寒冷地における熱収支シミュレーションツールを適用した環境設計手法の検討

—モンゴル・ウランバートルにおける微気候に着目した環境負荷の少ない生活・居住環境づくりに関する研究—

川岸梅和 — * 1 湯浅 昇 — * 2
北野幸樹 — * 3 杉本弘文 — * 4
梅干野晃 — * 5

キーワード：
ウランバートル, 環境設計, 熱環境評価, 3D-CAD, 地域特性, 環境負荷, 生活・居住環境づくり

Keywords:
Ulaanbaatar, Environmental design, Thermal environment evaluation, 3D-CAD, Regional characteristic, Environmental burdens, Creation of living and residence environments

STUDY OF ENVIRONMENTAL DESIGN APPROACH USING THE HEAT BALANCE SIMULATION TOOL IN COLD REGIONS

— Research on the creation of living environments with low environmental burdens with attention focused on microclimate in Ulaanbaatar, Mongolia —

Umekazu KAWAGISHI — * 1 Noboru YUASA — * 2
Koki KITANO — * 3 Hirofumi SUGIMOTO — * 4
Akira HOYANO — * 5

This research studies the application of the evaluation technique of thermal comfort in the outer spaces of urban areas, focusing on thermal environment evaluation indexes, i.e. HIP, MRT and thermal storage (thermal insulation), to the heat balance simulation tool in cold regions in Ulaanbaatar, Mongolia, climatically characterized by extreme cold and dry where urbanization is rapidly spreading. In addition, the research presents whether the environmental design of city blocks using the heat balance simulation tool in cold regions will help restrain the consumption of resources and reduce environmental burdens, and the methodology and the concept of creating living environments.

This paper reports the research frame and technique to apply the heat balance simulation tool, which was developed as a design support and environmental design tool mainly for reducing the heat island effect and cooling the city, to the cold regions, the results of a field survey on the information about buildings and the surface of the ground, and the collection and preparation of data required to perform heat balance simulations.

1. はじめに

近年、地球温暖化やヒートアイランド現象といった環境問題に対し、建築分野の責任は大きく、より一層環境に配慮した生活・居住環境づくりが求められている。そうした中で、計画・設計段階における熱環境への配慮の必要性も広く認識されつつあり、設計者が熱環境に配慮した設計を行うことを支援する3D-CADをベースとした熱収支シミュレーションツール^{注1)}も梅干野らによって開発されている。

モンゴルの首都であるウランバートル(北緯47.6°、東経106.6°、標高約1300m)は冬の寒さが厳しく、冬季の最低気温は-40℃に達することもある「世界で最も寒い首都」のひとつに挙げられる地域であり、現在徐々に近代化への流れの中で、都市化・定住化が急速に進行している。2007年現在、国土の0.3%に過ぎないウランバートルにモンゴルの全人口の約39%(1,031,200人)が集中し、その人口増加は顕著であり、人口増加率は民主化した1990年から2007年において約186%に上る。市街地においては、これまでにない人口・産業の一極集中や都市基盤の未整備、都市計画の不在などにより、都市環境汚染(定住ゲル地区(図1)の拡大、自動車の排ガスや定住ゲル地区の石炭ストーブから排出される煙・火力発電の煙による大気汚染、廃棄物処理問題、河川・地下水の汚染、市街地内のオープンスペースやコンモンスペースで行われる建設ラッシュ等)や市街地内のオープンスペースや集合住宅地区内のコンモンスペースで行われる宅地(主に集合住宅)の開発事業が拡大している。

一方、モンゴルの伝統的な遊牧社会は自然環境や家畜と密接に関わり合いながら、遊牧民自ら草原地を移動し、環境に適応すると共に、自然への環境負荷が少ない資源循環型の生活体系を有していると言え、モンゴルでは現在において全世帯数の約27%が草原のゲルに暮らす遊牧民世帯である。

川岸らはこれまで、ウランバートル首都圏域における都市開発・都市計画の動向を把握した上で、ウランバートルに立地する集合住宅地区を対象として居住者の意識・活動特性(ソフト)と立地・周辺環境特性、生活・居住環境特性(ハード)の関係性について考察する^{既発表論文1)2)3)}と共に、遊牧民と都心部定住ゲル居住者、遊牧民と集合住宅居住者の生活環境に関する意識特性・活動特性の比較検討から伝統的な遊牧社会の中で育まれてきた環境負荷の少ない遊牧民の生活体系と生活・コミュニティ意識の関係性について^{既発表論文4)5)}調査・研究を展開してきた。

