公益財団法人大林財団

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）	建築壁体の熱移動に関する適応策のオプティマイズ探索
研究者名※	蟹澤 春樹
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　中谷研究室
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。

（奨励報告-様式 2）

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　　蟹澤　春樹

研究課題	建築壁体の熱移動に関する適応策のオプティマイズ探索

（概要）
本研究では、通気層を含む断熱材と熱容量の大きい材料による複層壁体における最適化を行った。最適化を行うにあたり、目的関数をタイムラグ(TL)及びデクリメントファクター(DF)、熱容量の大きい材料の厚さとする多目的最適化を行った。目的関数とした TL は熱が外面から内面に伝搬するまでの時間であり、DF は一定周期における内外表面の温度振幅の減少比である。設計変数として、熱容量の大きい材料の厚さ、断熱材の厚さ、断熱材の位置、壁体の方位、外気条件を変化させ、最適解の集合となるパレート解を算出した。本研究の指標においては、断熱材の位置における検討では、地域区分が寒冷の地域の地域であるほど内側断熱条件で最適である壁体の条件となり、地域区分が温暖の地域であるほど外側断熱条件で最適である壁体の条件であった。壁体の方位における検討においては、どの地域においても北側壁面において最適な壁体の条件が存在し、地域区分が温暖の地域であるほど南側壁面において最適な壁体の条件が存在した。

１．研究の目的

研究背景

建築物における二酸化炭素の排出量は、建設時と運用時を考慮すると、世界の二酸化炭素排出量の約 37%を占めている[1]。二酸化炭素を含む温室効果ガス(GHG)は、 温暖化や気候変動へ影響を与える。 IPCC 第 6 次評価報告書[2]によると、温暖化によって、近い将来 1.5℃の温度上昇が予測されている。建築物におけるエネルギー消費量は、世界のエネルギー消費量の 30%を占めており[1]、二酸化炭素の排出量を削減するために、建築物においてエネルギー消費量を削減する必要がある。

International Energy Agency (IEA)によると、2070 年までの期間に、公表政策シナリオと比較して、省エネルギーの建築物の建設や建築物の外壁などの省エネルギー改修工事が、建築物によるエネルギー消費量の約 30%を削減することに寄与すると示唆している[1]。外壁による建築物の省エネルギー化は、外気の影響を抑制し、効率的な空調効果をもたらすことで、建築物全体の省エネルギーへ寄与する。

断熱材

建築物外壁による省エネルギー化のために、最も効果的な手段の 1 つは、断熱材の使用である[3], [4]。断熱材は、厚さの増加によって熱抵抗が増加し、高い省エネルギー効果を得ることができるが、コストが高くなる[5]。そのため、断熱材の効率的な使用を考える必要がある。断熱材の

効率的な使用の為に、最適な断熱材の厚さの決定が行われてきた[6]–[18]。Al-Sanea と Zedan[16]は、リヤドの気候データを用いて，壁の向きが最適な断熱材の厚さの決定に与える影響を調査した。最適な断熱材の厚さを用いた場合、南面が最も熱負荷とコストが小さくなることを示した。Ozel[17]は、トルコ気候条件下の南向き壁面に対して断熱材の最適な厚さと位置の調査を行った。コスト分析による最適な厚さは 8.2cm であり、最適な断熱材の厚さは位置に依存しないことを示した。Bolattürk[18]は、トルコの 7 つ地域において、建物外壁の最適な断熱材の厚さを、年間冷暖房負荷を用いて比較分析を行い、都市ごとに最適な断熱材の厚さの必要性を示した。方位及び地域から最適な断熱材の厚さや位置を決定することは、効率的に高い省エネルギー効果を得るために重要な検討項目である。

熱容量

建築物の外壁においては、断熱材との組み合わせとして熱容量の検討は重要な項目の一つである。熱容量は、建築材料の質量に時間依存する特性であり、材料が熱エネルギーを貯蔵、放出する性質がある[19], [20]。例えば、パッシブ建築として熱容量は、建物の外壁で蓄熱体として利用し、日中に蓄えた熱エネルギーを夜間に室内もしくは室外へ放出することで、HVAC システムの利用を低減することが可能である[21]–[24]。熱容量の蓄熱能力を表す指標として、タイムラグとデクリメントファクターが用いられる。タイムラグは、壁の室外側と室内側でピーク温度に達するまでの時間ずれであり、デクリメントファクターは壁の室内側の温度変動の振幅を室外側の温度変動で除した値である[23]–[26]。Al-Sanea[27]はリヤド気候データを用いて、熱容量をもつ壁体の最適な断熱材の厚さと位置を検討した。1 層の断熱材の場合、最適な断熱材の厚さは位置に依存せず、2 層及び 3 層の断熱材の場合、最適な断熱材の厚さの合計は 1 層の場合と同じであることを示した。タイムラグ、デクリメントファクターの検討も行っており、熱抵抗値 R を一定とし、断熱材と熱容量の位置を変化させた場合に、最適な配置と最も不利な配置において、タイムラグは 6 時間から 12 時間に 2 倍の増加、デクリメントファクターは 1.3%から 0.13%に 10 倍の減少を示した。日本においては[28]、建築物の外皮性能を評価する基準として熱貫流率が用いられているが、熱貫流率は瞬時定常設定であり、熱容量の特性は考慮されていない。タイムラグとデクリメントファクターは、熱容量が考慮され、定常状態において同様の評価である壁体を適切に評価することが可能である。

多目的最適化

断熱材と熱容量の組み合わせでは、材料の厚さ、種類や壁体の層数、位置、分布を含む全ての可能性について考慮することは難しく、部分的な最適解しか得られない可能が考えられる。しかし、粒子群最適化アルゴリズムや遺伝的アルゴリズムといった最適化アルゴリズムを用いることによって、多量の条件から最適な組み合わせを求めることが可能である。Yang ら[29]は，粒子群最適化アルゴリズムに基づき、建築物の壁を通る熱流を最小化するための最適な断熱材と熱容量分布を決定する逆最適化手法を提案した。Sambou ら[30]は、遺伝的アルゴリズムを採用し、断熱材と熱容量の多層壁の最適化を行い、最適な層構成を示した。Lu ら[31]は組合せ最適化アルゴリズムを用いて、タイムラグとデクリメントファクターの観点から目的関数を設定し、最適な断熱材の位置、層数を示した。建築物の壁体は、複数層が採用されている場合が一般的であるため、あらゆる可能性を検討するためには、最適化を用いる必要がある。

