



Title	外断熱住宅の躯体蓄熱型暖房システムに関する研究
Author(s)	菊田, 弘輝; Kikuta, Koki; 絵内, 正道 他
Citation	日本建築学会環境系論文集, 589, 37-42
Issue Date	2005-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/50475
Rights	日本建築学会、本文データは学協会の許諾に基づきCiNiiから複製したものである
Type	journal article
File Information	AIJ.589.37-42.pdf



外断熱住宅の躯体蓄熱型暖房システムに関する研究

A STUDY ON AIR CONDITIONING SYSTEM OF THERMAL STORAGE
ON EXTERNAL INSULATED HOUSES

菊田 弘輝*, 絵内 正道**, 羽山 広文***, 森 太郎****, 宮坂 敏一*****

Koki KIKUTA, Masamichi ENAI, Hirofumi HAYAMA,
Taro MORI and Toshikazu MIYASAKA

The aim of this study is to clarify the effects of thermal storage system in midnight using the waste heat and midnight electric power, and to propose the new floor heating system using the thermal characteristics on external insulated houses. On numerical simulation of conditionally specified model, the results were as follows; (1) It was possible to maintain the room temperature and floor surface temperature by thermal storage in midnight after stopping the floor heating in daytime. (2) The amenity of thermal environment was evaluated by PMV and PPD, and the usefulness of this system was confirmed. (3) It was confirmed that the intermittent heating of approximately 6 hours for a day heating using this system was irrational from the result of radiator output and max output.

Keywords: External insulation, Thermal storage, Control Volume method, Change of temperature, Predicted Mean Vote

外断熱, 躯体蓄熱, コントロール・ボリューム (CV) 法, 温度変動, PMV

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

現在, COP3の発行を目前に迎え, 住宅用エネルギー消費量の削減は重要な課題であり, 建築側では, 外断熱工法への取り組みが活発化している。外断熱建物は, 一般的に構造体の外側を断熱材で連続的に被覆するため, 断熱厚さが同じであっても, 内断熱よりも断熱の断点が減少し, 熱損失は確実に小さくなる。また, 高断熱化による構造躯体の蓄熱効果も相対的に増大することから, 外断熱建物に望ましい暖房システムや運転制御方法の検討は, 改めて必要な段階となっている。

設備側では, エネルギー供給の高効率化として, 固体高分子形燃料電池 (PEFC) の排熱を利用したマイクロコージェネレーションシステム (μ CGS) の採用が考えられる。燃料電池は, セル本体や燃料改質装置の耐久性等に配慮すると, 24時間運転が望ましいとされ, 排熱の有効利用には給湯が有望であるが, 排熱を使い切れない場合もある。

本研究の目的は, 燃料電池に係わる電力需要と熱需要のマッチングという難問に対処するべく, PEFCからの排熱を暖房設備の熱源に利用し, 貯湯槽や補助ボイラーをシステム化した μ CGS の有意性を検証する。同時に, RC造外断熱住宅を対象に, 排熱利用と深夜電力利用による夜間蓄熱の可能性を検討し, 躯体の蓄熱特性を活かした新たな床暖房システムを提案することで, 建築と設備の一体化を図る。

1.2 既往の研究と本研究の位置付け

既往の研究⁹⁾では, 札幌市に立地した延べ床面積119.88[m²]のRC造

外断熱住宅3階建て(以下, 実建物)で, 「深夜電力を利用した空気熱源ヒートポンプシステム」の実測調査を行った。主に躯体蓄熱型暖房システム(床暖房システム)による室温変動, 躯体からの蓄放熱, 熱源機器の特性について考察した。本研究では, そこで明らかになった諸係数を実建物のモデル化やシミュレーションの整合性等に用いた。数値解析では, 夜間蓄熱+日中暖房停止, システムの稼働時間の短縮, また, 外断熱建物の特性を踏まえ, ある範囲内での室温変動の許容 (PMV・PPDで評価) を前提条件とした。

2. 躯体蓄熱型暖房システムの概要

通常の床暖房システムは, 床にコンクリートを打ち込み, スラブの強度発現後, その上に溶接金網を設置して配管を緊結し, シンダーを流し込む2段階施工である。しかし, 躯体蓄熱型暖房システムは, 床スラブの配筋に直接架橋ポリエチレン管を緊結し, 1回の打ち込みで完成する。温水を埋設した架橋ポリエチレン管に流すことで, 床暖房を行い, その配管図を図1に示す。また, 本システムの利点として,

- 1) 床の全面発熱であるため, 室内の空気流動は抑えられ, 上下温度むらも少ない, 快適な輻射環境が入手できる。
- 2) 一般の温水パネルヒーターやエアコン等と比べ, 架橋ポリエチレン管の直接打ち込みのため, 設備費用が安価になる。
- 3) 床スラブの配筋に配管を取り付けるため, 天井高さへの影響が少なく, 部屋の狭小化も緩和できる。

* 北海道大学大学院工学研究科 修士課程

** 北海道大学大学院工学研究科 教授・工博

*** 北海道大学大学院工学研究科 助教授・博士(工学)

**** 国立釧路工業高等専門学校 助教授・博士(工学)

***** ロングホーム(株)

Graduate Student, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ.

Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Kushiro National College of Technology, Dr. Eng.

Longhome Co., Ltd.

