

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04730

研究課題名（和文）ウランバートル市の都市居住者ゲルの熱環境改善及び大気環境負荷低減

研究課題名（英文）Improvement of thermal environment of gers for urban habitat in Ulaanbaatar aiming for emission reduction of air pollution from gers

研究代表者

萩島 理 (Hagishima, Aya)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：60294980

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：ウランバートル市のゲル地区におけるゲルで使われる石炭ストーブによる大気汚染物質排出の削減と室内の熱環境改善を目指し、現地で実現可能なゲルの断熱改修手法の開発を行った。具体的には、テント用防水性布でシート状断熱材を被覆した断熱パネルをマジックテープで相互に接着し、ゲルの壁及び屋根部分に室内側から固定する手法を開発した。また、ドア開放時の換気熱損失低減のための組み立て式の風除室の設計を行った。更に、現地において、開発した断熱改修手法一式の実証テストを行った。加えて、断熱改修前後のゲルの室内熱環境の実測を行い、その特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

石炭暖房の排ガス削減の解決策として、1) ゲルから地域暖房が完備した集合住宅への移住、2) 電気暖房への置換、3) ゲル外皮の断熱気密性改善、などが定石であろう。しかし、現地の経済状況でこれを実現するのは容易ではない。これに対し本研究は現地調査に基づき世界的にもユニークな移動住居の実態及び室内熱環境の特性を明らかにすると共に、affordableな断熱改修手法を提案したものである。日本ではSDGsと言えば地球温暖化や脱炭素が注目されるが、世界人口の7割を占める開発途上地域の住環境の改善もまた重要な課題であり、本研究はSDGs 目標11「住み続けられるまちづくりを」に貢献しようという取り組みである。

研究成果の概要（英文）：In order to reduce air pollutant emissions from coal stoves used in gers in Ulaanbaatar and to improve the indoor thermal environment in the gers, affordable methods of insulation retrofitting for gers were developed. Specifically, insulation panels covered with waterproof fabrics, which are glued to each other with Velcro tape and fixed to the wall and roof of a ger from the interior side, were proposed. In addition, an assembled windbreak room was designed to reduce ventilation heat loss when the door is open. Furthermore, a set of the developed insulation retrofit methods was tested on site. Furthermore, the indoor thermal environment of gers before and after the insulation retrofit was measured and its characteristics were clarified.

研究分野：建築環境工学

キーワード：伝統建築 断熱改修 暖房負荷 大気汚染

1. 研究開始当初の背景

モンゴル国は近年急激な都市化にインフラ整備が間に合わず、2010年時点でインフラの整備された集合住宅に住むのは全世帯の32%で、残りは上下水道等の公共サービスがない「ゲル地区」に住む。ゲル地区は主にウランバートル市内の北側の山裾に位置し、居住者自作の戸建住宅（バイシンと呼ばれる）やゲルが並ぶ。ゲルとは円形の平面を有し木材による骨組みをフェルトで覆った遊牧民の移動住居であるが、現在のウランバートルでは都市定住者の住まいとして広く使われている。このゲル地区の住居で暖房に使われる石炭ストーブの排ガスのため、現在のウランバートルは冬季には北京や上海を上回る世界最悪の大気汚染に悩まされている。大気汚染物質の排出削減のためには、現在の石炭ストーブの電気式暖房への転換や建物の高断熱高気密化が必要となるが、移設を前提としたゲルは通常の断熱改修手法の適応は困難である。

2. 研究の目的

前述の状況に対し、本研究課題はウランバートル市の定住者のゲルにおける石炭ストーブ暖房による大気汚染物質の排出削減と室内熱環境改善を目指し、現地で実現可能な改善手法を提案する事を目的とする。

3. 研究の方法

本課題の研究機関に先立ち2018年8月に2週間の現地調査を実施し、ゲル地区及びそこに立地するゲルの実態や政府による対策プロジェクトの動向等について情報収集を行っている。その結果に基づき、本課題は以下の流れで実施した。