通気層

建築物の外壁の検討において、通気層の導入も省エネルギーに有効な手段である[32]。日本においては、通気層を有する外壁の遮熱に関して、角舎、本間らは自然換気が行われる中空壁体の伝熱に関する一連の研究を行った[33]–[37]。海外においては、近年では通気ファサードとして研究が行われている。換気ファサードは外壁が直達日射から吸収する熱を放散し、それによって建物の室内の温度上昇抑制と冷房エネルギー消費量を低減する[38]。近年では不透明換気ファサード(OVF)が、建物の種類、気候、建築デザインに対応する解決策として考えられ、新築だけでなく改築にも適した解決策である[39]。López と Santiago[40]は、スペインの異なる気候帯における冬期の OVF の調査を行った。日射量と外気温度が上昇するにつれ、OVF を使用しない場合と比較して、暖房エネルギーの省エネルギー効果が増加することを示した。Gagliano ら[41]は、冬期と夏期の気象条件下で、異なる日射と風を考慮した CFD シミュレーションにより、無風ファサード（UF）と OVF の熱流体挙動を比較した。OVF は、無風ファサードと比較して、夏期には 40.0~50.0%の省エネルギー効果が得られ、冬期には 20.0~50.0%の省エネルギー効果が得られることを示した。通気層は、夏期及び冬期において省エネルギー効果が期待でき、室内の温度上昇抑制によってデクリメントファクターの最小化に寄与すると考えられる。

目的

断熱材、熱容量及び通気層を含む検討を行うことは、より省エネルギーに寄与する可能性があるが、検討は限られている[36]–[38]。Rahiminejad ら[42]は、換気されたファサードと木材及び断熱材で構成された壁体の動的挙動での、2 次元形状のシミュレーションと実験を行い、換気ファサードの熱抵抗を決定した。換気ファサードの熱抵抗は、壁全体の熱抵抗への寄与が、固体層と比較して高くなる可能性を示唆した。R. F. De Masi ら[37], [38]は、地中海性気候下において、OVF を含む壁体の熱湿気に関する屋外実験を行った。熱容量の蓄熱能力は省エネルギーに有効であるが、通気層を含む多層壁において、これまでの研究では考慮されていない。

本研究では、通気層を含む断熱材と熱容量の複合壁体のタイムラグとデクリメントファクターを用いて、断熱材と熱容量の厚さ、位置の検討を日本における気候によって最適化を行うことを目的とする。

---

[1]“Energy Technology Perspectives 2020 – Analysis,” IEA. https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020 (accessed Oct. 06, 2022).

[2]H.-O. Pörtner and D. C. Roberts, “Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability,” p. 3068.

[3]M. S. Mohsen and B. A. Akash, “Some prospects of energy savings in buildings,” Energy Convers. Manag., vol. 42, no. 11, pp. 1307–1315, Jul. 2001, doi: 10.1016/S0196-8904(00)00140-0.

[4]X. Zhang, S. Nie, M. He, and J. Wang, “Energy-saving renovation of old urban buildings: A case study of Beijing,” Case Stud. Therm. Eng., vol. 28, p. 101632, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101632.

[5]M. Ozel, “Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials,” Appl. Therm. Eng., vol. 31, no. 17, pp. 3854–3863, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.07.033.

[6]N. A. Kurekci, “Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling

degree-day values of all Turkey's provincial centers," Energy Build., vol. 118, pp. 197–213, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.03.004.
[7]Y. Kharbouch, H. Boushaba, and M. Ameur, "Optimisation of the insulation thickness for the external walls in Morocco while considering the effect of climate change," Therm. Sci. Eng. Prog., vol. 35, p. 101455, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.tsep.2022.101455.
[8]O. Kaynakli, "A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 16, no. 1, pp. 415–425, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.08.006.
[9]M. J. Al-Khawaja, "Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation," Appl. Therm. Eng., vol. 24, no. 17, pp. 2601–2610, Dec. 2004, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2004.03.019.
[10]B. Farhanieh and S. Sattari, "Simulation of energy saving in Iranian buildings using integrative modelling for insulation," Renew. Energy, vol. 31, no. 4, pp. 417–425, Apr. 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.04.004.
[11]"Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia - ScienceDirect." https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431109002816 (accessed Oct. 06, 2022).
[12]E. H. Ahmad, "Cost Analysis and Thickness Optimization of Thermal Insulation Materials Used in Residential Buildings in Saudi Arabia," p. 12.
[13]O. Kaynakli, "A study on residential heating energy requirement and optimum insulation thickness," Renew. Energy, vol. 33, no. 6, pp. 1164–1172, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.renene.2007.07.001.
[14]A. Ucar and F. Balo, "Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey," Appl. Energy, vol. 86, no. 5, pp. 730–736, May 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.09.015.
[15]A. Bolattürk, "Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey," Build. Environ., vol. 43, no. 6, pp. 1055–1064, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.buildenv.2007.02.014.
[16]S. Al-Sanea and M. Zedan, "Optimum insulation thickness for building walls in a hot-dry climate," Int. J. Ambient Energy, vol. 23, Mar. 2011, doi: 10.1080/01430750.2002.9674880.
[17]M. Ozel, "Effect of insulation location on dynamic heat-transfer characteristics of building external walls and optimization of insulation thickness," Energy Build., vol. 72, pp. 288–295, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.015.
[18]A. Bolattürk, "Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey," Build. Environ., vol. 43, no. 6, pp. 1055–1064, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.buildenv.2007.02.014.
[19]T. Nakaya, "Reduction the Effect of Heat Transmission for the Heat Capacity of Building Wall in Summer," Am. J. Agric. For., vol. 6, no. 4, Art. no. 4, Aug. 2018, doi: 10.11648/j.ajaf.20180604.15.
[20]E. Alayed, D. Bensaid, R. O'Hegarty, and O. Kinnane, "Thermal mass impact on energy consumption for buildings in hot climates: A novel finite element modelling study comparing building constructions for arid climates in Saudi Arabia," Energy Build., vol. 271, p. 112324, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112324.
[21]W. A. Y. Mousa, W. Lang, and W. A. Yousef, "Simulations and quantitative data analytic interpretations of