遊牧の中で培ってきた資源循環、環境共生への志向・住まい方の分析、及び集合住宅地区居住者の意識・活動特性、その受け皿とな

図1 定住ゲル地区

図2 ウランバートルの月別平均気温

¹⁾ 日本大学生産工学部創生デザイン学科・建築工学科 教授・博士(工学)
(〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

²⁾ 日本大学生産工学部建築工学科 准教授・博士(工学)

³⁾ 日本大学生産工学部建築工学科 専任講師・博士(工学)

⁴⁾ 日本大学生産工学部生命工学・リサーチ・センター
ポストドクター研究員・博士(工学)

⁵⁾ 東京工業大学大学院 教授・工博

¹⁾ Prof., Dept. of Conceptual Design and Architecture & Architectural Engineering,
College of Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

²⁾ Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, College of
Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

³⁾ Assistant Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, College of
Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ Postdoctoral Researcher, College of Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

⁵⁾ Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

図3 本研究が目指す方向性

る生活空間の特性の分析と合わせて、環境設計の観点から寒冷地であるモンゴル特有の生活及び空間の提案を行うことは、地域特性に立脚した環境負荷の少ない生活・居住環境の創出に向けた計画的な方法論の構築に寄与できると考える。（図3）

本稿では、モンゴルの極寒・極乾燥という気候の特色を踏まえ、モンゴル・ウランバートル都市部における熱収支シミュレーションを適用した環境設計に基づく生活・居住環境づくりに関する検討を行うための手法、研究フレーム等を整理し、今後の資源循環型・環境共生社会におけるハードとソフトが調和する生活・居住環境、都市環境の創出に向けた研究へ展開させていくものである。

2. 研究の位置付け

熱収支シミュレーションに関連する研究として、梅干野らは熱環境評価指標²⁾として提案しているHIP（ヒートアイランドポテンシャル）等に着眼し、都市のヒートアイランド化を抑制するための都市の被覆（建築や道路の表面）、緑化、土地利用等について論じており、これらの研究を基に3D-CADと連係したシミュレーションツールを開発し、¹⁾実在市街地における熱環境解析²⁾等を行っている。これらは、ヒートアイランドへの対応に向けた研究であり、気温を低下させる概念に基づいている。しかし、モンゴルにおいては、極寒・極乾燥という気候の特色から、HIPは日本に比べて極めて低くなることが予想できると共に、1年の多くの期間は気温が低いため、「資源やエネルギー消費を抑え、冬暖かい生活・居住空間の形成」が重要な観点になると思われる。以上のようなことから、本研究においては、HIPはもとより、MRT（平均放射温度や蓄熱（保温）に観点をあてた熱収支シミュレーションツールの適用方法を検討し、極めて特徴的な環境下における熱収支シミュレーションを可能にする手法への応用と展開を図る。そして、寒冷地における都市の微気候の形成手法の構築を試みると共に、ウランバートルの一街区を対象とした環境設計に取り組む。このような寒冷地における熱収支シミュレーションツールの適用について研究を行った例はなくこの点が本研究の独自性であると考えている。

3. 研究の流れ

本研究では、近年のウランバートルの都市問題を鑑みて、その地域性（気候・風土）を踏まえた上で、建築計画、環境、材料、それぞれの観点を考慮し、今後のウランバートルにおける都市のあり方、生活・居住環境づくりのあり方を提示することを試みる。

具体的には、まず、冬季を対象として、1) 現状のウランバートルにおける都市環境、生活・居住環境を分析・評価する（現状街区の評価）。次いで、その結果を基に、2) 現状を部分的に改良・改修や緑化を行った街区、生活・居住空間を計画・提案し、その評価を行う（部分改良街区の評価）。最終的には、3) 地域性や街並み、景観を考慮した上で、環境負荷の少ない快適な資源循環型の生活・居住

環境づくりを行う（全面改良街区〔提案街区〕の評価）。提案街区においては、建物の配置・形状や建築材料、植栽を大きく変えることも視野に入れながら、①エネルギーや資源の消費を極力抑え、冬暖かい快適な生活・居住環境づくり、②熱収支シミュレーションツールを用いた熱環境評価および環境設計（「ホットスポット」の形成、屋間の蓄熱で夜間暖かく快適に過ごせる工夫等）のコンセプトを基盤として提案する。

更に、提案街区において、数パターンの集合住宅の断面仕様（壁・屋根・床）による熱環境の変化の比較・分析・評価、及び計画・デザイン的な変化（ピロティ・ヴォイド空間の形成、開口部、植栽配置、屋上・壁面緑化の効果等）による比較・分析・評価を行う。