1. 現地調査データに基づく分析

ゲル地区のゲルのエネルギー消費及び大気汚染物質排出量の多寡に影響を及ぼす以下の項目に関してデータ分析を行った。

- (1) 建物条件：形状、サイズ、外皮厚さ及び材質
- (2) 建物工法：部材製造方法や製造業者、流通販売状況、設置・組立方法
- (3) 暖房手法：暖房器具、燃料、使用期間と時間帯、年間燃料消費量
- (4) 暖房エネルギー消費量に関わる居住者行動
- (5) ゲル居住者の室内環境に対する満足度、環境改善への意欲

2. ゲルの断熱改修手法の開発

前項の調査結果に基づき、都心部でゲルに居住する人々の経済条件、現地で入手可能かつ安価な建材を勘案した上で、羊毛フェルトの外皮に断熱層を加える断熱改修手法を検討した。加えて、ワンルームのゲルで住人が屋外トイレを利用する際のドア開放による換気熱損失を減らすための風除室のデザインを検討した。

3. 断熱改修手法の実証テスト

ウランバートル市の Songino khairkhan district にて、1つの敷地に立地するほぼ同じ大きさのゲル2戸（A、B と呼称）を選定し、内1戸に開発した断熱カバー及び風除室を試験施工し実証テストを行った。実測期間は2020年1月18日からの29日間である。ゲルAについては、最初の9日間（Phase#1）は現状のまま、その次の10日間（Phase#2）は室内の壁及び屋根に開発した断熱パネルを設置した条件、最後の10日間（Phase#3）は断熱パネルに加え風除室を設置した。ゲルBは断熱改修をしないベースケースとして位置付けているが、最後の10日間は風除室を設置している。期間中は、室内各部の温湿度、屋外気温、風速、日射量に加え電気ストーブ設

置時の消費電力の計測を行った。また住人から改修に対するフィードバックを得た。

4. 研究成果

4.1 ウランバートルにおける現地調査の分析結果

現地調査において 49 戸のゲルの居住者に対する聞き取り及びゲルの構成材料の販売及び製造業者に対する調査のデータの分析を行った。以下に結果の要点を記す。

第一点は、都市定住者向けとして市場に流通し、実際に使われているゲルは、その設計が高度に標準化されている事である。調査対象 49 戸の 84%は直径 6.2m, 床面積 約 31 m²の 5-wall と呼ばれるゲルであった。各パーツの大きさが標準化されており、マーケットでは多くの業者が同じサイズでデザイン・材質が違うパーツを販売している。これにより、居住者は市場でゲルの部材を一式購入するだけでなく、自分の予算や好みに応じて部品を複数の小売業者から購入できる、組立方法が同じなので特別な建築技能者でなく誰でもゲルを建設できる、居住しているゲルの状況により痛みが進んだ部材を交換できる、部品を知人や家族から譲り受けるなどリユースが容易、覆いとなる羊毛フェルトの枚数を変える事で外界の季節変化への対応ができる、などの利点を生んでいる。

第二点はゲルの Affordability の高さである。極度にデザインが標準化されている事により、多数の国内零細業者が部材を個々に製作できるためコストは低く、4~5 人が住む標準的なゲル一式の市場価格は日本円で僅かに 15 万円程度である。これは調査した 49 戸の世帯の多くが所有していた大型液晶テレビや自家用車よりも安い値段である。都市へ流入した多くの低所得世帯がローコストである程度心地よい住居を得る事が可能なウランバートルの現状は、アジアの他の国々で見られる Urban Informal Settlement、特にスラムなどとは大きく様相が異なる。

第三点は居住者のゲルの熱性能に対する知識の少なさである。冬季は外気温度が-30℃を下回る極寒ではあるが、ゲルの覆いとなる羊毛フェルトの断熱性は低い。また、遊牧生活に合わせて発達したゲルは本来、移動住居であり、長期間の固定的な使用は想定していない。経年劣化が生じる事から製造業者はフェルトや防水シートなどを数年毎の交換を推奨しているが、実際には新築した時からフェルトの交換を行ってない世帯が多数あった（最長 20 年間）。また、フェルトの購入時における判断材料として、その断熱性能は殆ど含まれていなかった。加えて、上下水道のインフラがないゲル地区では、敷地内の小屋にトイレが設置され、ゲルの住人は真冬に何度もドアを開けて外に出て用を足す事になる。小さなワンルームのゲルでは、ドアを開ける度に温度差換気により急激に外の寒気が室内に侵入して室温は急低下する。こうした状況ではあるが、ゲルの室内熱環境について住人の 11%はやや快適、59%は快適、15%はとても快適であると答えている。極寒の地で断熱性が極めて低い住居での生活を人々が快適だと感じているのは、空調による温度制御が整った住居に対する知識や経験が無い、という事だけではあるまい。床面積が小さいゲルの中央に設置された石炭ストーブの火力が強力である事から、放射熱取得により居住者が暖を採るスタイルである事が大きいと思われる。しかし、ゲルの低い断熱性能を上回るための過剰な石炭燃焼は、現在のウランバートルの深刻な大気汚染の一因となっている。