3. 解析モデル

3.1 実建物のモデル化

解析モデルの対象である実建物には、バルコニー等が付設され、単純な箱の形状ではない。また、室内は幾つかの空間に分かれているが、本解析では、①各階を1室と考える、②各方位の壁+床の2次元モデル化を行う、③バルコニー・ペントハウス・東西窓面を省略するという簡略化を行った。建物モデル化の概念を図2に示す。図のように建物を東西南北に4分割し、それぞれの壁と床の面積を算出した。その際、躯体蓄熱の効果を評価する上で、コンクリート躯体の容積を実建物と合致させる必要があるため、奥行き方向の長さを調整することで対処した。建物の計算モデルを図3、奥行き方向の長さ(窓:X[mm]、構造体:Y[mm])を表1に示す。実建物との整合性に配慮するため、1階の天井面に断熱材を貼り付け、解析に際し、2階床の放熱が上面に偏るようにした。また、屋根スラブの一部に断熱の断点が生じたため、その断点を再現させた。

3.2 解析手法

数値解析には、コントロール・ボリューム (CV) 法¹⁾による2次元非定常計算(前進差分, Δt :時間間隔4.0[s])を行った。CV点Pの温度 T_p は式(1)から求め、 T_p^0 は Δt 前の温度を表す。同様に各CVの温度を計算し、構造体温度と空気温度を把握することにした。CV点NはCV点Pの隣接点であり、CV点Pの概念図を図4に示す。

$$\left(\sum \frac{\lambda_N S}{\delta_N} + \frac{\rho c V}{\Delta t} + \alpha S \right) T_p = \sum \frac{\lambda_N}{\delta_N} S T_N^0 + \left(\frac{\rho c V}{\Delta t} - \sum \frac{\lambda_N}{\delta_N} S \right) T_p^0 + (\alpha T_f + q) S \quad (1)$$

ρ : 点Pの比重 [kg/m³], c : 点Pの比熱 [J/kg·K]

V : 点PのCV体積 [m³], S : 点PのCV面積 [m²]

α : 点Pの総合熱伝達率(室内側9.0, 室外側23.0) [W/m²·K]

λ_N : 点P-N間の熱伝導率 [W/m·K], δ_N : 点P-N間の伝導長さ [m]

q : 点Pへの熱流束 [W/m²], T_f : 空気温度 [°C]

3.3 床暖房システムのモデル化

1) 配管周辺の計算モデル

1階~3階の床には、計算メッシュの交差が集中している箇所(図3参照)があり、床暖房の配管位置に相当する。その配管周辺の計算モデルを図5に示す。実建物の架橋ポリエチレン管(管径0.013[mm]、外径0.017[mm])には、流速0.16~0.22[m/s](設計値)の温水が流れる。計算では管径0.014[mm]で、水ジョイント(水CV-構造体CVの熱伝導率)を調整し、床暖房温水の熱が直接構造体に伝わるモデルとした。円管内の強制対流熱伝達率²⁾は、発達した流れの乱流の場合($Re >$

