

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06338

研究課題名 (和文) 部分・間欠型床下暖房の設計・運用方法の提案

研究課題名 (英文) Design and operation methods of Crawl-Space-Heating for partial and intermittent heating

研究代表者

藤田 浩司 (Fujita, Koji)

近畿大学・生物理工学部・講師

研究者番号：40513536

交付決定額 (研究期間全体) : (直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要 (和文) : 基礎断熱住宅の床下空間をエアコンの温風で暖めてその上に床暖房のような床面放射型の暖房環境をつくる床下暖房について、ヒートショック防止上必要な空間の床下のみを必要な時間のみ暖房する部分・間欠型とする場合の設計・運用方法を提案した。設計方法としては、熱源に必要な最大暖房能力を、居室の設定温度や外気温、住宅の断熱性能、基礎部断熱材の熱抵抗、地盤の熱伝導率、許容する予熱時間、1日24時間のうち暖房を入れる時間の割合、朝の暖房開始時間から推定する式を作成した。運用方法としては、予熱に必要な時間の計算式を提案した。

研究成果の概要 (英文) : 'Crawl-Space Heating' is a heating system using the crawl space as a duct for heat transport from a heat pump. It can produce the same environment as floor heating. We proposed design and operation methods of Crawl-Space-Heating for partial and intermittent heating. We derived equations to estimate the maximum heat load in accordance with the target temperature of the room, the outdoor temperature, the heat insulation performance of the house, the thermal resistance of the foundation insulation, the thermal conductivity of the ground, the acceptable preheating time, the heating operation time in a day and the time when the heating operation is started in the morning. Furthermore, we proposed equations to calculate the required preheating time.

研究分野：建築環境工学 (熱・空気)

キーワード：床下暖房 暖房能力 熱損失 間欠 暖房スケジュール 予熱時間 基礎部断熱材熱抵抗

1. 研究開始当初の背景

超高齢社会を迎えた日本において、冬季の大きな室温温度差を原因とする心筋梗塞や脳卒中などのヒートショックが問題となっている。基礎断熱住宅の床下をヒートポンプエアコンの温風で暖めることで1階に床面放射型の暖房環境をつくる「床下暖房」は、部屋だけでなく廊下なども含めた空間を比較的容易に床面放射型の暖房空間とすることができるため、ヒートショック防止上有効な暖房方法になると考えられる。

この床下暖房を導入する際、その熱源に必要な暖房能力を見積もる必要がある。床下に供給された熱は、床面を通じて1階に流れる熱と基礎・地盤に流れる熱に分かれる。前者の熱は床の熱貫流率などを用いた式で算定することができるが、後者の熱は熱流の多次元性と地盤の熱容量の大きさのため、これまでは数値計算を用いて計算する必要があった。しかし、一般の住宅設計者でも床下暖房の設計ができるようにするためには、熱源の必要暖房能力を数値計算を用いずに何らかの式で計算できることが望まれるため、床下暖房時の床下から基礎・地盤への最大熱損失の推定式が必要となる。

2. 研究の目的

本研究は、床下暖房時の床下から基礎・地盤への最大熱損失の推定式を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

まず24時間連続運転とする場合の最大熱損失の推定式を作成し、その熱損失を基準とした間欠運転の場合の熱損失の比率の推定式を作成する。

4. 研究成果

(1) 重ね合わせの原理を用いた任意の外気・床下温度条件における熱損失の推定法

床下から地盤や外周基礎立ち上がり部への熱損失の計算に用いる熱伝導方程式や境界条件式は、熱物性値を一定とみなせる場合は線形であり、重ね合わせの原理を利用できる。本研究では、それぞれの熱物性値について想定される範囲内で一定とみなし、重ね合わせの原理を用いた床下暖房時の熱負荷算定方法を検討する。

