

## 奨励研究助成実施報告書

助成実施年度	2021 年度
研究課題（タイトル）	換気駆動力を用いた熱回収型放射暖房システムの開発
研究者名※	黄 載雄
所属組織※	信州大学大学院 総合理工学研究科 工学専攻 建築学分野 李研究室
研究種別	奨励研究
研究分野	その他
助成金額	80 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

( ) は、報告書提出時所属先。

# 大林財団 2021 年度奨励研究助成実施報告書

所属機関名 信州大学大学院 総合理工学研究科  
申請者氏名 黄 載雄

研究課題	換気駆動力を用いた熱回収型放射暖房システムの開発
<p>(概要) ※最大 10 行まで</p> <p>床暖房方式は人体熱快適性が高く、騒音やドラフトが少ないとされるが、床下熱損失が大きいという課題がある。対流式暖房に比べ、快適さを得られるが、床下空間から発生する熱損失が大きいと言われている。床暖房研究では、自然エネルギー利用が進んでいるが、熱損失の再取得にはまだ着目されていない。</p> <p>本論文では、床下熱損失を効果的に減らす方法として、エアフローシステムを床下空間に適用し、換気と熱回収を併用する放射暖房システムを提案する。冬期の模型実測と CFD 解析を用いて、熱回収効果と省エネルギー効果を確認し、実用可能性を検証する。本システムと既存の床暖房システムの暖房負荷を比較し、熱回収効果及び省エネルギー効果を確認する。最後に、CFD 解析を用いた実大スケールでのケース別検討により、本システムの実用可能性を確認する。</p>	

## 1. 研究の目的

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究では、換気駆動力を活用した外気導入型床暖房システムを提案する。外気導入型床暖房システムとは、床下空間に適用されたエアフロー方式で外気を取り込み、床表面温度と地中温度差による熱損失を回収する。エアフロー方式は、窓に取り付けられたエアフローウィンドウや、壁や天井裏で空気を循環させる全館空調システムとして使用され、熱損失が発生しやすいところで外気を導入し、換気と熱損失の削減を同時に実現するものである。本研究で提案した外気導入型床暖房システムは、エアフロー方式を適用し、建築基準法で定められた室内 0.5 回/h の換気回数を確保しつつ、床暖房から発生する地中への熱損失を効率的に回収することが期待される。図-1、2 に熱回収システムの概念図を示す。床下空間は、外気を取り入れるための開口部と、可変ファンで構成される。可変ファンの制御により、空気の流れを正・逆方向に変えることで、冬期には外気を室内に導入する

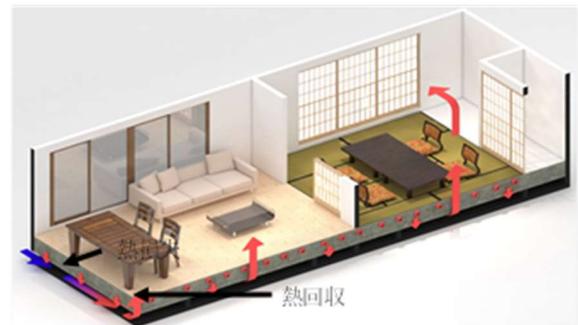


図 1 システム概念図

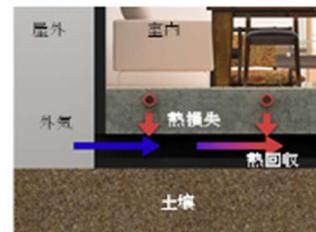
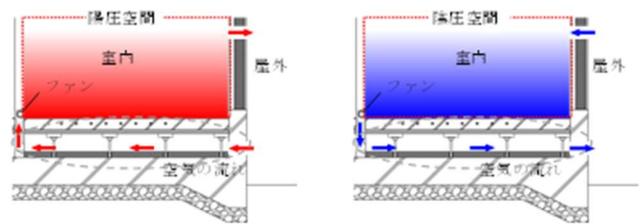


図 2 システム概要図

ことにより床暖房から発生する熱損失を回収（図-3(a)参照）する。また、夏期には室内空気を外部に取り出すことで夏に発生リスクがある逆転結露を防ぐ（図-3(b)参照）ことができる。