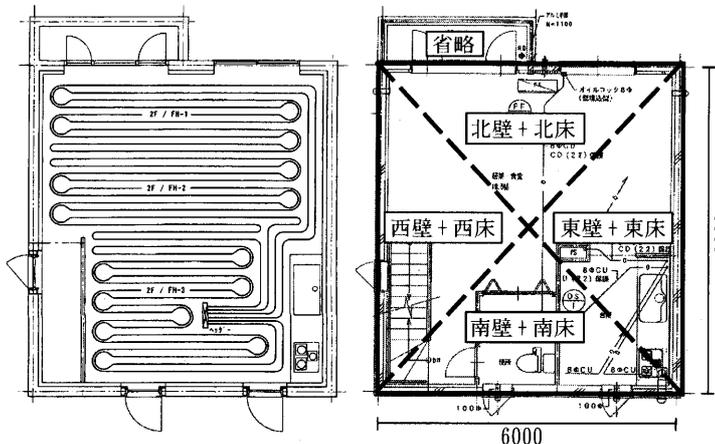


図1 床暖房の配管図

図2 建物モデル化の概念

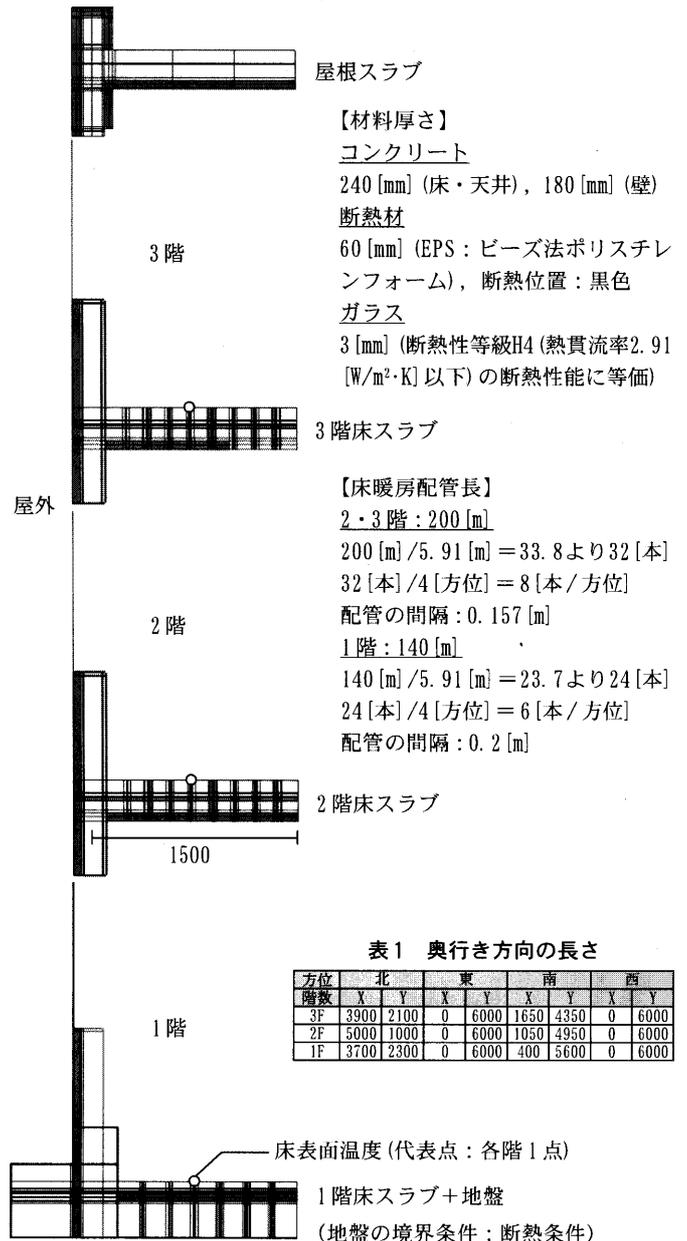


表1 奥行き方向の長さ

方位 階数	北		東		南		西	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
3F	3900	2100	0	6000	1650	4350	0	6000
2F	5000	1000	0	6000	1050	4950	0	6000
1F	3700	2300	0	6000	400	5600	0	6000

図3 建物の計算モデル

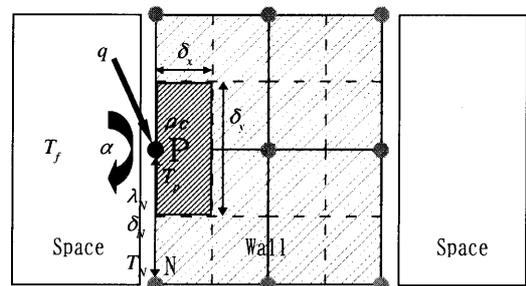


図4 CV点Pの概念図

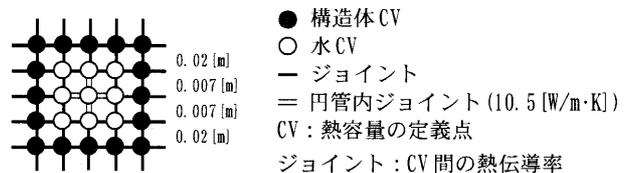


図5 配管周辺の計算モデル

10⁴, 壁温一定, 0.7 < Pr < 120, 温水 40℃), Nu = 0.023 × Re^{0.8} × Pr^{0.4}より約1500 [W/m²·K]となった. その値にジョイント長さ0.007 [m] を乗じた値を熱伝導率10.5 [W/m·K]として採用した. この値は, 床暖房温水の熱が床スラブへどの程度伝わるかを示すものであり, 5.1 (実測とシミュレーションから得られた諸係数の照合)で評価することにした.

2) 暖房システムの計算モデル

暖房システムを図6に示す. PEFCからの排熱を熱源冷却水の形で回収し, 余剰電力も電熱器に使用し, 貯湯槽に蓄熱した(以下, 前者を排熱回収, 後者をヒータ熱回収). 本来, 貯湯槽は温度積層型にして使用されるが, 本解析では一槽一温とした. その温水を床暖房及び給湯に使用する際に, 各々の設定温度(入口温度)に達しない場合, 補助ボイラーを用いて加熱するものとした. 貯湯槽水温の計算も同様に前進差分で行った. 貯湯槽水温の熱平衡は次式による.

$$\text{貯湯槽熱容量} \times \text{温度変化} = \text{熱取得 (排熱回収 + ヒータ熱回収)} + \text{熱損失 (貯湯槽放熱 + 床暖房 + 給湯)} \quad (2)$$

4. 解析条件

4.1 解析条件の概要

1) 外界条件・材料熱物性

外界条件はHASP札幌を用いた. 屋根面・壁面・窓面への有効日射受照量は, 材料の日射吸収率や透過率³⁾を考慮し, 時刻に関係なく一律に所要のHASPデータに係数を乗じたものとした. また, 窓面への入射量の80 [%]が室内に透過し, 床面(2階・3階)と天井面(1階~3階)に40 [%]ずつ吸収されたものとした. 係数は常時0.6と仮定し, 材料の日射吸収率は0.6, 窓面への透過率は0.48 (0.6 × 0.8)となり, 透明ガラス+透明ナイロン地カーテンの透過率に等価し, 計算の簡略化を図った. 材料の熱物性を表2に示す.

2) 暖房システム・給湯

PEFCの仕様³⁾を表3, 暖房システム・給湯の運転パターンを表4に示す. 定格運転100 [%]時の排熱回収量は6.10 [MJ/h] (1695 [Wh])であった. 貯湯槽の有効容積を200 [L], 補給水温を10℃, また実測に基づき, 床暖房の温水流量を25 [L/min]とした. 給湯量は4人世帯を想定し, 6~10時(台所・洗面)に25 [L/h], 18~22時(台所・入浴)に35 [L/h], 計240 [L/day]を使用するものと仮定した.

3) 室内取得熱・換気

各階の照明・機器・人体による室内取得熱量⁵⁾を表5に示す. 室内取得熱量の設定は3つの時間帯に分け, 各時間帯の平均値とすると共に, 在室状況に合わせて各階毎に想定した. 生活の中心となる階とそうでない階との間で, 室内取得熱量に差異が現れるため, 室温のむら⁶⁾が各階毎に現れることが予想される.