室、床下をそれぞれ1質点とし、床および外壁の熱移動を瞬時定常として考えると、室を設定温度 T_R [°C]に維持するための床下温度 T_C [°C]は、床下暖房時の室の定常熱収支(式(1))より式(2)で表される。外気温度は、フーリエ級数展開して年周期と日周期のみを考慮したもの(式(3))を用いる。この床下温度と外気温度、地盤底面(深さ10[m])の温度、地盤側面(外周基礎立ち上がり部から外気側に4[m]、床下側に4, 6, 8[m])の断熱条件を境界条件とする。

境界の温度条件を年平均外気温度を基準

として分解し、重ね合わせの原理を利用する。年平均外気温度を基準とした外気温度 T_O [°C]を式(4)に示し、式(2)に式(3)を代入して年平均外気温度を基準とした床下温度 T_C [°C]を式(5)に示す。地盤底面(深さ10[m])の温度は年平均外気温度で一定とする。

外気温度 T_O' 、床下温度 T_C' はそれぞれ式(4)、(5)の右辺の各項に分解でき、それぞれの項は単位温度変化 t_{O_i} ($i=1\sim 2$)、 t_{C_i} ($i=1\sim 4$) [-]と係数 α_{O_i} ($i=1\sim 2$)、 α_{C_i} ($i=1\sim 4$) [°C]との積で表される。係数は、外気温度の振幅や、室の設定温度、外壁・床の熱貫流率および面積、室の換気量などで定まる。

それぞれの単位温度変化におけるそれぞれの熱損失 q_{O_i} ($i=1\sim 2$)、 q_{C_i} ($i=1\sim 4$) [W/°C]を数値計算により求めておき、それぞれに係数 α_{O_i} ($i=1\sim 2$)、 α_{C_i} ($i=1\sim 4$)を掛けたものを足し合わせることで、任意の外気温度振幅、室の設定温度、外壁・床の熱貫流率および面積、室の換気量における熱損失を得ることができる。

$$0 = K_F S_F (T_C - T_R) - (K_W S_W + \rho_a C_a V) (T_R - T_O) \quad (1)$$

K_F : 床の熱貫流率[W/m²K], K_W : 外壁の熱貫流率[W/m²K],
 S_F : 床の面積[m²], S_W : 外壁の面積[m²], T_C : 床下温度[°C],
 T_R : 室設定温度[°C], T_O : 外気温度[°C], ρ_a : 空気の密度[kg/m³],
 C_a : 空気の比熱[J/KgK], V : 換気量[m³/s]

$$\begin{cases} T_C = T_R + \beta(T_R - T_O) & (\text{暖房期間}) \\ T_C = T_R & (\text{非暖房期間}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\beta = (K_W S_W + \rho_a C_a V) / K_F S_F$$

$$T_O = T_{O,avg.} + A_{O,y} \cos 2\pi f_y \tau + A_{O,d} \cos 2\pi f_d \tau \quad (3)$$

$T_{O,avg.}$: 外気年平均温度[°C], τ : 時間[s],
 $A_{O,y}$: 外気年振幅[°C], $A_{O,d}$: 外気日振幅[°C],
 f_y : 外気年周波数[1/s], f_d : 外気日周波数[1/s]

$$\begin{aligned} T'_O &= \alpha_{O1} t_{O1} + \alpha_{O2} t_{O2} & (4) \\ \alpha_{O1} &= A_{O,y}, & t_{O1} &= \cos 2\pi f_y \tau \\ \alpha_{O2} &= A_{O,d}, & t_{O2} &= \cos 2\pi f_d \tau \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T'_C &= \alpha_{C1} t_{C1} + \alpha_{C2} t_{C2} + \alpha_{C3} t_{C3} + \alpha_{C4} t_{C4} & (5) \\ \alpha_{C1} &= T_R - T_{O,avg.}, & t_{C1} &= 1 \\ \alpha_{C2} &= \beta(T_R - T_{O,avg.}), & \begin{cases} t_{C2} = 1 & (\text{暖房期間}) \\ t_{C2} = 0 & (\text{非暖房期間}) \end{cases} \\ \alpha_{C3} &= \beta A_{O,y}, & \begin{cases} t_{C3} = -\cos 2\pi f_y \tau & (\text{暖房期間}) \\ t_{C3} = 0 & (\text{非暖房期間}) \end{cases} \\ \alpha_{C4} &= \beta A_{O,d}, & \begin{cases} t_{C4} = -\cos 2\pi f_d \tau & (\text{暖房期間}) \\ t_{C4} = 0 & (\text{非暖房期間}) \end{cases} \end{aligned}$$