(a) 冬季 (b) 夏季

図3 季節による空気の流れ

## 2. 研究の経過

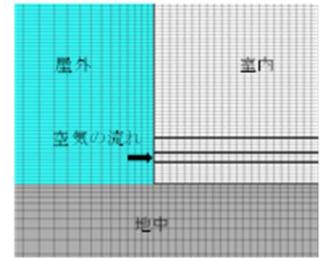
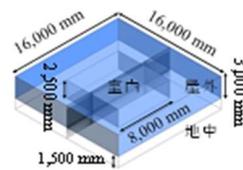
(注) 必要なページ数をご使用ください。

### 実大スケールでの解析

CFD シミュレーションモデルを用いて実大スケールでの熱・空気移動解析を行い、提案システムの熱回収効果について評価する。図-4 に解析モデルを示す。

図-5 に検討ケースの断面図を示す。(a) 土間床ではコンクリート土間が 180 mm であり、断熱材は 30 mm で基礎の高さは 210 mm である。土間に床暖房を埋め込む形であり、基礎一体型であるため、既存の構造に比較して床部の高さが低いのが特徴である。(b) 熱回収型床（土間）は土間に熱回収型システムを適用したケースである。コンクリート土間と断熱材の間に 65mm の通気層を設け、外気を室内に導入するものである。(c) 埋設式二重床は基礎としてコンクリート 150 mm、断熱 30 mm、空気層を 65 mm、モルタル 70 mm、パーティクルボード 20 mm で基礎高さは 335 mm で構成されている。(d) 熱回収型床（二重床）は埋設式二重床の空気層に給気口を用いて、外気を室内に導入する形の構造である。

表-1 に数値解析条件と材料の物性値を示す。コンクリート及び土壌の蓄熱効果により暖房負荷に変化を考慮するため 24 時間非定常計算を行い、解析間隔は 1 分おきとする。計算を簡略化するため、暖房方式はコンクリート及びモルタルのボリュームに直接 100 W/m<sup>2</sup> を直接与えることで床暖房と仮定し解析を行う。また、本計算では室内空間の日射計算を除き、土壌の温度変化は地面に測定値の温度を与えた。通気層及び換気層を持つモデルにおいては放射防止シートを付着し、放射率は 0.1、放射防止シートが付着されてないところを 0.8 とする。解析の初期条件は土間床と熱回収型床（土間）では室内及び土間コンクリートを 20 °C、地面に接して



(a) 解析概要

(b) メッシュ

図4 解析モデル

表1 解析条件

項目	内容
メッシュ条件	1,100,000 個
解析領域	地中: 16.0(x) × 16.0(y) × 1.5(z) m 室内: 8.0(x) × 8.0(y) × 2.5(z) m
乱流モデル	Abe-Kondo-Nagano low Re number k-ε model <sup>35)</sup>
放射モデル	Surface to surface
スキーム	SIMPLE
室内温度	20 °C
熱容量	100 W/m <sup>2</sup>
解析時間	24 h
換気量	80 m <sup>3</sup> /h
物性値 (空気)	密度: 1.20 kg/m <sup>3</sup> 熱膨張係数: 0.00335 1/k
物性値 (熱伝導率)	コンクリート: 1.6 W/(m·K) 断熱材: 0.04 W/(m·K) パーティクルボード: 0.12 W/(m·K) モルタル: 1.5 W/(m·K)
物性値 (放射率)	放射防止シート: 0.1 放射防止シート以外: 0.8

いる断熱材及び通気層は地表面温度と同じである9℃、埋設式二重床と熱回収型（二重床）では室内、モルタル、パーティクルボードは20℃、通気層及び基礎コンクリートは9℃とすることで解析を行う。

### 解析結果

図-6によると、室内20℃維持のエネルギーは、土間床242MJ、熱回収型床（土間）184.2MJ、埋設式二重床192.1MJ、熱回収型床（二重床）151.9MJであった。また、図-7では床からの熱損失を示す。図-8の熱バランスでは、土間床で地中54.7MJ、室内112.8MJ、外部3.6MJ移動し、熱回収型（土間）では地中19.3MJ、室内70.8MJ、熱回収35.8MJ、外部3.6MJ。熱回収型（土間）適用で地中熱損失64%、エネルギー23.8%削減。埋設式二重床で地中2.9MJ、室内110.9MJ、外部3.7MJ移動し、熱回収型（二重床）では地中-4.7MJ、室内73.6MJ、熱回収35.8MJ、外部3.3MJ。本システム適用で、土間床23.8%、埋設式二重床20.9%エネルギー削減した。床下基礎コンクリートは床下熱を蓄熱し熱損失を減らす。特に、熱回収型（二重床）では基礎コンクリート蓄熱された熱も回収し、基礎温度が地面温度より低く地中熱損失がマイナスの値を示している。