以上のように、冬季の生活空間としての都市内の屋外空間に着目し、そこでの快適な熱環境形成について熱収支シミュレーションツールを用いて表面温度、MRT等を用いて評価し、屋外空間の熱的快適性と蓄熱によるエネルギー消費量の軽減の観点から検討する。

4. ウランバートルにおける街区調査

4. 1 調査対象街区の選定

本研究における熱環境評価の対象街区は、集合住宅や商業・業務施設等の各種施設が多く立地するウランバートル有数の繁華街であり、市街地の中心部に位置し、川岸らがこれまで居住者の生活意識、生活・コミュニティ活動の実態についてのアンケート・ヒアリング調査、及び生活・居住空間調査³⁾を行った集合住宅地区（SUKHBAATAR区KHAN UUL（第5号）地区⁴⁾）を含む300m×200m程度の範囲とする（図4）。既発表論文^{1) 2) 3)}対象街区に含まれるSUKHBAATAR区KHAN UUL（第5号）地区の詳細は図5のようであり、集合住宅の北側、東側には幹線道路が走り、植栽が配置されている。

本研究では、上述した街区を対象に現状街区の熱収支シミュレーションを行うと共に、部分改良街区、前面改良街区（提案街区）の計画・提案においては、これまでの研究と連関させ、居住者意識及び活動特性を考慮した都市環境、生活・居住環境づくりへと展開させる。

図4 調査対象地区（点線範囲内）と現地写真

図5 SUKHBAATAR区KHAN UUL（第5号）地区〔図4の黒部分〕

4. 2 街区調査の概要

熱収支シミュレーションによる熱環境評価を行うにあたり、入力条件として、表1に示すようなデータが必要となる。建物のファサード（立面）、建物周辺の道路、街路樹等の植栽については、2006年8月、2009年5月に現地調査を行った。詳細な現地調査項目は表2に示す通りである。一階店舗の歩道への増築行為については、増築面積、階段等の設置状況も合わせて把握した。また計算用の3次元CAD^{注5)}を作成するため、現地でファサードの写真を撮影し、CADによるファサード（立面）の作図を行った。（図6）現地調査による調査シート記入例を図7に示す。

本研究では、ウランバートルの熱環境設計及び景観の観点から建物や土地の被覆状況、街路樹等の植栽に着目している。現地調査においては、土地被覆の状況（アスファルト・裸地（土）・タイル等）、

表1 必要データ項目

分類	項目	収集方法
建物	ファサード(立面)	現地調査
	屋根伏せ	現地調査
	各部位の断面仕様・構成材料	現地調査
	室温条件(冷暖房、換気回数(窓の開閉)等)	ヒアリング調査
土地被覆	道路の幅員	現地調査
	被覆材の種類・断面構成	現地調査
	植栽の配置・種類・樹高(日射透過率)	現地調査
		ヒアリング調査
気象データ	日射量	(1時間毎)気象庁よりデータ入手(※)
	気温	
	相対湿度	
	風速	
	雲量	

※日本においては気象庁より入手可能であるが、モンゴルでは1時間毎のデータ入手は困難である

表2 現地調査項目

項目	内容
道路幅員	道路幅員
道路及び歩道	舗装の有無
	舗装材の種類
	駐車スペース・バス停等の位置・大きさ
植栽地	植栽の配置
	植栽の種類・高さ・樹形
	緑地(芝・花壇等)面積
集合住宅	1階店舗の歩道への増築行為の状況(増築面積、階段等の設置状況)
	ファサード調査(写真からのCADによる作図)
	断面仕様(壁面・屋根・床)
	(資料の入手)
気象データ	気象観測機器の設置(2009年1月)

図6 現地調査を基に立ち上げた対象街区のファサード(例)

図7 現地調査により作成した調査シート

図8 熱収支シミュレーションツールにおける計算の流れ

街路樹の配置・種類・樹形・樹高についても調査を行った。更に、ストリートファニチュア（ベンチ等）や街灯、看板等の構築物についても配置や形状、大きさを調査した。

また、入力条件として必要な気象データ（表1）に関しては、ウランバートルにおいて公開がされているデータでは不十分なため、本研究グループで気象観測機器を設置^{注6)}し、インターネットを経由してリアルタイムに気象観測データを収集できるネットワークをモンゴル科学技術大学の協力の基で構築した。（2009年1月実施）気象観測機器で入手するデータを補完するデータとしては、websiteの気象データ^{注7)}を使用する。