indoor-outdoor temperatures in a high thermal mass structure," J. Build. Eng., vol. 12, pp. 68–76, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.jobe.2017.05.007.
[22]M. Ozel and K. Pihtili, "Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations," Build. Environ., vol. 42, no. 8, pp. 3051–3059, Aug. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.07.025.
[23]H. Asan, "Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor," Energy Build., vol. 28, no. 3, pp. 299–305, Nov. 1998, doi: 10.1016/S0378-7788(98)00030-9.
[24]H. Asan and Y. S. Sancaktar, "Effects of Wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor," Energy Build., vol. 28, no. 2, pp. 159–166, Oct. 1998, doi: 10.1016/S0378-7788(98)00007-3.
[25]R. J. Duffin and G. Knowles, "A passive wall design to minimize building temperature swings," Sol. Energy, vol. 33, no. 3, pp. 337–342, Jan. 1984, doi: 10.1016/0038-092X(84)90163-4.
[26]H. Asan, "Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view," Energy Build., vol. 32, no. 2, pp. 197–203, Jul. 2000, doi: 10.1016/S0378-7788(00)00044-X.
[27]S. A. Al-Sanea and M. F. Zedan, "Improving thermal performance of building walls by optimizing insulation layer distribution and thickness for same thermal mass," Appl. Energy, vol. 88, no. 9, pp. 3113–3124, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.02.036.
[28]"建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律 | e-Gov 法令検索." https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=427AC0000000053 (accessed Nov. 17, 2022).
[29]J. Yang et al., "Inverse optimization of building thermal resistance and capacitance for minimizing air conditioning loads," Renew. Energy, vol. 148, pp. 975–986, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.083.
[30]V. Sambou, B. Lartigue, F. Monchoux, and M. Adj, "Thermal optimization of multilayered walls using genetic algorithms," Energy Build., vol. 41, no. 10, pp. 1031–1036, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.05.007.
[31]Y. Lu, J. Hu, and K. Zhong, "Optimization of insulation layer location and distribution considering maximum time lag and damping factor," Case Stud. Therm. Eng., vol. 30, p. 101766, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.101766.
[32]T. Zhang, Y. Tan, H. Yang, and X. Zhang, "The application of air layers in building envelopes: A review," Appl. Energy, vol. 165, pp. 707–734, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.12.108.
[33] 本間宏, 溝口久, "壁内中空層の自然換気による日射熱排除効果: 第 1 報-中空層中に生ずる気流および熱流についての実測結果," 空気調和・衛生工学会 論文集, vol. 11, no. 30, pp. 91–102, 1986, doi: 10.18948/shase.11.30_91.
[34] 本間宏, 溝口久, "壁内中空層の自然換気による日射熱排除効果: 第 2 報-中空層内に生ずる気流および熱流の計算法," 空気調和・衛生工学会 論文集, vol. 11, no. 30, pp. 103–114, 1986, doi: 10.18948/shase.11.30_103.
[35] 角舎輝典, 溝口久, 本間宏, "壁内中空層の自然換気による日射熱排除効果: 第 3 報-中空層壁体モデルの気象ばく露実験結果," 空気調和・衛生工学会 論文集, vol. 12, no. 34, pp. 91–99, 1987, doi: 10.18948/shase.12.34_91.
[34] 本間宏, 溝口久, "壁内中空層の自然換気による日射熱排除効果: 第 2 報-中空層内に生ずる気流および熱流の計算法," 空気調和・衛生工学会 論文集, vol. 11, no. 30, pp. 103–114, 1986, doi: 10.18948/shase.11.30_103.
[37]角舎輝典, 本間広, "壁内中空層の自然換気による日射熱排除効果 : 第 5 報-層内熱伝達率およびそれを

使用した動的数値解析,” 空気調和・衛生工学会 論文集, vol. 14, no. 41, pp. 61–72, 1989, doi: https://doi.org/10.18948/shase.14.41_61.
[38]J. Santa Cruz Astorqui and C. Porras-Amores, “Ventilated Façade with double chamber and flow control device,” Energy Build., vol. 149, pp. 471–482, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.04.063.
[39]M. Ibañez-Puy, M. Vidaurre-Arbizu, J. A. Sacristán-Fernández, and C. Martín-Gómez, “Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 79, pp. 180–191, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.059.
[40]F. Peci López and M. Ruiz de Adana Santiago, “Sensitivity study of an opaque ventilated façade in the winter season in different climate zones in Spain,” Renew. Energy, vol. 75, pp. 524–533, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.10.031.
[41]A. Gagliano and S. Aneli, “Analysis of the energy performance of an Opaque Ventilated Façade under winter and summer weather conditions,” Sol. Energy, vol. 205, pp. 531–544, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.05.078.
[42]M. Rahiminejad and D. Khovalyg, “Numerical and experimental study of the dynamic thermal resistance of ventilated air-spaces behind passive and active façades,” Build. Environ., vol. 225, p. 109616, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109616.

２．研究の経過

① プログラミングによる解析モデルの作成

本研究では、角舎のモデルを参考に通気層を含む 2 次元非定常熱伝導解析モデルを Python によって作成した。最適化において、1 解析あたりの解析時間が全体の解析時間の影響が大きいため、プログラムの高速化を行った。

② 解析モデルの比較

本モデルと他のモデルとの比較を行い、モデルの妥当性を検討した。比較対象は赤坂モデルによる遮熱断熱計算ソフトウェアである Shade Wall を用いて比較を行った。