### 実験棟における数値解析

以上の解析では、1日を対象にしたため、外気環境での条件および蓄熱による熱の移動に限界があった。そこで、今解析では実験の設計を行い、その解析モデルを利用して非定常計算と定常計算の比較を行うことで本システムの断熱効果とシステムの改善を行う。

本解析では二日間に外気の測定値を利用して解析を行う。解析期間は2023年2月13日から15日の48時間のデータを用いる。地中の物性値及び初期条件は測定した地中温度を、使用する。解析空間においては3300mm×2400mmの空間、暖房方式は床暖房の使用を想定する。この解析モデルを利用することで以上の解析では検討できなかった部分についての追加検討を行うことで本システムの実用妥当性及び最適設計に必要な改善点を検討する。

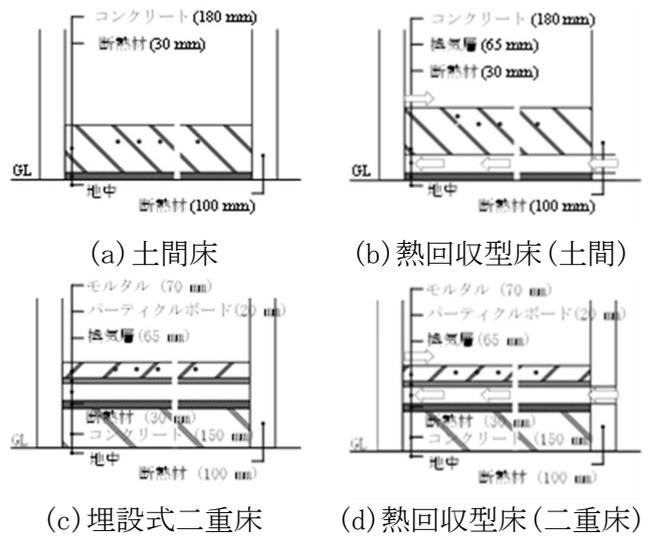


図5 ケース詳細図

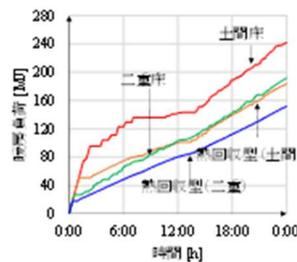


図6 エネルギー消費量

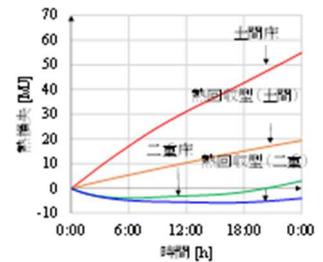


図7 床下熱損失

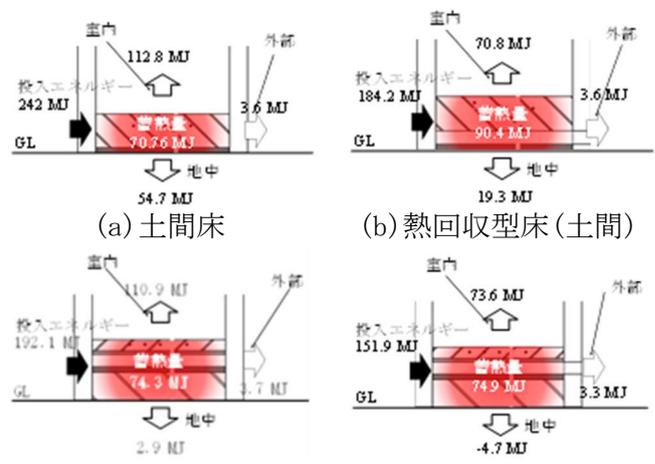


図8 エネルギーバランス図

### 3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

#### 実験棟における非定常解析

本解析では以前の解析での限界を改善するため、二日間に外気の測定値を利用して解析を行う。また、実験棟という空間を解析対象とすることで解析空間の現実性及び実用性を確保する。実験棟は9.94m<sup>2</sup>で約6畳の空間、天井高さは2400mmと設計を行った。実験棟は本システムを適用しない従来型と本システムを適用した熱回収型で2つのシステムでの比較を行う。