各階と屋外との間の換気量は, 約42 [m³/h] (換気回数: 0.5 [回/h])と仮定した. 上下階をつなぐ階段部分の面積(通気を想定した断面積)は小さいが, 上下階空間の温度差が解消されるまで, 上下階の相互換気が続行されると仮定した. 上下階の相互換気量は式(3)⁶⁾から求

める. ただし, 上階(i+1)の室温が下階(i)より低い場合のみ相互換気されると仮定した.

$$V_{i,i+1} = \alpha F \sqrt{\frac{g(H_i + H_{i+1})/2 (\gamma_{i+1} - \gamma_i)}{(\gamma_{i+1} + \gamma_i)/2}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (3)$$

α: 流量係数 1.5√2, F: 階段面積 3.0 [m²]
g: 重力加速度 9.81 [m/sec²], γ: 密度 [kg/m³]
H: 高さ [m] (1階: 2.85 [m], 2階: 2.7 [m], 3階: 2.7 [m])

4.2 解析内容

断熱性能が向上すると, 外界の影響が受け難くなり, 投入熱量は床スラブへの蓄熱か, 否かに係わりなく, そのまま室温に反映される傾向が高くなる. 今回, 床暖房の熱源に排熱と深夜電力を利用し, 夜間蓄熱の可能性を検討した. その際, 室温維持に必要な床暖房の投入熱量に対するエネルギー消費量や設備容量等の検討が必要になる. 解析内容では運転時間・設定温度等を定め, 5CASEについて検証した.

解析内容を表6に示す. 解析の前提条件に, 日中(6~18時の12時間)は床暖房を停止すること, それ以降の時間帯で運転開始時間を変えることを考えた(CASE1・CASE2・CASE3). 1日当たり同量の供給熱を床面から放熱させると, 日平均室温は当然等しくなる. そこで機器の長寿命化と運転費用の削減を目指し, システムの稼働時間をどの程度短縮できるか, 稼働時間の短縮によって, 補助ボイラーの最大出力(容量)はどの程度過大化するかを検討した(CASE2・CASE4・CASE5).

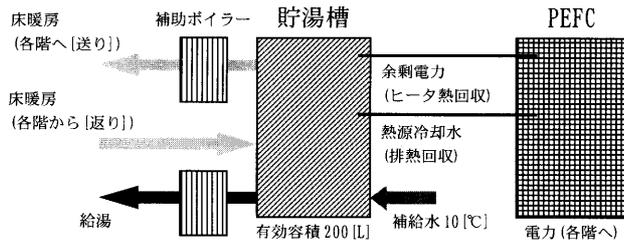


図6 暖房システム

表2 材料の熱物性

材料名	比重 [kg/m ³]	比熱 [J/kg·K]	熱伝導率 [W/m·K]
コンクリート	2200	880	1.6
EPS	27	1200	0.034
ガラス (H4級)	2540	800	0.00872
水	1000	4200	10.5
地盤	1340	1700	0.7

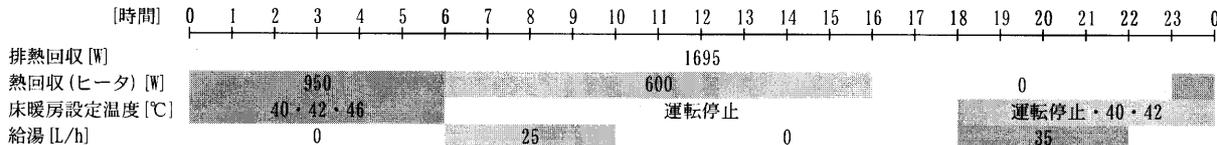
表3 PEFCの仕様

スタック仕様	加湿装置一体型 (膜加湿方式)
ユニット基本寸法	0.9 [m] (W) × 0.46 [m] (D) × 1.1 [m] (H)
原料 (天然ガス)	最大10 [NL/min] (1.47~1.63 [kPa])
原料供給方式	外部改質方式
補給水	最大10 [NL/min] (100~300 [kPa])
電気方式	単相三線式 (AC200/100 [V], 50/60 [Hz])
最大出力	1 [kW] (交流端)
排熱回収水温度・循環流量	出口温度60 [°C]・最大2 [L/min]
排熱回収量	6.10 [MJ/h] (定格運転100%時)

表5 各階の照明・機器・人体による室内取得熱量 [W]

時間 階数 (部屋名)	6~16時		16~23時		23~6時	
	照明・機器	人体	照明・機器	人体	照明・機器	人体
3F (子供室×2)	50	0	180	50	0	100
2F (LDK)	300	50	640	150	50	0
1F (玄関・寝室・水回り)	50	50	180	0	0	100

表4 暖房システム・給湯の運転パターン



5. 解析結果

5.1 実測とシミュレーションから得られた諸係数の照合

1) 実測から得られた諸係数

実測で困難な条件設定における数値的な模擬実験を考えると、実測時とシミュレーション時の基礎的な諸係数値は、可能な限り同水準にあることが望ましい。本解析では周期的な定常を前提に、熱損失係数と熱伝達率の推定作業を行った。実建物⁹⁾の床面積当りの熱損失係数として1.84 [W/m²・K]、床暖房温水から室内への相当熱伝達率として2.71 [W/m²・K]を得た。