③ 解析モデルに用いる変数の決定

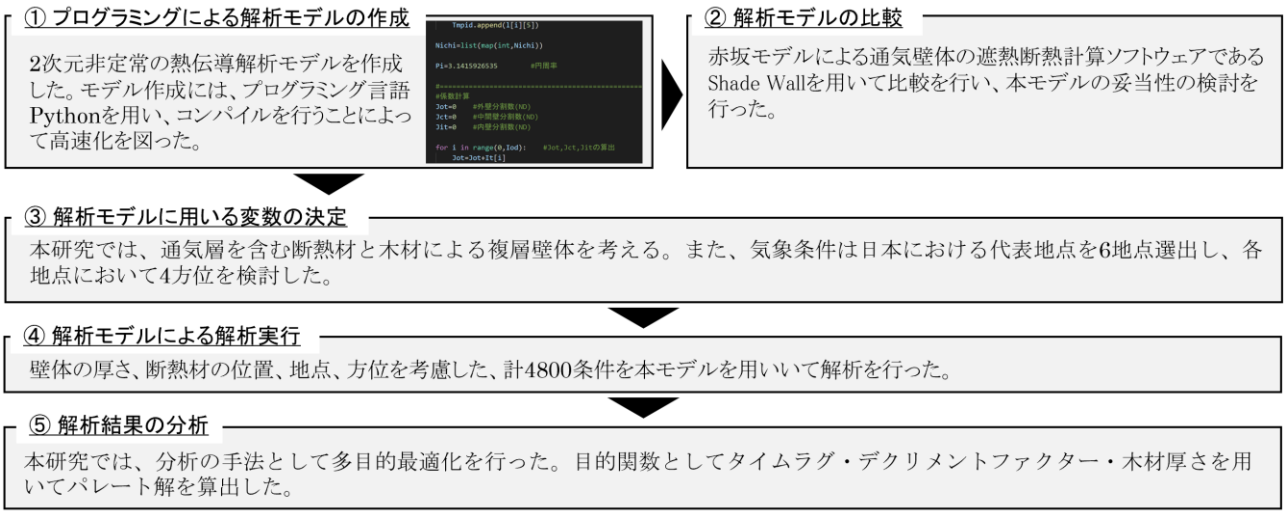
解析で用いる各種パラメータの検討を行った。壁体モデルの形状や壁体の高さ方向における検討を行い、検討する条件を決定した。気象条件としての日本の代表地点の選出を行った。

④ 解析モデルによる解析実行

変動するパラメータは木材及び断熱材の厚さ、断熱材の位置、壁体の地点、壁体の方位とし、条件数、計 4800 条件の解析を実行した。

⑤ 解析結果の分析

結果の分析には多目的最適化を用いてパレート解を算出した。目的関数としては、タイムラグ・デクリメントファクター・木材厚さにおいてそれぞれ最大化・最小化・最小化となる条件を検討した。



３．研究の成果

以下は、本研究の成果である。研究の方法、結果考察を以下に示す。

1. シミュレーションモデル

本節では、本研究で用いたシミュレーションモデルについて理論整理を行った。本モデルは、角舎のモデル[37]に基づき、二次元非定常計算プログラムによって計算を行った。本節次項では、プログラムの変更を行ったサブルーチンに関しての理論整理を行う。本モデルの作成にあたり、Python 言語によってモデルを作成し、デコレーター@jit を用いてプログラムのコンパイルを行い、高速化を行った。計算フローを図 1 に示す。

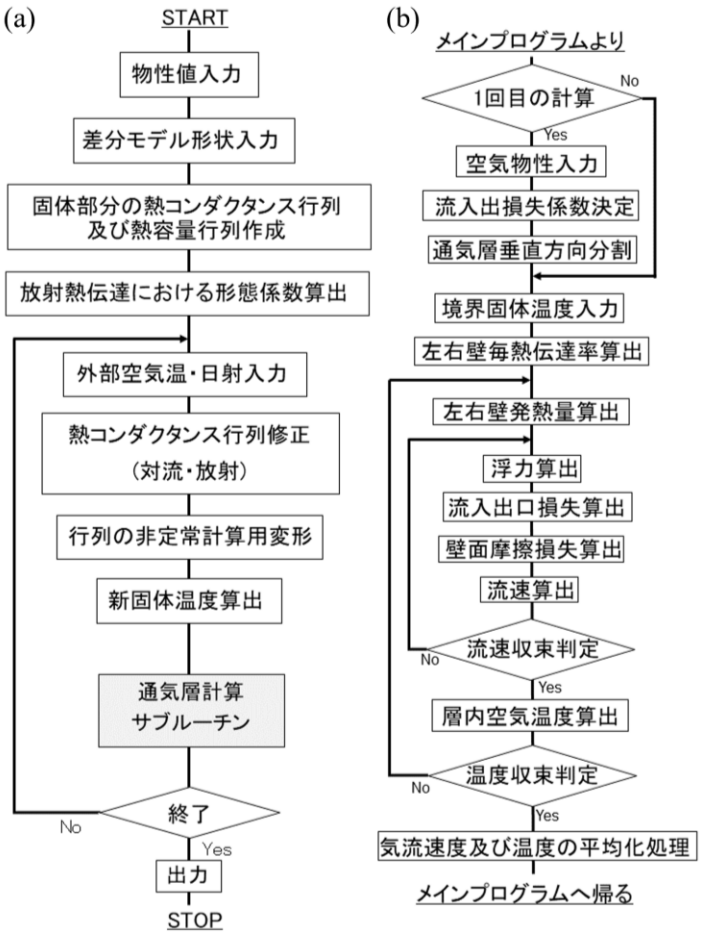


図 1 プログラムの計算フロー

(a)メインプログラム(壁固体温度計算)　(b)サブルーチン(通気部計算)

2. モデルの比較検討

本研究では、本解析モデルの検討として ShadeWall[43]と同条件で比較を行った。比較における条件を表 1 及び表 2 に示す。気象条件は標準年 EA 気象データ 2020 年度における東京のデータを用いた。比較時は、助走期間である 1 ヶ月分のデータを除き、1 年間のデータ用いた。また、室内温度は 24℃一定とした。

表 1 本モデルと ShadeWall の比較時の物性値

materials	thickness (m)	thermal conductivity (W/m・K)	specific heat capacity (J/kg・K)
ceramic siding	0.016	0.17	1659
Ventilated layer	0.02	-	-
Plywood	0.012	0.19	720
Insulation	0.085	0.028	47
plasterboard	0.012	0.213	854

表 2 本モデルと ShadeWall の比較時の計算条件

wall size (m)			emiss-ivity (-)	Heat transfer coe-fficient (W/m^2・K)	input environment data	
Model width	0.910	Outer surface	0.9	23.0	time step (s)	3600
Hight	3.000	Outer air-layer surface	0.9	calculated.	input hours (hours)	9505
Horizontal grid width	0.005	Inner air-layer surface	0.9	calculated.		
Vertical grid width	0.500	Inner surface	0.9	9.0		