実験棟では床暖房方式において、電気パネルを利用する乾式床暖房を適用した。従来型では床暖房及び床下空間の構成をフローリング15mm、熱源として電気式床暖房12mm、合板24mm、断熱材としてスタイロフォーム50mm、床下空間620mmと設計した。熱回収型においては床暖房及び床下空間の構成をフローリング15mm、熱源として電気式床暖房12mm、合板24mm、通気層50mm、断熱材としてスタイロフォーム50mm、床下空間620mmと設計することで2つの実験棟における本システムの有無による熱回収をより精密に確認できるようにした。地中温度の測定のため2000mmの塩ビパイプ表面に地中表面温度・100mm・200mm・300mm・400mm・600mm・1000mm・1500mm・2000mmで9点の測定点及び風向風速・外気温を用いて測定を行った。測定日は2023年2月10日から17日で一週間行い、測定場所は長野県駒ヶ根市で行われた。この測定データから地中の物性値及び初期条件を設定し、床暖房から発生する熱損失を非定常計算による熱損失の比較を数値的に検討した。解析期間は2023年2月13日から15日の48時間のデータを用いる。

次の図で解析結果を示す。従来型では35.57kWhのエネルギー消費量を熱回収型では31.37kWhのエネルギー消費量が発生し、本システムを使うことで12%のエネルギー消費量の削減を見せた。床下における熱損失は従来型では7.37kWh、熱回収型では2.06kWhで、本システムを使用することにより熱損失を27.95%まで抑えることができた。本解析から本システムを適用することで床暖房から発生する熱損失を回収することができ、全体的な暖房負荷を減らせることができることを確認した。しかし、本解析においては大空間での大量のメッシュ及び非定常解析による莫大な解析の時間により構造的な考慮は行われてない。そこで、構造的な考

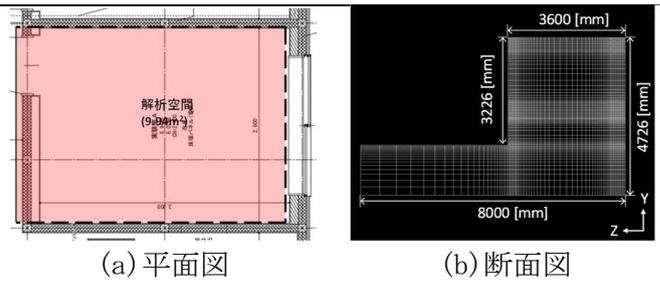
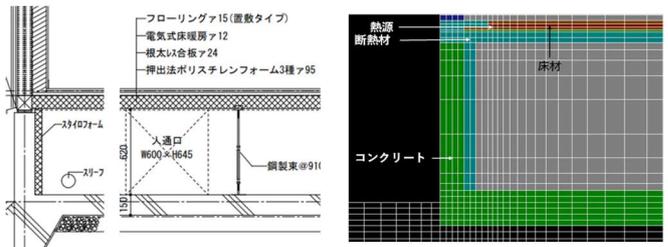
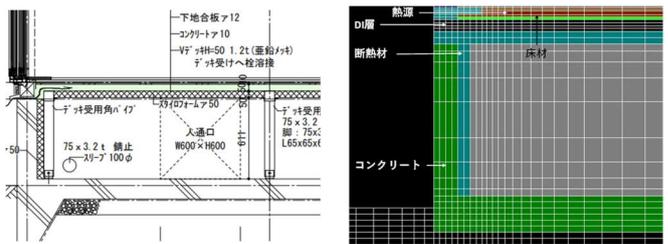


図9 解析概要図



(a) 断面図 (b) 断面図(メッシュ)

図10 従来型床断面図



(a) 断面図 (b) 断面図(メッシュ)

図11 熱回収型床断面図

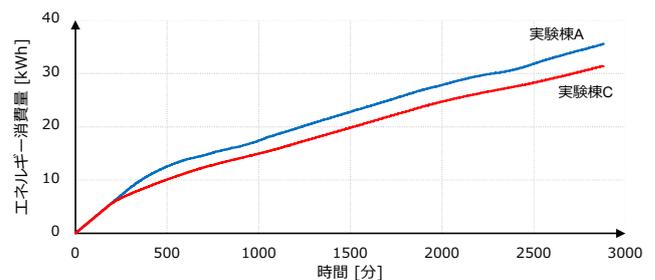


図12 解析結果

表2 部位別熱損失

実験棟	従来型	熱回収型	比率
部位	熱損失 [kWh]	熱損失 [kWh]	熱回収型/従来型[%]
床	7.37	2.06	27.95
壁	0.33	0.32	96.96
窓	7.14	7.02	98.31
換気負荷	16.61	16.88	101.62
蓄熱	4.11	5.11	124.33
エネルギー	35.57	31.37	88.1