4.2 ゲルの断熱改修手法の開発

前述の現地調査結果を踏まえると、ゲルの低価格(本体一式 15 万円) の相場に慣れ親しんだ人々にとって、ゲルの断熱性向上に対する WTP (支払い意思額)は相当に低いであろう事から、断熱改修手法はとにかくローコストである事が必須と考えられる。また、

1) 建設時には骨組を立ち上げた後にシート状フェルトを周りから複数人で骨組みに乗せ、引っ張り形を整える、2) 定住ゲルであっても年に数回はゲルの解体組み立てが行われる、という点も重要である。即ち、シート状断熱材を羊毛フェルトと同様に骨組みの外側に覆いとして設置する場合、施工や解体組立時に作用する引張力により、断熱材の形状の変形・破損が生じる可能性が高い。

以上を勘案し骨組の内側に断熱層を設置する事とした。具体的には、曲面を有するゲルの形状に沿うように、テント用防水性布でシート状断熱材を被覆したパネル 20 組を壁及び屋根部分にマジックテープで相互に接着しロープで骨組に固定する方式とした。

まず、日本国内で高温設備機器の断熱カバー製作を行っている業者に断熱パネルのサンプル品の製作を依頼した上で、このサンプル品を現地の縫製業者 3 社に示し、製作コストや入手可能な材料についてヒアリングを行い、試作品の製作を依頼した。その結果、実装可能なコストとクオリティを有する試作品を提案した業者に対しゲル 1 棟全体をカバーするための部材を発注した。

ドア開放時の換気熱損失を抑制する手法については、既に現地調査において複数のゲルで自作の風除室が設置されていた事を参考に、現地の建設部材のコスト及び施工の容易さを検討した上で組み立て式風除室の設計案を作成した。既にゲル本体のデザインは高度に標準化されている事から、この風除室を組立解体可能なデザインとして標準化させる事ができれば、多数のゲルにおける実装が容易になると期待される。

4.3 冬季のゲルにおける開発した断熱改修手法の実証テスト

ウランバートル市のゲル地区である Songino khairkhan district にて、1 つの敷地に立地するほぼ同じ大きさのゲル 2 戸（ゲル A,B と呼称）を選定し、2020 年 1 月 18 日～2 月 16 日に室内熱環境の実測を行うと共に、開発した断熱パネル及び風除室を試験施工した。図 1 にゲル A の断熱改修前後の写真を示す。



図 1 断熱改修手法の実証テストの状況

ゲル A の居住者の断熱パネルによる改修に対する評価は概ね好評であった。居住者は元々、強い火力のストーブを使っていた事から、電気ヒーターによる暖房には物足りなさを感じていたようであるが、日中の室温は 25℃程度が維持されていた。しかし、気

温が下がる夜間は劣化した分電盤により電気ヒーターを最大出力で利用できなかった事から室温が 20°Cを下回る時間帯も見られた。ゲル A で更に風除室を設置した Phase#3 では、居住者の満足度はより高まった。屋外が-25°Cの極寒であっても、住人は室内では T シャツなどの軽装であり、そのままの格好で敷地内の屋外トイレに行く。よって、外から戻った直後のゲル室内はより高温である事が彼らにとって重要となる。風除室によるドア開放の室温低下緩和は、住人の満足度を大きく高めたと言える。