2) シミュレーションから得られた諸係数

同様の方法⁹⁾で、熱損失係数と熱伝達率を周期定常計算の結果から算出した。外気温は-5.0℃、温水入口温度は40.0℃、室内取得熱はなし、換気は4.1(解析条件)の取束計算結果より、1~3階の平均室温は23.1℃、温水出口温度は36.9℃となった。内外温度差が28.1℃の時、床暖房からの放熱量(比重×比熱×流量×温水の往還温度差)は、5425.0 [W] (1000.0×4200.0×0.00041667×3.1)となった。総合熱貫流率は193.1 [W/K] (5425.0/28.1)となり、延べ床面積104.8 [m²] (5.91×5.91×3)より、熱損失係数は1.84 [W/m²・K] (193.1/104.8)となった。

熱伝達率は、床暖房からの放熱量を温度差(平均水温-室温)と放熱面積で除して得られる。平均水温を38.5℃([40.0+36.9]/2)とし、断熱材が貼り付けてある1階天井は、放熱面積に積算せず、1階床・2階床・2階天井・3階床の計139.7 [m²] (5.91×5.91×4)を放熱面とした。本来、床スラブに連続する壁面も放熱面積の一部であるかも知れないが、ここでは放熱面積から除いた⁹⁾。床暖房温水から室内への相当熱伝達率は2.52 [W/m²・K] (5425.0/[38.5-23.1]/139.7)となった。

暖房システム・熱源等が異なる簡略化モデルのシミュレーションでは、それを踏まえた躯体蓄熱の特性や温度変動の考察が必要となってくる。今回、実測から得られた諸係数をシミュレーターに想定することは、少なからず有意義なことであり、実建物のシステム応答に近づく可能性があると言えよう。

5.2 室内・床表面の温度変動

1) 各階の推移

計算期間を38日間(12/25~1/31)とし、計算結果の検討には1/15~1/24の10日間を使用した。この期間の日平均外気温は-7.3℃で、年間を通じて最も寒い時期(HASP札幌より)である。

CASE2の室内空気・床表面の温度変動を図7に示す。2・3階の平均室温は22.2 [℃]であった。日中に床暖房を停止しても、窓面からの透過日射熱により、室温変動を見ると躯体の熱容量により安定した推移(最高24℃、床暖房開始時(20:00)20℃以上)を示した。常時、2階と3階の温度差が約1℃あったが、この理由は、床暖房からの放熱面積の多少、内部発熱量の差異、屋根スラブの断熱断点に伴う熱損失の増大によるものと考えられる。1階の室温は2階よりも低かったため、上下階の相互換気は生じなかった。また、3階よりも室内取得熱量(日射量、内部発熱量、床暖房放熱量)が少ないことから、20℃を下回る期

表6 解析内容

解析内容		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
運転時間 [h]		8	10	12	6	8
床暖房設定温度 [℃] (6~18時運転停止)	18~20時 2h	運転停止	運転停止	40	運転停止	42
	20~22時 2h		40			
	22~0時 2h	40	46			
	0~6時 6h					

間があった。どのCASEにおいても、最も寒い時期であるにもかかわらず、建物の外断熱化による断熱性能の向上によって、室温変動は安定した。このことは、外断熱建物の床暖房による躯体蓄熱(夜間蓄熱+日中暖房停止)の可能性が大きいことを示唆している。

床表面温度を見ると、床暖房停止時(6:00)に30℃を示し、開始時(20:00)には24℃まで低下した。14時間の運転停止にもかかわらず温度低下は約5~6℃に留まった。床表面以外の壁面全体で見ても、外界変動の影響は小さく、温度変動の時間的な遅れは軽微であった。夜間蓄熱により、床表面温度は室温よりも常に高い状態に保たれ、躯体は放熱体として機能し、頭寒足熱となっていた。

2) 各CASEの推移

各CASEの温度推移の比較を容易にするため、1~3階の室内・床表面の平均温度を算出した。各CASEの室内空気・床表面の温度変動を図8、各CASEの温度特性(平均値・標準偏差・上限・下限・変動幅等)を表7に示す。CASE1・CASE2・CASE3において、温水の設定温度を等しく運転時間を2時間ずつ違えたところ、床暖房放熱量は、運転時間と概ね比例関係にあることが分かった。平均温度はCASE毎に約1℃の差が生じ、CASE3 > CASE2 > CASE1の順となり、標準偏差はCASE1 < CASE2 < CASE3の傾向を示した。温水の設定温度が40℃の場合、10時間運転(CASE2)であっても、最も寒い時期(1/20前後)の室温が20℃以上に保持された。最低でも10時間以上の運転を行うことで、安定した暖房環境の計画が可能であることが分かった。また、6~23時の温度変動幅は室内空気では3.7℃、床表面で7.7℃と小さく抑えられた。

CASE2・CASE4・CASE5は日平均温度が等しくなった。この理由は、床暖房放熱量がほぼ等しいからである。しかし、CASE4では極端に短い6時間内に熱を供給することになり、その分、床暖房の供給水温は高くなる。そのため、標準偏差が2.83と最も大きくなり、床表面上限温度は33.1℃を示した。ISO-7730では、最大暖房負荷時でも29℃以下にすることが推奨されていること⁷⁾から、床表面上限温度(33.1℃)が一時的ではあっても、避けるべき運転時間と言える。CASE5では運転時間がCASE2に比べて短縮した分、標準偏差は多少大きい、床表面上限温度の差は僅か0.6℃であった。輻射の影響を考慮し、床表面温度のみで評価するならば、CASE2・CASE5は快適な空間のように思われるが、続いて快適性と放熱量の点から評価を行った。