(2) 最大熱損失の算定時間

重ね合わせの原理を用いて熱損失の最大値を求める際、足し合わされた熱損失 Q が最大値をとる時間における $\alpha_{O_i} q_{O_i}$ ($i=1\sim 2$)、 $\alpha_{C_j} q_{C_j}$ ($j=1\sim 4$)を足し合わせると正しい最大熱損失となる。

足しあわされた熱損失が最大値をとる時間は、外気温度(式(4))、床下温度(式(5))の影響を受け、床下温度は、外気温度(地域区分)、外壁断熱性能、室設定温度の影響を受ける。それぞれについて表1に示すように3つの条件を考え、条件を全て組み合わせた

27 条件の熱損失を数値計算した結果を図 1 に示す。計算には図 2 に示すモデルを対象に、前進型有限差分法を用いた。

表 1 外気温度、外壁断熱性能、室温設定温度の計算条件

地域	地域区分			基準	外壁断熱性能[W/m ² K]								室温設定温度 [°C]
	年平均	年振幅	日振幅		I 地域		IV 地域		VII 地域				
I	5.79	14.28	4.02	平成11年	0.35	2.33	0.54	3.45	0.54	4.65	22		
IV	11.58	12.71	3.26	平成4年	0.45	2.33	0.74	4.65	1.1	6.51	20		
VII	17.42	9.8	3.47	昭和55年	0.35	3.45	0.75	6.51	2.08	6.51	18		

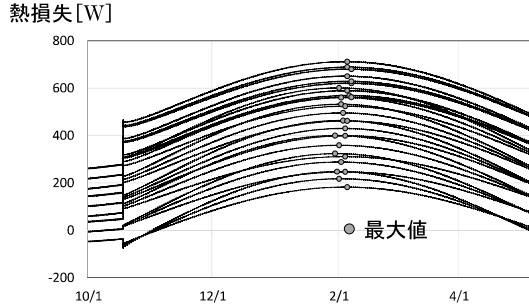


図 1 熱損失の経時変化及び最大値 (27 条件)

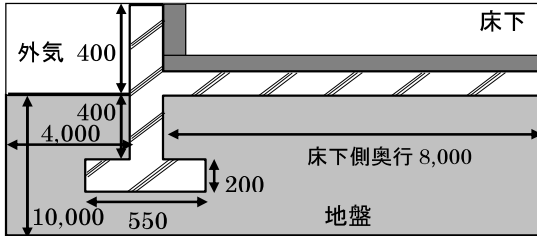


図 2 計算対象モデル

最大値をとる日時は 27 条件それぞれで異なっており 1 月末から 2 月上旬の一週間程度の中に存在している。しかし、外気温が最低となる時間 (1/27 3:00) の熱損失と最大熱損失の真値との誤差は 2%以内と小さかったため、最大熱損失の算定時間を外気温が最低となる時間 (1/27 3:00) に固定する。

(3) 24 時間連続運転の場合の最大熱損失推定式

(1) で示したそれぞれの単位温度変化におけるそれぞれの熱損失 q_{oi} ($i=1\sim 2$), q_{ci} ($i=1\sim 4$) [W/°C] について、基礎立ち上がり部からの水平熱損失 $q'_{H,max}$ と 2 次元以上の熱損失 $q'_{L,max}$ 、土間部分からの鉛直下向きの熱損失 $q'_{S,max}$ に分けると、24 時間連続運転の場合の最大熱損失 $Q_{max,24}$ [W] は式(6)で表現できる。