実測期間の後半には、governor office (25th khoroo, Songino khairkhan district) の担当者が断熱改修したゲルを視察に訪れた。彼らからは、屋根部分の断熱は室内側からでなく木製フレームの外側とフェルトシートの間を設置した方が安全性の面で望ましい、との意見が寄せられた。また、断熱パネルの材料費のみを行政が補助金でサポートし、作成はゲル地区の住民たちが行うという方法を取ってはどうか、住民も自分の生活環境が良くなる事なので喜んで参加するし、失業中の住民にとっては良い仕事になる、という建設的な提案がなされた。今回、現地に設置した断熱パネルと風除室は合計 7 万円で、材料費と人件費はそれぞれ約 70%, 30%である。ゲル 1 棟の値段が約 15 万円である事から、改修に伴う材料費 5 万円程度は、普及のための適切な値段に収まっていると言える。

4.4 冬季の現在のゲルの室内熱環境の特性

石炭ストーブにより暖房されたゲルの室内各部温度の時変動は激しく、そのパターンは日毎に異なっていた。これは、居住者が石炭を加える量やタイミングがストーブの火力の時変動に強く影響を与えるためである。現代的な空調設備の熱負荷計算において室温一定を仮定する事が一般的であるが、燃料ストーブを使う伝統建築の熱環境の実態がそうした仮定とは大きく異なる事を示唆している。また、室内温度の空間非一様は強く、天井付近の温度は時に 35~40°Cと高い値を示す一方、床付近は常に 10~15°C程度と低い値となっている。

一方、石炭ストーブ暖房で居住者が終日入室していた条件でのゲルの室内空気温度及び平均放射温度 MRT の経時変化を分析したところ、室温は時に 10°Cを下回り ASHRAE の快適温度条件の範囲外となる時間帯が多い一方、MRT は常に室温より 15~20°C程度高い事が確認された。外気温度が-30°Cを下回る厳冬のモンゴルで断熱気密性に乏しいゲルで人々が温熱快適性を維持できる理由が、燃料ストーブによる人体への直接的な放射加熱である事の証左である。この結果は、モンゴルの遊牧民族の長い歴史の中で、ゲルが何故あのような形状になったのか、という問いへの答を示している。多数のゲルを調査した既往研究では家具の配置や空間の使われ方には一定の類似性を有する事が指摘されているが、中でもストーブの設置位置は必ず円形平面の中心となっている。このストーブの位置と半径が 2.5m 程度というゲルのサイズは、ストーブから居住者を見る形態係数を一定の水準に維持し、居住者が放射暖房による温熱快適性を確保するための幾何学的な制約条件とも言えよう。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Uelun-Ujin Purev, Aya Hagishima	4. 巻 7(2)
2. 論文標題 A Field Survey of Traditional Nomadic Dwelling Gers Used as Urban Habitats in Ulaanbaatar, Mongolia	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Evergreen	6. 最初と最後の頁 155-171
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Purev Uelun-Ujin, Hagishima Aya, Buyan Munkhbayar	4. 巻 48
2. 論文標題 Indoor thermal environment of Mongolian traditional mobile housing used as urban habitat in winter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Building Engineering	6. 最初と最後の頁 103927 ~ 103927
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jobe.2021.103927	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Purev Uelun-Ujin, Hagishima Aya	4. 巻 28
2. 論文標題 Development of an affordable method for improving thermal insulation performance of Mongolian traditional mobile housing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIJ Journal of Technology and Design	6. 最初と最後の頁 NA
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Uelun-Ujin Purev, Aya Hagishima
2. 発表標題 GER INSULATION IMPROVEMENT USING GLASS WOOL INSULATION PANEL IN INFORMAL SETTLEMENT AREA OF ULAANBAATAR, MONGOLIA
3. 学会等名 21ST Cross Straits Symposium on Energy and Environmental Science and Technology (CSS-EEST)At: SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY, SHANGHAI, CHINA (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Uelun-Ujin Purev, Aya Hagishima
2. 発表標題 Field measurement of indoor thermal environment of a retrofitted ger in Ulaanbaatar, Mongolia
3. 学会等名 International Exchange and Innovation Conference on Engineering & Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	池谷 直樹 (Ikegaya Naoki) (70628213)	九州大学・総合理工学研究院・准教授 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
モンゴル	モンゴル科学技術大学		