5.3 PMV・PPDによる快適性評価

各CASEの室内温熱環境が果たして快適であるか、否かを判断するため、PMV(予想平均申告)・PPD(予想不満足者率)指標⁹⁾を用いて評価した。ISO-7730では快適範囲として、-0.5 < PMV < +0.5、PPD < 10 [%]を推奨している。因みに、PMV: ±1.0 (PPD: 25 [%])、PMV: ±1.5 (PPD: 50 [%])、PMV: ±2.0 (PPD: 75 [%])である。PMVは代謝量、着衣量、空気温度、水蒸気分圧、平均輻射温度、平均風速の6要素から算出される。解析条件として代謝量1.2 [met]、着衣量1.0 [clo]、相対湿度40 [%]、平均風速0.1 [m/s]、外部仕事0 [W/m²]を与えた。平均輻射温度(MRT: 面積加重平均周壁温度)は面積比による方法で求めた。面積比は3つ(壁面・放熱面・窓面)を対象とし、まず放熱面は床表面温度(139.7 [m²])とした。壁面・窓面は、モデルの関係上、面としての温度出力が難しいこともあり、ここでは簡略的に作業を進めることにした。外壁・窓仕様における断熱性能の向上や解析結果を拠り所にし、壁面は室温(221.5 [m²])、窓面は15℃(18.8 [m²])と仮定した。各CASEの室温とPMVを図9、10に示す。

図9より、CASE4では一時的にPMV + 0.7と快適範囲を上回り、対照的にCASE1ではPMV - 0.6と下回った。CASE2ではPPD < 10 [%]の範囲内にほぼ収まり、快適な室内を維持する上で、床からの放熱設定が妥当なものであったと判断できた。図10より、ほぼ両CASE共に快適範囲内に収まっていた。CASE4では一時的に+0.5を超えているが、温度特性から判断すると、床表面の上限温度が高かったことが関係していると思われる。しかし、どのCASEにおいても、大きく快適性が損なわれるよう状況にならなかったため、床スラブ内の夜間蓄熱だけで十分に快適性を維持できていることが分かった。

5.4 躯体内部温度分布

全体として、視覚的にある時間帯の瞬間的な躯体内部の温度分布を表現することにした。特に、快適性が十分に確保されていたCASE2・CASE5の中から、CASE5(8時間運転)の南壁面の躯体内部温度分布(1/20)を図11に示す。図は、床暖房停止時の6:00と開始時の22:00を示している。屋根スラブは実建物に対応し、内断熱を採用している。そのため、断熱補強を施しているが、ヒートブリッジの原因となる断熱欠損は解消できず、屋根スラブ全体が低い温度分布を示した。

図11の左図(6:00)より、温度の高い箇所は床暖房の配管位置に相当する。床スラブの左側から右側に向かって温水が流れているので、外壁側にある配管の温度が高くなっていることが分かる。朝方の運転停止時刻まで42℃の温水が流れていたため、床スラブは全体的に高い温度分布を示した。同様に、外壁も配筋に架橋ポリエチレン管を付設した躯体蓄熱が可能となれば、熱損失量は増大するが、窓周辺の放射環境の改善に結びつく可能性があると思われる。

図11の右図(22:00)より、日中の外気温や特に日射の影響による地盤と屋根スラブ温度の上昇、対照的に日中の暖房停止による床スラブ温度の低下が見られた。しかし、16時間の暖房停止にもかかわらず、外壁のコンクリート躯体の温度変動幅は小さく抑えられた。また、床スラブは常に室温よりも高い状態の放熱体として機能し、屋根スラブや外壁・窓周辺は吸熱側にあることを確認した。

5.5 貯湯槽水温・放熱量・最大出力

先に、深夜電力を利用した夜間蓄熱のみで、日中の室内温熱環境の快適性を維持できるかどうか、PMV・PPD指標を用いて評価した。しかし、同量の熱を供給したとしても、運転時間によって床暖房の設定温度が異なってくるため、ボイラーの最大出力(設備容量)に影響が現われてくる。システムの稼働時間を減らせば、その分大きな設備を必要とする。そこで、本システムにおける設備容量の検討を行った。

各CASEの貯湯槽水温の推移を図12に示す。6:00~10:00、18:00~22:00の床暖房停止中に温度勾配が小さいのは、その時間帯に給湯が使用され、貯湯槽内に10℃の補給水が供給されたことによる。日中の排熱回収+ヒータ熱回収の大半は、暖房分に寄与し、床暖房開始時では全CASEで約55℃を示した。これは、排熱利用と深夜電力利用の組み合わせたことで、補助ボイラーの負担を減らすと共に、暖房立ち上げ時の負荷を軽減する方向に働いた結果である。ただし、本解析では床暖房の設定温度を固定しているため、貯湯槽水温がその温度に達していない時間帯が生じていた。このことは、給湯だけでなく暖房側にもある程度の容量を兼ね備えた補助ボイラーが必要であることを意味している。

この貯湯槽水温を元に、各CASEの放熱量・最大出力を図13に示す。補助ボイラー放熱量(比重×比熱×流量×[設定温度-貯湯槽水温])と

床暖房放熱量(比重×比熱×流量×[入口温度-出口温度])の差額は排熱回収+ヒータ熱回収量によるものである。補助ボイラーからの投入熱量は、ほぼCASE1 < CASE2 = CASE4 = CASE5 < CASE3の順となり、そ