5. 熱収支シミュレーションツールによる熱環境評価

5. 1 熱環境評価のフロー

現状街区、部分改良街区、全面改良街区（提案街区）の環境評価として、本研究では熱収支シミュレーションツールによる熱環境評価を行う。生活の場として屋外空間が滞在する人へのどのような熱環境を提供しているか、また周辺へどのような熱的影響を及ぼしているか等、数値的シミュレーションにより検証する。

熱環境評価においては、建物および屋外空間の被覆材料と空間形態、建物の断面仕様（材料・厚さ）による街区の熱環境への影響をより明確に確認するため、まず、表面温度に着目して評価を行う。具体的には、対象街区において、熱収支シミュレーションツールにより全表面温度を算出する。次いで、屋外空間の熱的快適性についてはMRT（平均放射温度）（地上高さ1.5m）を用いて、また、周辺環境へ与える熱的負荷は、街区から大気へ放出される顕熱量の指標であるHIP（ヒートアイランドポテンシャル）を用いて評価する。

本研究で用いる熱収支シミュレーション手法では、3次元の形状を再現した建物・地表面・その他構築物について、全表面をメッシュ分割した上で各質点に熱物性値を与え、気象データを入力条件として、表面の熱収支計算と部材断面方向の一次元非定常熱伝導計算を行い、時系列の表面温度を算出する。計算の流れを図8に、実際の作業画面の例を図9に示す。

5. 2 気象データについて

本研究では、現地に設置した気象観測機器から入手する測定データを基に、冬季の最も寒い日の晴天日を対象として、入力条件の気象データ（1時間毎の日射量、気温、相対湿度、風速、雲量）を作成する。

5. 3 街並み3D-CADの作成

現地調査結果を基に、対象街区の建物のファサード（立面）の作

図9 ツール上の実際の作業画面の例（建物壁体における断面構成・物性の入力）

成を行い、更に屋根伏せを図面化し、それらを基に計算用の3次元CAD(図10)を完成させる。壁及び屋根の断面仕様・材料物性は、現地で入手したデータより図11のように設定した。これらは計算の入力条件となる。

建物以外の地表面被覆についても、現地調査を基に、舗装や裸地、芝地といった被覆種類、植栽や構築物の情報を計算条件として再現・入力する。

表面温度を表示するための計算メッシュサイズは、ベランダ等の詳細な部分の影響を確認するため20cmメッシュにより行うものとする。尚、3D-CADの作成も計算メッシュに合わせて詳細に行う。

6. まとめ

建物の外部空間は、建物および屋外空間の被覆材料や空間形態によって特有の微気候が形成され、その微気候は屋外での人の活動に大きく影響を及ぼすと共に、都市気候や室内気候にも影響を与える要因になると考えられ、環境負荷を低減し快適な都市環境、生活・居住環境を創出するための重要なキーワードになると考えられる。

本稿では、極寒・極乾燥という極めて特徴的な気候を有するモンゴル・ウランバートルの街区を対象とした熱環境シミュレーションツールを寒冷地において適用させていくための研究フレーム、並びに建物や地表面情報に関する現地調査結果、熱収支シミュレーションに必要なデータの収集状況を報告し、ヒートアイランドに対して、極寒・極乾燥に対応する空間を暖かくするという視点で、熱収支シミュレーションへの適用方法について整理した。

伝統的な遊牧社会の中で育まれてきた環境負荷の少ない遊牧民の生活(暮らし方)を継承すると共に、それらの生活体系に調和する都市環境を創出していくためには、人々の生活活動特性に立脚したハードとソフトの複合的観点からの生活空間づくりへの対応と展開が必要不可欠であろう。今後は現状街区の熱環境評価を行い、その結果を踏まえて、部分改良街区、全面改良街区(提案街区)を提示する。更に、建物や屋外空間の被覆材料や空間形態が人の熱的快適性に及ぼす影響と如何に省資源・省エネルギーに寄与できるかについて研究を展開していく。

謝辞

本研究は、文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業「生命工学を応用した資源循環型社会の構築に関する研究」を推進している日本大学大学院生産工学研究科 生命工学・リサーチ・センターの研究の一環として行われている。加えて、平成20年度私立大学等経常費補助金特別補助「大学院整備重点化経費」の助成を受けた研究成果を含むものである。また、調査にあたりモンゴル科学技術大学・ゴンチクバト教授の多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