慮した解析を行うため、一部の部分だけを定常計算を用いて計算を行い、非定常解析との比較を行うことで解析の効率を増やす。

### 定常計算と非定常計算の比較

定常計算では床の温度を 30℃床下空間の温度を 0℃として温度差 30℃の環境での本システム有無での検討を行う。解析に使用されたモデルは断熱材 50mm だけを用いた従来型（定常）と通気層 50mm と断熱材 50mm を用いた熱回収型（定常）で 2 つのモデルを用いて解析を行った。解析結果は次の図で示す。解析結果では従来型（定常）の U 値が 0.56 W/(m2K)、熱回収型では 0.15W/(m2K)で、27.6%で熱損失を抑えることができたことを確認した。非定常解析で確認した 27.95%と定常解析での 27.6%で気温の変動による誤差を除いておくとかなり近接した結果を見せており、これによって定常計算による解析での簡略化ができると考えられる。

### 構造を考慮した定常解析の比較

以前の解析から定常解析での簡略化ができることが分かった。本解析では構造的な面を考慮したより現実的な解析を行う。床の荷重を支えるためにアルミデッキを通気層に置く。また、床暖房の設置するため工夫としてコンクリートを利用した Case-1 と板を利用した Case-2 で定常解析を行い、従来型（定常）及び熱回収型（定常）との比較を行った。Case-1, 2 の解析条件は次の表で示す。また、解析結果は次の図に示す。Case-1 は従来型（定常）に比べ 111.42%, Case-2 では 40.63%で熱損失量の比率を確認した。Case-1 で従来型（定常）より高い結果を見せた理由としてはコンクリート及び熱伝導率が高いアルミからの熱橋現象が行ったからだと考えられる。この熱橋現象を減らした Case-2 では熱回収型（定常）には至らなかったが、熱損失率を 59.37%まで抑えることができ、構造を考慮した解析においても本システムを適用することで床下に逃げる熱を大きく抑えることができることを確認した。



図 13 定常解析概要

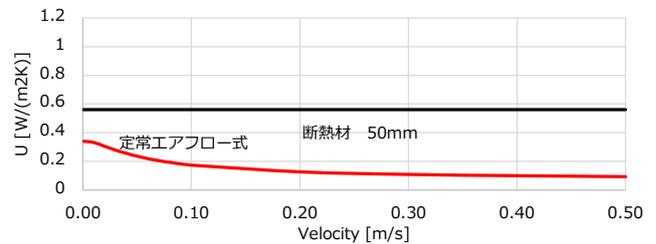
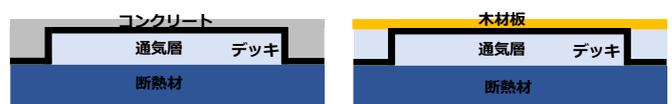


図 14 解析結果



(a) Case-1

(b) Case-2

図 15 ケース概念図

表 3 ケース別構成

ケース	部位	厚さ
Case-1	コンクリート	10
	デッキ	1.7
	通気層	50
	断熱材	50
Case-2	板	10
	デッキ	1.7
	通気層	50
	断熱材	50

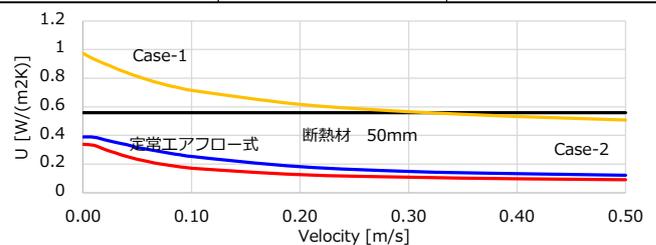


図 16 解析結果

## 4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

今回の研究により換気駆動力を活用した外気導入型床暖房システムの断熱性能及び実現性を評価することができた。本システムを適用することで構造考慮をした設計でも熱損失を既存の方式より約 60%を減らすことが確認できた。しかし、本システムは室内を陰圧に維持することで外部からの空気を導入する方式であるため、外気の風速などの影響により空気の流れを均一にすることが困難なことが問題である。それを解決するための機械式換気を用いた設計など実用化に必要な研究が必要だと考えられる。