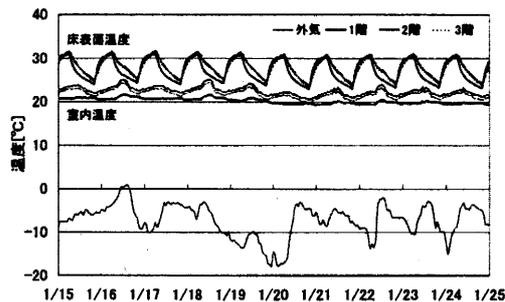


図7 CASE2の室内空気・床表面の温度変動

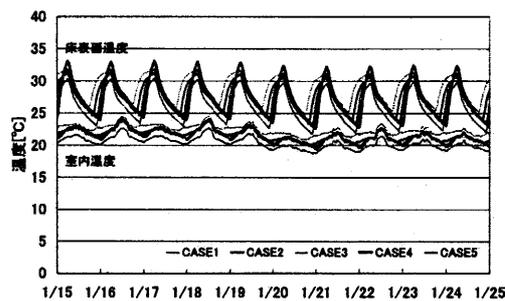


図8 各CASEの室内空気・床表面の温度変動

表7 各CASEの温度特性(1/15~1/24)

解析CASE	日平均温度		標準偏差		平均温度		上限温度		温度変動幅		平均 入口温度 出口温度
	室内	床表面	室内	床表面	室内	床表面	室内	床表面	室内	床表面	
CASE1	20.4	26.0	0.86	2.36	20.5	25.3	22.6	30.3	3.9	8.5	40.0
CASE2	21.6	27.7	0.79	2.18	21.6	26.9	23.7	31.2	3.7	7.7	40.0
CASE3	22.4	28.9	0.73	1.95	22.4	28.2	24.4	31.8	3.5	7.0	40.0
CASE4	21.5	27.3	0.97	2.83	21.7	27.0	23.9	33.1	4.1	10.1	46.0
CASE5	21.4	27.3	0.87	2.48	21.5	26.6	19.8	23.0	3.9	8.9	37.4
							19.7	22.9			42.0
											35.4

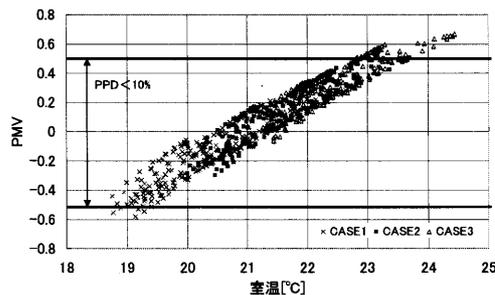


図9 CASE1・2・3の室温とPMV(1/15~1/24)

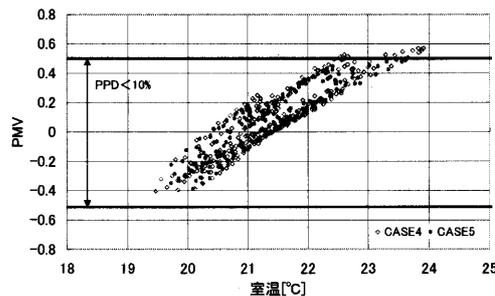


図10 CASE4・5の室温とPMV(1/15~1/24)

れに対応して床暖房放熱量も同じような傾向を示した。床暖房放熱量の内、排熱回収+ヒータ熱回収量は全体の約20%に留まることが分かった。注目すべき点は、CASE4の最大出力がCASE2・CASE5の約1.3倍となり、概ね15[kW]程度の補助ボイラーが必要となったことである。システムの稼働時間は短縮できたものの、設備容量が増大する結果となった。

6. まとめ

本研究では、RC造外断熱住宅での躯体蓄熱型暖房システムの有用性を検証し、本シミュレーションの条件下で、以下の知見が得られた。

- 1) 実測とシミュレーションから得られた諸係数を照合し、シミュレーションの整合性を試みた。
- 2) 夜間蓄熱(8時間運転以下)を行った場合、日中に暖房を停止しても、温度環境を維持することができた。