2. 1. 通気層空気温度による比較

本モデルと ShadeWall において通気層内の空気温度の平均値をタイムステップごとに算出した。各モデルの温度をまとめたものを図 2-2 (a)に示す。

本モデルと ShadeWall では、平均値の値はほとんど一致している。しかし、ShadeWall では、温度が低い側に本モデルと比較して分布している。これは、本モデルでは、壁への温度の入力を相当外気温度(SAT)としているため、このような差が生じたと考えられる。

2. 2. 表面温度による比較

本モデルと ShadeWall において内外表面温度の平均値をタイムステップごとに算出した。各モデルの内外表面温度をまとめたものを図 2 (b), (c)に示す。

2.1 と同様に、本モデルと ShadeWall では、平均値の値はほとんど一致しているが、ShadeWall では、温度が低い側に本モデルと比較して分布した。こちらも同様に、本モデルでは、壁への温度の入力を相当外気温度(SAT)としているため、このような差が生じたと考えられる。

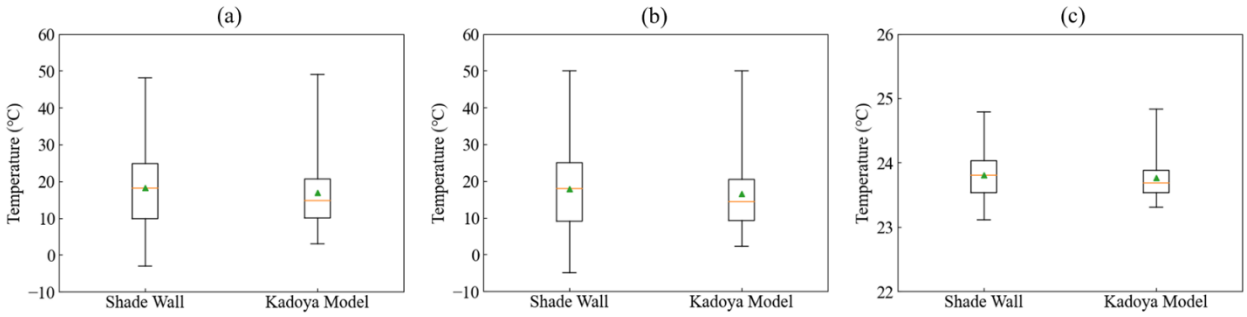


図 2 各モデルにおける比較 (a)通気層内平均空気温度 (b)外側表面温度 (c)内側表面温度

3. 計算条件の決定

シミュレーションにおける条件の決定において本節では検討を行った。本研究では、壁体に熱容量の大きい材料を用い、評価を行うため、タイムラグ(TL)及びデクリメントファクター(DF)を指標に用いた[26]。熱が外面から内面に伝搬するまでの時間を「タイムラグ」、その間の振幅の減少比を「デクリメントファクター」と呼ぶ。本研究では、タイムラグとデクリメントファクターは以下のように計算される。

$$\phi = \begin{cases} t_{T_i^{max}} > t_{T_o^{max}} \ \rightarrow \ t_{T_i^{max}} - t_{T_o^{max}} \\ t_{T_i^{max}} < t_{T_o^{max}} \ \rightarrow \ t_{T_i^{max}} - t_{T_o^{max}} + P \\ t_{T_i^{max}} = t_{T_o^{max}} \ \rightarrow 0 \end{cases} \tag{1}$$

ϕ ：タイムラグ [$hour$]

t ：時間 [$hour$]

P ：周期 [$hour$]

T_i^{max} ：内側表面温度の最大値

T_o^{max} ：外側表面温度の最大値

$$f = \frac{A_i}{A_o} = \frac{T_i^{max} - T_i^{min}}{T_o^{max} - T_o^{min}} \tag{2}$$

f ：デクリメントファクター

A_i ：周期 P における内側表面温度の振幅

A_o ：周期 P における外側表面温度の振幅

T_i^{max} ：内側表面温度の最大値

T_i^{min} ：内側表面温度の最小値

T_o^{max} ：外側表面温度の最大値

T_o^{min} ：外側表面温度の最小値

TL・DF における模式図を図 3 に示す。(1)式及び(2)式より TL・DF を求め、壁体の評価を行う。本節においても TL・DF を用いて計算条件の検討を行った。

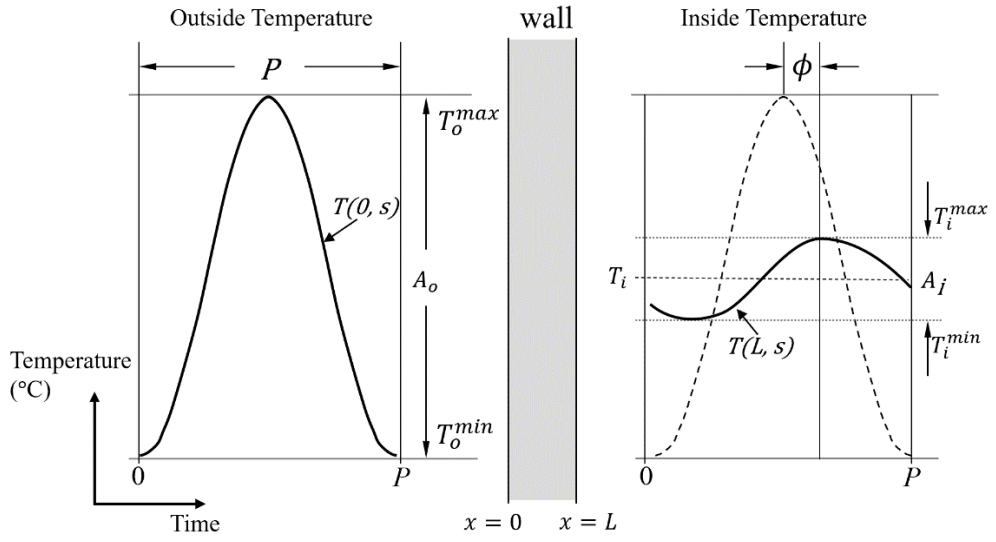


図 3 タイムラグ・デクリメントファクターの模式図

3.1. 高さ方向の決定

壁体の高さ方向の検討として、3m, 6m, 9m におけるTL・DFを算出し、高さ方向を検討した。計算条件は高さ方向を除き2. と同様の条件とした。高さによる比較を図4 (a)に示す。ここでは、TL 及び DF は年間の積算値としている。

