熱抵抗が小さいため、放熱量も大きい。そ

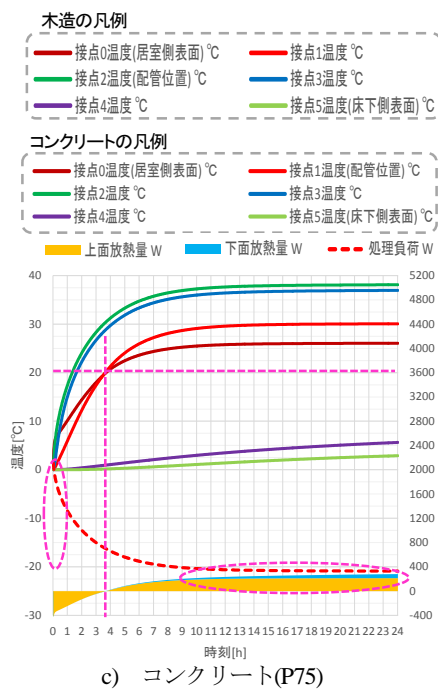


図-7 各ケースの床暖房部材温度[℃]と処理熱量[W]

の他は、コンクリートと同様の傾向を示した。

2.2 1ゾーンモデルでの計算

(1) 計算モデルの概要

計算モデルの概要を図-8、計算条件を表-4に示す。また、計算対象は、コンクリートと木造の2パターンの床暖房部材とし、計算ケースは、それぞれ制御条件と運転時間の異なる4ケース(表-5)の計8ケース行う。

床暖房の部材構成は図-5と同様とし、居室と床下への放熱比率を同等とするため、配管下側の熱抵抗(断熱材の厚みで調整)をコンクリートと木造とで同じとした。

(2) 計算結果

冬期の2日間におけるコンクリート(22_INT)と木造(22_INT)の放熱・処理負荷と室温・PMVの時系列変化を図-9に示す。コンクリート(図-9 a,b))は、運転開始時より数時間運転し、その後は床暖からの放熱により負荷を処理している。室温については、床暖から24時間緩やかな

表-3 単体計算の計算ケース

ケース名	送水温度 ℃	送水量 L/min	配管ピッチ mm	断熱厚さ mm
I15	45	2.83	150	15
P75			75	
V03			150	
基準			200	
P200			150	
V09			150	
T55	55	2.83	150	

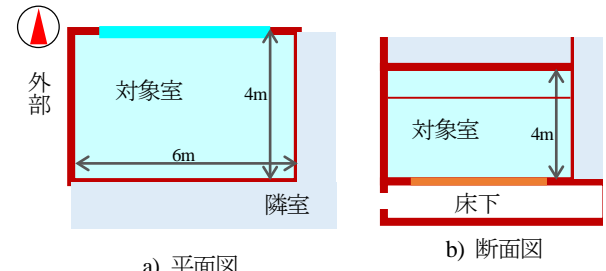


図-8 計算モデル(宿泊施設)の概要

表-4 1ゾーンモデルの計算条件

項目	条件
気象条件	札幌(拡張アメダス標準年2000)、2/10~2/11
床下空間	隙間風: 3.0回/h
隣室	自室と同じ
窓	熱貫流率: 2.32W/m ² K、窓面積率: 60%
外壁	熱貫流率: 0.94W/m ² K
内部発熱	人員: 0.07人/m ² 、照明: 8W/m ²
空調	設定温度 22℃、(間欠)06:00-10:00 / 18:00-24:00

放熱があり、空調開始時も 20℃程度と高い。また、制御のオーバーシュートにより 25℃まで上昇している。一方、木造(図-9 c),d))は、放熱時間と運転時間が概ね一致しており、運転停止後は 1 時間程度で放熱量が 0 となる。また、室温は、空調開始時に 15℃まで低下しているものの、2 時間で設定室温まで上昇し、オーバーシュートも少ない。

図-10 に各ケースの 2 日間の放熱・処理量、図-11 に各ケースの床暖運転時間の PMV と温度の箱ひげ図を示す。

木造よりもコンクリートの方が室内を過度に暖めているため(図-11 a, b)), 木造よりコンクリートの方が処理量は大きい。また、居室と床下への放熱量の比率は(図-10))概ね一致した。コンクリートの場合、間欠運転であっても放熱量は 24 時間運転と同等であるのに対し、木造は、間欠運転の方が小さくなる。但し、その差は 12%程度であり、運転停止時の床部材と室内の冷蓄熱を、運転時間で処理している。

室内環境(図-11)は、コンクリートの場合、どのケースも安定しているのに対し、木造は、間欠運転の場合の低温側への分布幅が大きい。但し、24 時間運転の場合ほぼ一定値となっており、制御性は良い。