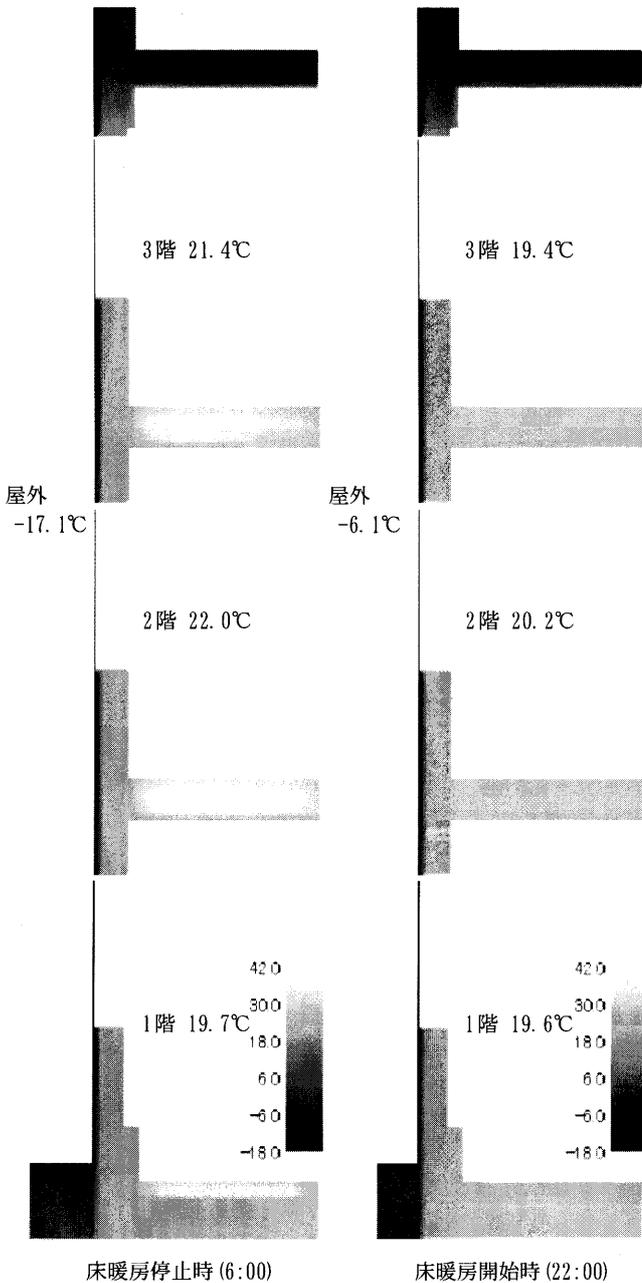


図11 CASE5の南壁面の躯体内温度分布(1/20)

- 3) PMV・PPD指標を用いて室内温熱環境の快適性を評価し、本システムの有用性を確認した。
- 4) 燃料電池の排熱回収だけでは暖房分が不足し、補助ボイラーの必要性を確認した。
- 5) 放熱量・最大出力を算出し、各CASEの運転時間と設備容量について考察し、短時間での躯体蓄熱型暖房の不合理性を確認した。

今回、採用した躯体蓄熱型暖房システムは、1980年代の初めに、高断熱建物の床冷暖房に適用されている。しかし、夜間の間欠運転を前提に、本システムの有用性が高いことを明らかにしたのは、本報告が最初のものである。今後は、システムの運転効率・運転制御等の検討も必須である。

【参考文献】

- 1) S・V・ボタンカー原著、水谷幸夫・香月正司共訳：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析、森北出版
- 2) 社団法人 空気調和・衛生工学会 編著：空気調和・衛生工学便覧 [第13版] 1基礎篇、社団法人 空気調和・衛生工学会
- 3) 田中俊六、武田仁、足立哲夫、土屋喬雄 共著：最新建築環境工学 [改訂2版]、井上書院
- 4) 濱田靖弘、中村真人、窪田英樹ら：自然エネルギー・燃料電池活用型住宅用複合システムの研究 (第1報) 固体高分子形燃料電池試験機の発電・排熱回収特性、空気調和・衛生工学会論文集、pp. 19-27, 2003. 7
- 5) 宇田川光弘：標準問題の提案(住宅用標準問題)、日本建築学会環境工学委員会 熱分科会 第15回熱シンポジウム、pp. 23-33, 1985
- 6) 荒谷登、鈴木憲三：建築家のための熱環境解析入門、北海学園大学図書刊行
- 7) 社団法人 建築設備技術者協会 編著：建築設備設計マニュアル [第三版] I 空気調和編、技術書院
- 8) 石野久彌、郡公子：輻射暖冷房設計法のための評価研究 (1) 床暖房方式の予熱特性、日本建築学会計画系論文集 No. 470, pp. 11-17, 1995. 4
- 9) 森太郎、宮坂敏一、横山知恵、絵内正道、羽山広文：外断熱建物における躯体蓄熱を利用した暖冷房に関する研究 - 躯体中心に配管をした場合の蓄放熱性状 -、空気調和・衛生工学会北海道支部 第38回学術講演論文集、pp. 31-34, 2004. 3
- 10) 菊田弘輝、絵内正道、羽山広文、森太郎、宮坂敏一：住宅用CGSの排熱利用した躯体蓄熱型暖房装置の数値解析による効果検証、空気調和・衛生工学会北海道支部 第38回学術講演論文集、pp. 51-54, 2004. 3
- 11) 菊田弘輝、絵内正道、羽山広文、森太郎、宮坂敏一：住宅用CGSの排熱を利用した躯体蓄熱と暖冷房システムに関する研究、日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 77, pp. 253-258, 2004. 7

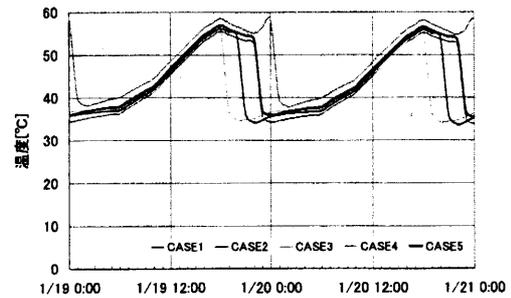


図12 各CASEの貯湯槽水温の推移

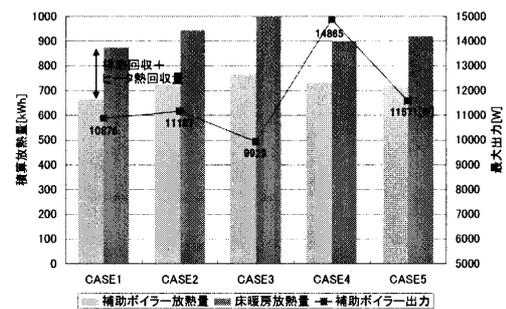


図13 各CASEの放熱量・最大出力(1/15~1/24)

(2004年6月22日原稿受理、2004年12月14日採用決定)