$$Q_{max,24} = Q'_{H,max}H + Q'_{L,max}L + Q'_{S,max}S \quad (6)$$

$$Q'_{H,max} = \sum_{i=1}^2 \alpha_{oi} q'_{H,max,oi} + \sum_{i=1}^4 \alpha_{ci} q'_{H,max,ci}$$

$$Q'_{L,max} = \sum_{i=1}^2 \alpha_{oi} q'_{L,max,oi} + \sum_{i=1}^4 \alpha_{ci} q'_{L,max,ci}$$

$$Q'_{S,max} = \sum_{i=1}^2 \alpha_{oi} q'_{S,max,oi} + \sum_{i=1}^4 \alpha_{ci} q'_{S,max,ci}$$

ただし、 H は基礎立ち上がり部面積 [m²]、 L は基礎外周長 [m]、 S は土間面積 [m²] である。

基礎立ち上がり部断熱の熱抵抗、土間表面

断熱の熱抵抗、地盤の熱伝導率が上記の $q'_{H,max}$ 、 $q'_{L,max}$ 、 $q'_{S,max}$ に及ぼす影響を評価する式を作成するため、表 2 に示す条件を組み合わせ、それぞれの単位温度変化条件における最大熱損失算定時間における熱損失を数値計算で求め、各熱損失を目的変数、外周基礎立上り部の熱抵抗 R_F [m²K/W] と、土間表面の熱抵抗 R_B [m²K/W]、地盤の熱伝導率 λ [W/mK] をそれぞれ説明変数とする重回帰分析を行い、式(7)を作成した。式(7)の各係数は表 3 に示す。熱損失の推定精度を高めるために一部の係数を累乗や指数形にした。24 時間連続運転の場合の最大熱損失は式(7)と表 3 より推定できる。

表 2 計算条件

外周基礎立上り部断熱厚 [mm]	25	50	75	100
土間部分断熱厚 [mm]	25	50	75	100
地盤の熱伝導率 [W/mK]	0.5	1.0	1.5	2.0

$$q' = \beta_0 + \beta_1 R_F^{\gamma_1} + \beta_2 R_B^{\gamma_2} + \beta_3 \exp(\gamma_3 R_B) + \beta_4 \lambda^{\gamma_4} \quad (7)$$

表 3 式(7)の各係数

q'	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	γ_1	γ_2	γ_3	γ_4
$q'_{H,max,O1}$	0	0.782	0	0	0	-0.824	0	0	0
$q'_{H,max,C1}$	0	1.08	0	0	0	-0.824	0	0	0
$q'_{H,max,C2}$	0	1.08	0	0	0	-0.824	0	0	0
$q'_{H,max,C3}$	0	0.782	0	0	0	-0.824	0	0	0
$q'_{L,max,O1}$	-0.0248	-0.0113	0.263	0	0.0475	-0.698	1	0	1
$q'_{L,max,C1}$	-0.230	-0.0136	0	-0.956	0.238	1	0	0.386	1
$q'_{L,max,C2}$	-0.369	-0.0154	-0.956	0	0.409	1	-0.478	0	0.397
$q'_{L,max,C3}$	0.967	-0.0169	-0.667	0	0.108	1	-0.447	0	1
$q'_{S,max,O1}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$q'_{S,max,C1}$	0.0120	0	-0.0079	0	0.112	0	1	0	0.471
$q'_{S,max,C2}$	-0.0742	0	0	-0.275	0.0675	0	0	0.357	1
$q'_{S,max,C3}$	-0.328	0	0.424	0	0.221	0	-0.307	0	0.323