TL は高さ増加に伴い、減少した。これは、高さの増加により、日射を受ける面積が増加し、貫流熱量が増加することで熱容量による熱移動の遅延が起こりにくくなっている可能性が考えられる。また、DF は高さの増加に伴い、増加した。こちらも、高さの増加による日射を受ける面積の増加よって、熱貫流量の増加したためであると考えられる。

TL は最大、DF は最小であるものが、TL・DF において最も良い評価であり、高さの増加は日射を受ける面積の増加につながるため、本研究では、壁体の高さを 3m として、検討を行っていくものとする。

3.2. 通気層幅の決定

壁体の通気層幅の検討として、0.0m, 0.01m, 0.02m, 0.03m, 0.04m, 0.05mにおけるTL・DFを算出し、通気層幅を検討した。計算条件は高さ方向を除き3.2と同様の条件とした。通気層幅による比較を図4 (b)に示す。ここでは、TL 及び DF は年間の積算値としている。

TL は通気層幅の増加に伴い増加した。これは、通気層による排熱効果が通気層幅の増加に伴い大きくなったため、熱移動の遅延が起こっていると考えられる。また、DF は通気層幅の増加に伴い減少した。こちらも、通気層による排熱効果が通気層幅の増加に伴い大きくなり、貫流熱量が減少したことによって変動したと考えられる。

TL は最大、DF は最小であるものが、TL・DF において最も良い評価であるが、通気層幅の増加に伴って TL は最大化、DF は最小化している。それぞれが相反に変動しているため、本研究では、通気縦胴縁を想定し、通気層幅は 0.02m とした。

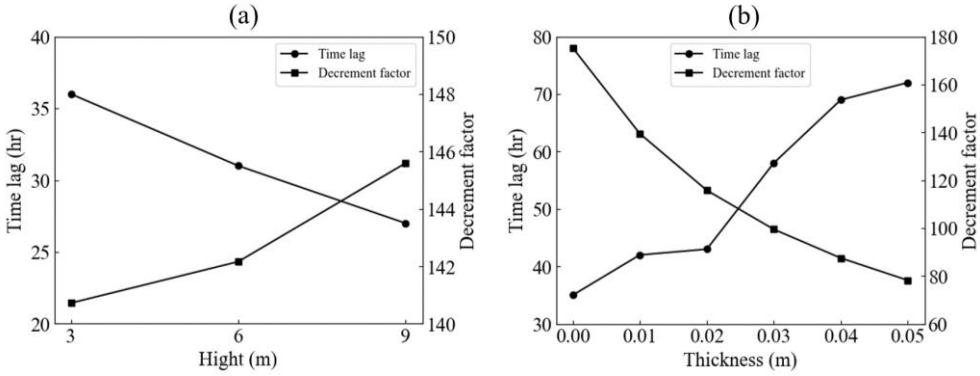


図 3-4 (a) 高さによるタイムラグ・デクリメントファクター (b) 通気層幅によるタイムラグ・デクリメントファクター

4. 壁体の条件

4.1. 壁体の構成

壁体の構成は国土交通省による木造工事標準仕様書[44]を参考に熱容量の大きい材料である木材を付加する構成とした。木材と断熱材の位置は図 5(a)及び(b)の二通りとした。壁体構成の材料及び物性値は表 3 に示す。また、壁体の計算条件を表 4 に示す。

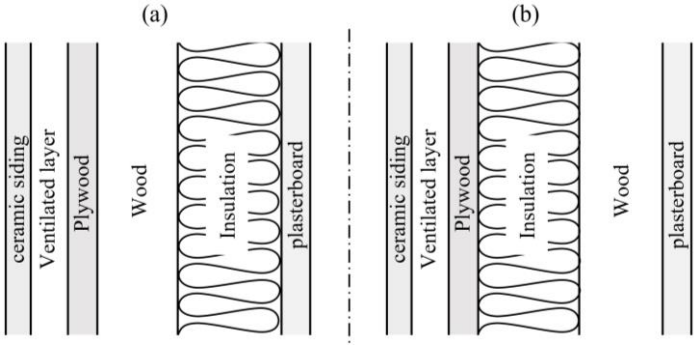


図 3-5 壁体の構成の模式図 (a)内側断熱 (b)外側断熱

表 3-3 壁体の物性値

materials	thickness (m)	thermal conductivity (W/m・K)	specific heat capacity (J/kg・K)
ceramic siding	0.016	0.17	1659
Ventilated layer	0.02	-	-
Plywood	0.012	0.19	720
Wood (thermal mass)	0.0 ~ 0.5	0.19	780
Insulation	Depends on thickness of wood	0.028	47
plasterboard	0.012	0.213	854

表 3-4 壁体の計算条件

wall size (m)		emiss-ivity (-)		Heat transfer coefficient (W/m^2・K)	input environment data		time	
Model width	0.910	Outer surface	0.9	23.0	time step (s)	3600	input data step (s)	3600
Hight	3.000	Outer air-layer surface	0.9	calculated.	input hours (hours)	9505	calculation time step (s)	36
Horizontal grid width	0.005	Inner air-layer surface	0.9	calculated.	Input data items	outside temperature・insidetemperature・air-layer temperature・SAT・global solar		
Vertical grid width	0.500	Inner surface	0.9	9.0				

壁体の材料厚さは、国土交通省による木造工事標準仕様書[44]を参考に決定した。木材及び断熱材の厚さは、熱貫流率を一定のもとで、木材厚さを 0.005m ずつ増加させ、断熱材厚さを木材厚さに合わせ、熱貫流率が一定となるように変動させるものとした。木材の厚さは、0 m から 0.5 m まで増加させた。壁体の厚さについて表 5 に示す。

一定とした熱貫流率は HEAT20[45]を参考に各地域区分における最小の値を用いて検討を行った。表 5 に各地域区分における一定とする熱貫流率、熱貫流率における木材及び断熱材の範囲を示す。

4.2. 気象条件

気象条件として、本研究では、日本における代表都市を6地点選出し、各地点においてシミュレーションを行った。選出した都市は HEAT20[45]の地域区分を参考に決定した。選定した地域を表 3-5 に示す。