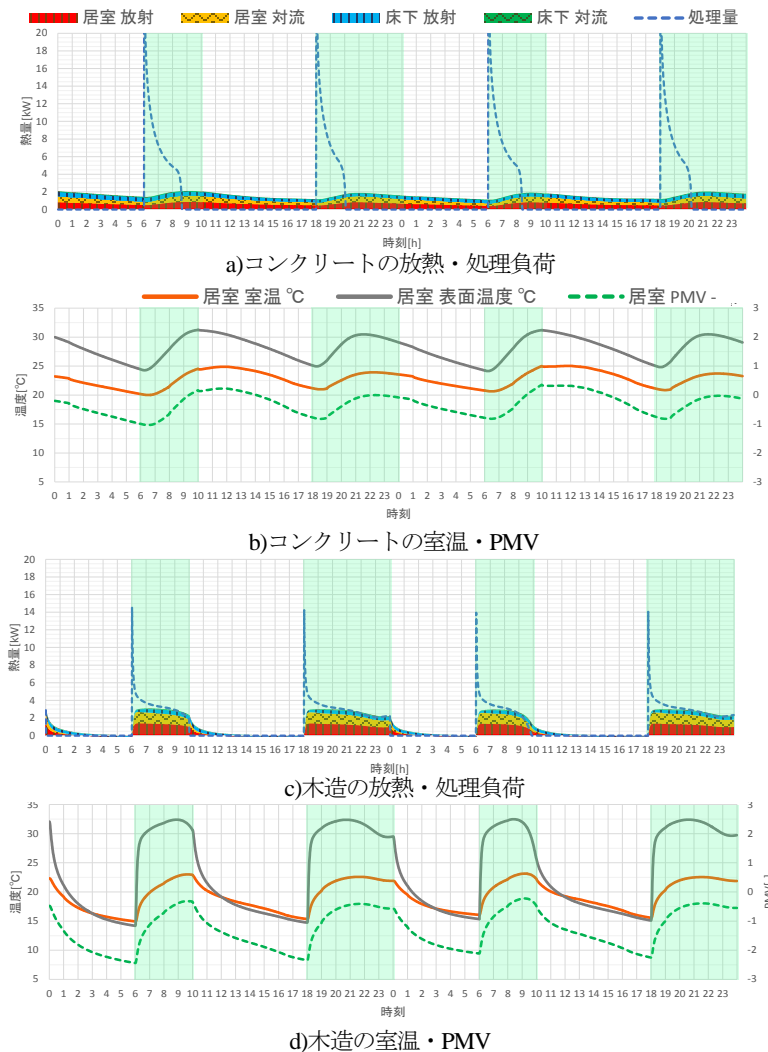


図-9 2/10~2/11 における室温・PMV、負荷処理量の時系列変化

表-5 1ゾーンモデルの計算ケース

ケース名	制御条件	運転
22_INT	22℃	間欠
22_ALL		24時間
PMV_INT	PMV	間欠
PMV_ALL		24時間

3. まとめ

床暖房モジュールの開発を行い、単体モデルによるパラメータスタディと 1 ゾーンモデルによるケーススタディを実施した。床暖の制御性には、配管ピッチと送水温度の影響が大きく、送水量増加の影響は小さい。また、熱容量の大きな床暖は、間欠運転では処理負荷が過剰となるものの、室内の環境を一定に保つことが可能であることを示した。

【謝辞】

(一財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する「統合化WG(石野久彌主査)」の活動成果の一部であり、関係各位に謝意を表す。

【注釈】

注1 AST とは、AST：人から見える室内表面温度の面積加重平均値(℃)

参考文献

- 1) パソコンによる空気調和計算法, 宇田川光弘著
- 2) 最新建築環境工学, 田中俊六

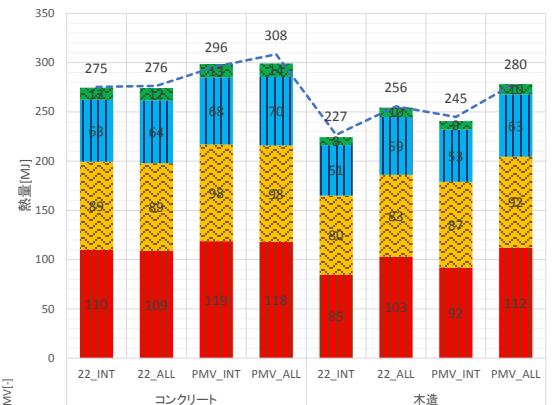


図-10 各ケースの放熱・処理量

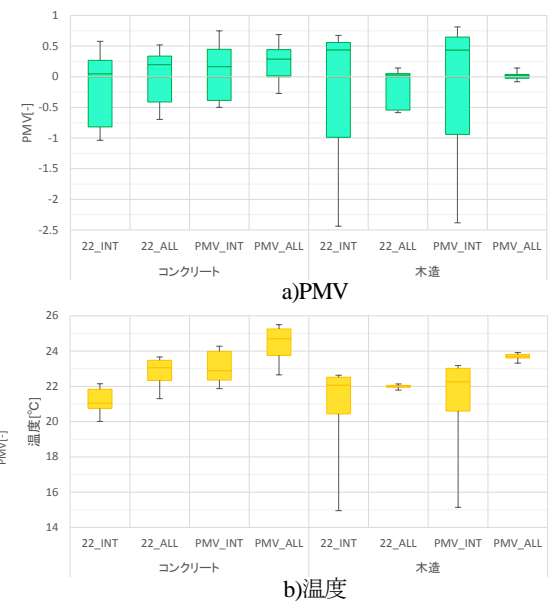


図-11 各ケースの PMV・室温箱ひげ図