注

- 1) A&A株式会社と東京工業大学梅干野研究室の協同により熱収支シミュレーションツール「サーモレンダー」が開発されている。尚、この一連の研究により、2007年日本建築学会賞(技術)を受賞している。
- 2) 熱環境評価指標として、梅干野らによりHIP(ヒートアイランドポテンシャル)及びMRT(平均放射温度)が提唱されている。HIPとは、街区の全表面における各微小面の表面温度と気温の差を積算し、街区の面積で割ったものであり、街区が大気を暖める度合いを評価するものである。MRTとは、気温と共に暑さ寒さに大きく影響する熱放射の度合いを評価するものであり、対象街区の屋外空間に滞在する人の熱的快適性を評価するものである。
- 3) 調査項目は、半径500m領域の施設分布状況、コモンスペースにおける土地利用区分(交通系・コモン系・緑地系)、集合住宅の平面構成(屋内共用空間面積、住戸プランタイプ等)等である。(既発表論文1)、2)
- 4) 1960年に竣工された囲み型配置形態、レンガ造(床・天井・屋根は木造)の3階建て2棟、4階建て1棟からなり、住戸形式は階段室型である。集合住宅の1階部分は主に店舗として使われている。
- 5) 本研究ではA&A株式会社が開発・販売しているVector Worksを使用。
- 6) 設置した観測機器は、①風速計、②温湿度計、③日照計、④長短波放射計、⑤雨量計、⑥データロガー・プロトコル変換器である。また、観測機器の設置場所はモンゴル科学技術大学(モンゴル・ウランバートル

図10 3D-CADによりモデル化した対象街区の一部

図11 熱収支シミュレーションツール上での壁及び屋根の設定

- 市街地内)の屋上である。
- 注7) モンゴルでは我が国と異なり、気象観測システムおよびそのデータの管理・提供システムが整備されていない。
- また、電力事情も不安定なため気象観測機器からのデータ通信が一部欠落する状況がある。その補完のために使用する気象データは Weather Underground で提供されているものを用いている。
- (URL: <http://nihongo.wunderground.com/global/stations/44292.html>)

本研究に関連する既発表論文

- 1) Mitsuhiro Hasegawa, Umekazu Kawagishi, Ishjams Gonchigbat, Takumi Nakanishi (2004.5) Study on the Living Space Planning in Ulaanbaatar, Mongolia - Common Spaces in Apartment Complexes -. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, AIJ, AIK, ASC, vol. 3 no. 1, 133-140
- 2) Umekazu Kawagishi, Susumu Ishii, Yoshimichi Tsuboi, Noboru Yuasa, Kazuo Usugi, Ishjams Gonchigbat, Badrakh Batbold, Mitsuhiro Hasegawa (2005.5) Study on the Living Space Planning in Ulaanbaatar, Mongolia Part 2 - Residential and Living Environments in Apartment Complexes -. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, AIJ, AIK, ASC, vol. 4 no. 1, 151-159
- 3) Umekazu Kawagishi, Susumu Ishii, Yoshimichi Tsuboi, Noboru Yuasa, Kazuo Usugi, Ishjams Gonchigbat, Badrakh Batbold, Koki Kitano, Hirofumi Sugimoto (2005.11) Study on the Living Space Planning in Ulaanbaatar, Mongolia Part 3 - Perceptions of Apartment Residents -. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, AIJ, AIK, ASC, vol. 4 no. 2, 415-422
- 4) Hirofumi Sugimoto, Umekazu Kawagishi, Koki Kitano, Ishjams Gonchigbat, Naoyuki Hirota (2007.11) Living Environment of Nomads Residing on the Outskirts of Ulaanbaatar, Mongolia - Dispositional Characteristics from the Perspective of a Comparison of Nomads and People Living in Ger Fixed Residences in the City-. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, AIJ, AIK, ASC, vol. 6 no. 2, 283-290
- 5) 杉本弘文、川岸梅和、北野幸樹、広田直行：遊牧民と集合住宅居住者の比較からみた生活環境に関する生活・コミュニティ意識の傾向的特性について -モンゴル・ウランバートル近郊に暮らす遊牧民の生活環境に関する研究-、日本建築学会技術報告集 第27号 pp.213-218、2008年6月

参考文献

- 1) 梅干野晃、浅輪貴史、中大窪千晶：3D-CADと屋外熱環境シミュレーションを一体化した環境設計ツール、日本建築学会技術報告集 第20号 pp.195-198、2004年12月
- 2) 梅干野晃、浅輪貴史、村上暁信、佐藤理人、中大窪千晶：実在市街地の3D-CADモデリングと夏季における街区のヒートアイランドポテンシャル、日本建築学会環境系論文集 第612号 pp.97-104、2007年2月

[2009年6月19日原稿受理 2009年11月9日採用決定]