本モデルへの入力条件としての気象条件は外気温度、全天日射、SAT の 3 項目とし、SAT は宇田川による直散分離より算出した。外気温度及び全天日射、SAT の算出に必要な気象条件は標準年 EA 気象データ 2020 年度のデータを用いた。また、室内温度は 24℃一定とし、通気層流入温度は外気温度を用いた。

表 5 地点及び地点における一定とした熱貫流率

area classification	location	U-value (W/m^2·K)	Wood range (m)		Insulation range (m)	
			Min. value	Max. value	Min. value	Max. value
1&2	Sapporo	0.20	0.000	0.500	0.0000	0.1181
3	Morioka	0.20	0.000	0.500	0.0000	0.1181
4	Matsumoto	0.23	0.000	0.500	0.0000	0.0994
5	Utsunomiya	0.23	0.000	0.500	0.0000	0.0994
6	Tokyo	0.26	0.000	0.500	0.0000	0.0858
7	Kagoshima	0.26	0.000	0.500	0.0000	0.0858

5. 最適化

本研究では、多条件の壁体の検討方法として多目的最適化を用いた。多目的最適化は、目的関数と呼ばれる最大化あるいは最小化したい関数が、最大あるいは最小となる解を 2 以上の目的関数から求めることである。実行可能解の中からトレードオフの関係になる解が多目的最適化における最適解となる。そのため、多目的最適化では、解が 1 つに定まるわけではなく、どの解にも優劣されない解が複数解存在する。このどの解にも優劣されない解の集合はパレート解と呼ばれる。本研究では、壁体に対して多目的最適化を行い、パレート解を算出し、パレート解となる解の傾向から壁体の検討を行う。

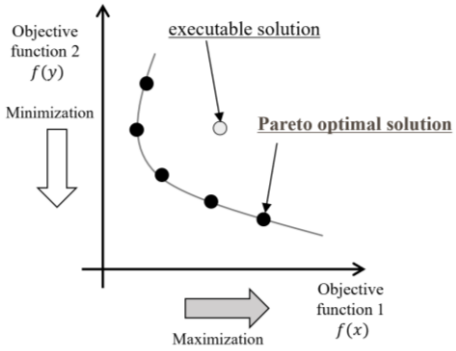


図 6 多目的最適化の模式図

5.1. 設計変数

多目的最適化において、目的関数の変動を決定する値として設計変数を変動させ、目的関数を変動させる。本研究で行った設計変数の設定を表 6 に示す。

表 6 設計変数

name	range		unit	Number of conditions
	Min. value	Max. value		
Wood thickness	0	0.5	m	100
Insulation thickness	0	0.1181	m	
	Variables			
Insulation position	internal, external		-	2
Wall's direction	N, E, W, S		-	4
Area classification	1&2, 3, 4, ,5, 6, 7		-	6

5.2. 目的関数

本研究では、目的関数を 3 つ設定し、3 つの目的関数による多目的最適化を行う。本研究で用いた、目的関数を表 7 に示す。

表 7 におけるタイムラグは、本モデルより壁体の各部温度を算出し、(1)式を用いて算出した。表 7 におけるデクリメントファクターは、タイムラグと同様に、本モデルより壁体の各部温度を算出し、(2)式を用いて算出した。木材厚さは、設計変数で用いた値を用いて目的関数とした。

表 7 目的関数

name	unit	optimization
Time lag	m	Maximization
Decrement factor	N.D.	Minimization
Wood thickness	m	Minimization

6. 研究結果及び考察

TL 及び DF、木材厚さを目的関数とした多目的最適化の結果について示す。

6.1. 各地域区分における多目的最適化

各地域区分における年間積算 TL、年間積算 DF、木材厚さにおける多目的最適化を行った。各地点におけるパレート解及び実行可能解を TL・DF を XY 軸、木材厚さを Z 軸とした 3 次元平面へプロットした。多目的最適化の結果を地域区分ごとに図 6-1 に示す。

TL は、地域区分が温暖の地域となるに伴い、小さい値への分布の偏りが小さくなり同程度に分布した。これは、地域区分が温暖の地域では寒冷の地域と比べ、貫流する熱における外気の影響が大きくなることで、熱移動の時間遅れが生じやすくなったためと考えられる。

DF は、地域区分が温暖の地域となるに伴い、DF の値は大きい値の範囲に分布した。これは、地域区分が温暖の地域では寒冷の地域と比べ、外気の影響が大きくなり、貫流熱量が大きくなる。そのため、室内側での温度変動が大きくなっているためと考えられる。