(4) 間欠運転の場合の最大熱損失推定式

式(8)に示す 24 時間連続運転の場合の最大熱損失 $Q_{max,24}$ を基準とした間欠運転の場合の最大熱損失 $Q_{max,int}$ の倍率 C を、「土間表面断熱材の熱抵抗 R [m²K/W]」と「許容する予熱時間 m [min]」、「暖房 ON 率 r (1 日 24 時間のうち暖房を入れる時間の割合)」、「暖房開始時間と 7 時との時間差 h [h]」から推定する式を数値計算と重回帰分析を行って作成した。数値計算のパラメータを表 4 に示し、それぞれの暖房 ON 率の暖房スケジュールを図 3 に示す。

$$C = \frac{Q_{max,int}}{Q_{max,24}} \quad (8)$$

表 4 数値計算のパラメータ

土間表面断熱材熱抵抗 (m ² K/W)	0.77, 1.53, 2.30, 3.07
暖房 ON 率	0.625, 0.417, 0.458, 0.333, 0.292, 0.208, 0.667, 0.500, 0.333, 0.708, 0.542, 0.375
倍率 C	1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9, 2.0

暖房スケジュール (ON率)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
712-1323 (0.625)	off	on	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
710-1213-1622 (0.417)	off	off	on	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
79-1214-1724 (0.458)	off	off	off	on	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
79-1723 (0.333)	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
79-1823 (0.292)	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
79-1923 (0.208)	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
612-1323 (0.667)	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
69-1214-1724 (0.500)	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
69-1823 (0.333)	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
512-1323 (0.708)	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
59-1214-1724 (0.542)	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off
59-1823 (0.375)	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off	off

図 3 暖房スケジュール

それぞれの土間表面断熱材熱抵抗の条件に対して重回帰分析を行った結果得られた倍率 C の推定式を式(9)に示し、それぞれの土間表面断熱材熱抵抗に対応する各偏回帰係数を表5に示す。推定精度を高めるために最長予熱時間についてはその逆数を説明変数とした。

$$C = a + bm^{-1} + cr + dh \quad (9)$$

表5 式(9)の各偏回帰係数

土間表面 断熱材 熱抵抗 [m ² K/W]	a	b	c	d
0.77	2.260	10.750	-1.872	0.085
1.53	1.205	39.067	-1.322	0.135
2.30	0.626	68.676	-0.951	0.160
3.07	0.275	108.046	-0.760	0.190

表5に示した各偏回帰係数 a, b, c, d と土間表面断熱材熱抵抗 R [m²K/W]との関係は式(10)~(13)の近似式で表される。

$$a = 4.73e^{-0.909R} \quad (10)$$

$$b = 41.9R - 23.8 \quad (11)$$

$$c = 0.816\ln R - 1.66 \quad (12)$$

$$d = 0.0739\ln R + 0.103 \quad (13)$$

式(9)~(13)を用いることで、倍率 C を、「土間表面断熱材の熱抵抗 R [m²K/W]」と「許容する予熱時間 m [min]」、「暖房 ON 率 r (1日24時間のうち暖房を入れる時間の割合)」、「暖房開始時間と7時との時間差 h [h]」から推定することができる。表4に示したパラメータの範囲内で、推定値と正解値の誤差は-6%から+12%であった。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計5件)

- ① 藤田浩司：重ね合わせの原理を用いた床下暖房最大熱負荷の算定法—間欠型暖房の場合の基礎部断熱材熱抵抗の影響—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II (D-2), 2018
- ② 藤田浩司：重ね合わせの原理を用いた床下暖房最大熱負荷の算定法—間欠型暖房の場合の最大熱損失推定式—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II (D-2), pp.557-558, 2017
- ③ 藤田浩司：重ね合わせの原理を用いた床下暖房最大熱負荷の算定法—基礎部熱抵抗・地盤熱伝導率の影響および間欠運転への対応—, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第57号 環境系, pp.65-68, 2017
- ④ 藤田浩司：重ね合わせの原理を用いた床下暖房最大熱負荷の算定法—分解された熱損失の足し合わせ時間の検討—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II (D-2), pp.29-30, 2016
- ⑤ 藤田浩司：重ね合わせの原理を用いた床下暖房最大熱負荷の算定法—計算条件の

検討および外気・床下温度が最大熱損失となる時間に及ぼす影響—, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第56号 環境系, pp.169-172, 2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤田 浩司 (FUJITA KOJI)

近畿大学・生物理工学部・講師

研究者番号：40513536