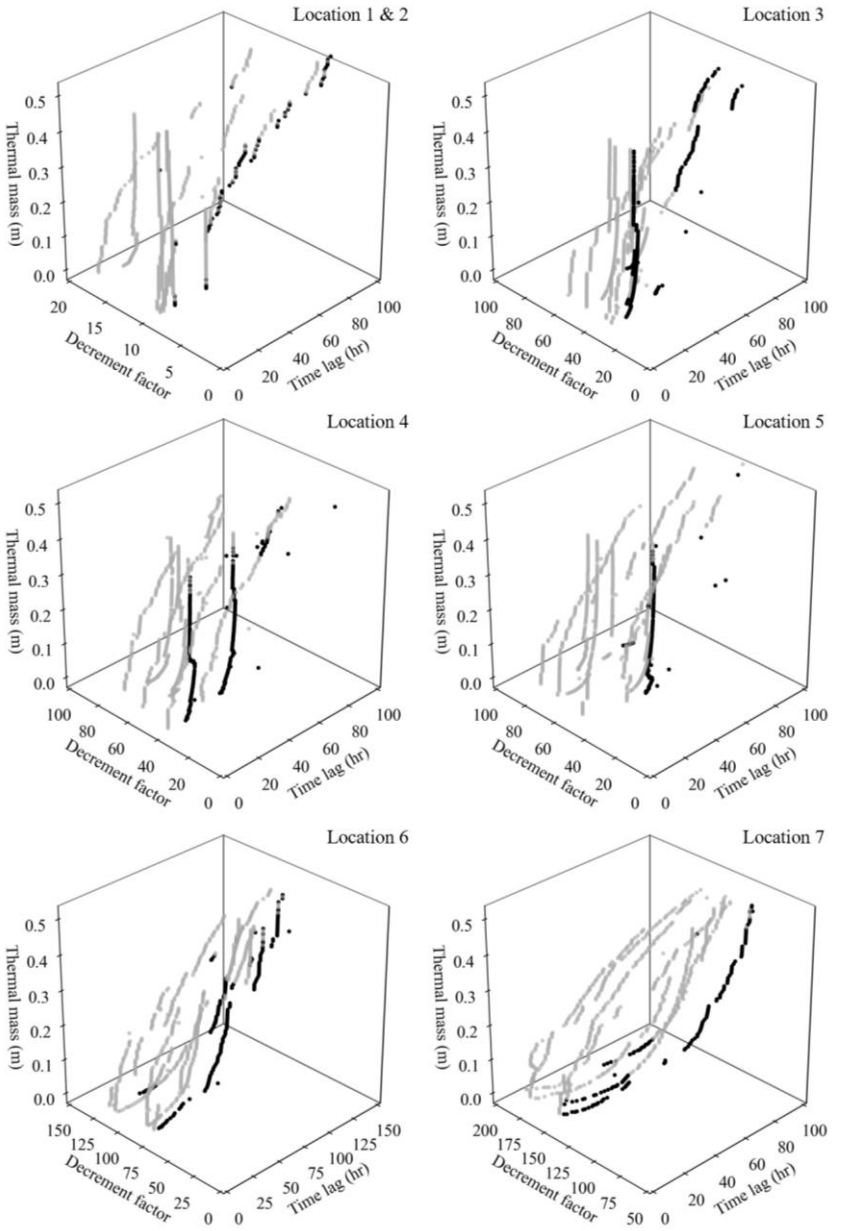


図 6-1 各地域区分における多目的最適化 *●はパレート解、●は実行可能解を示す。

6.2. 断熱材の位置による検討

本節では、6.1 節において示した多目的最適化について、断熱材位置の観点から詳細な分析を行う。図 6-1 における最適化の結果を、断熱材の位置ごとに分類し、検討を行う。本研究で検討した断熱材の位置は、木材よりも外側に配置する場合と内側に配置する場合の二通りである(図 5)。外側断熱と内側断熱で図 1 の結果を個々にプロットしたものを図 6-2 及び図 6-3 に示す。

外側断熱は、地域区分が温暖の地域となるに伴い、パレート解の分布数が増加した。これは、地域区分が寒冷の地域の場合は、貫流する熱における外気の影響が小さいため、TL が小さく変動が少なく、DF に対して TL が十分大きくなかったためであると考えられる。

内側断熱は、地域区分が温暖の地域となるに伴い、パレート解の分布数が減少した。これは、地域区分が温暖の地域となるに伴い、貫流熱量が大きくなることで、断熱材よりも先に木材(熱容量)によって起こる温度減衰が、外側断熱が先に断熱材で温度減衰を行うものよりも室内側への影響が大きいためであると考えられる。

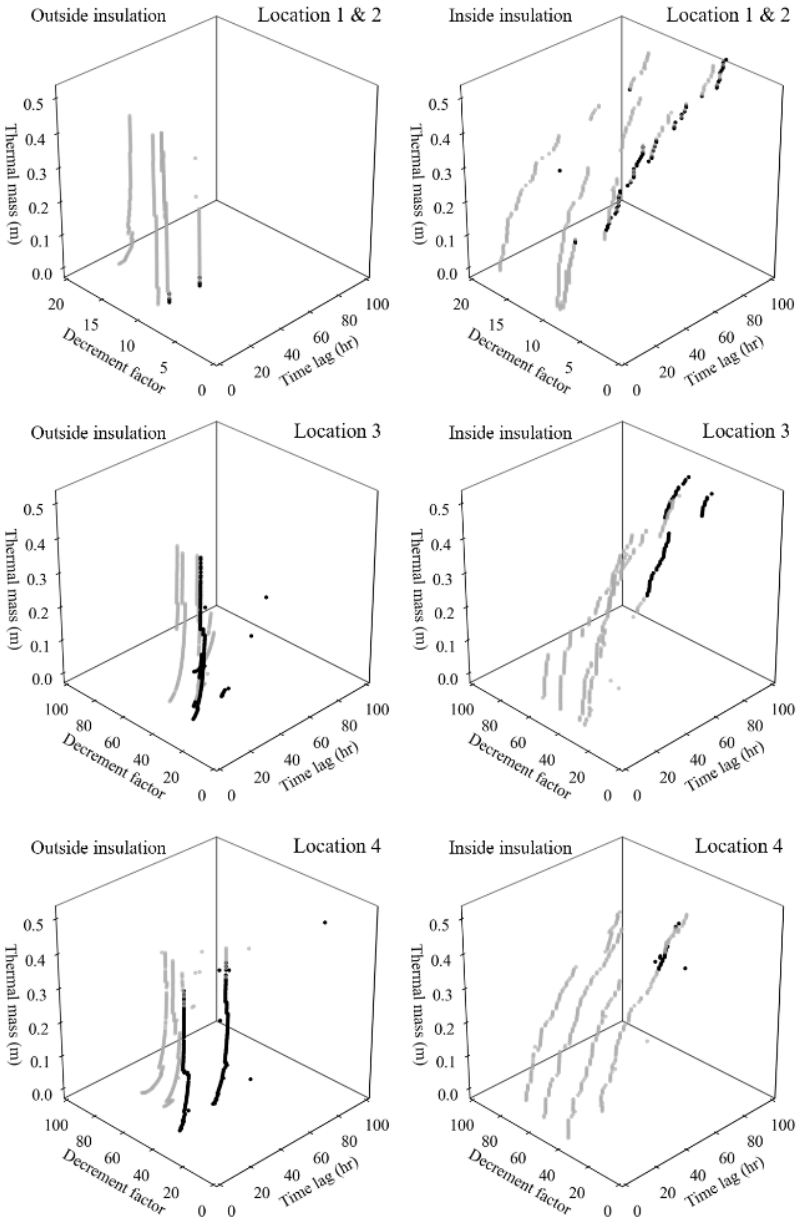


図 6-2 断熱材位置ごとの各地域区分(1&2 地域, 3 地域, 4 地域)における多目的最適化

*●はパレート解、●は実行可能解を示す。

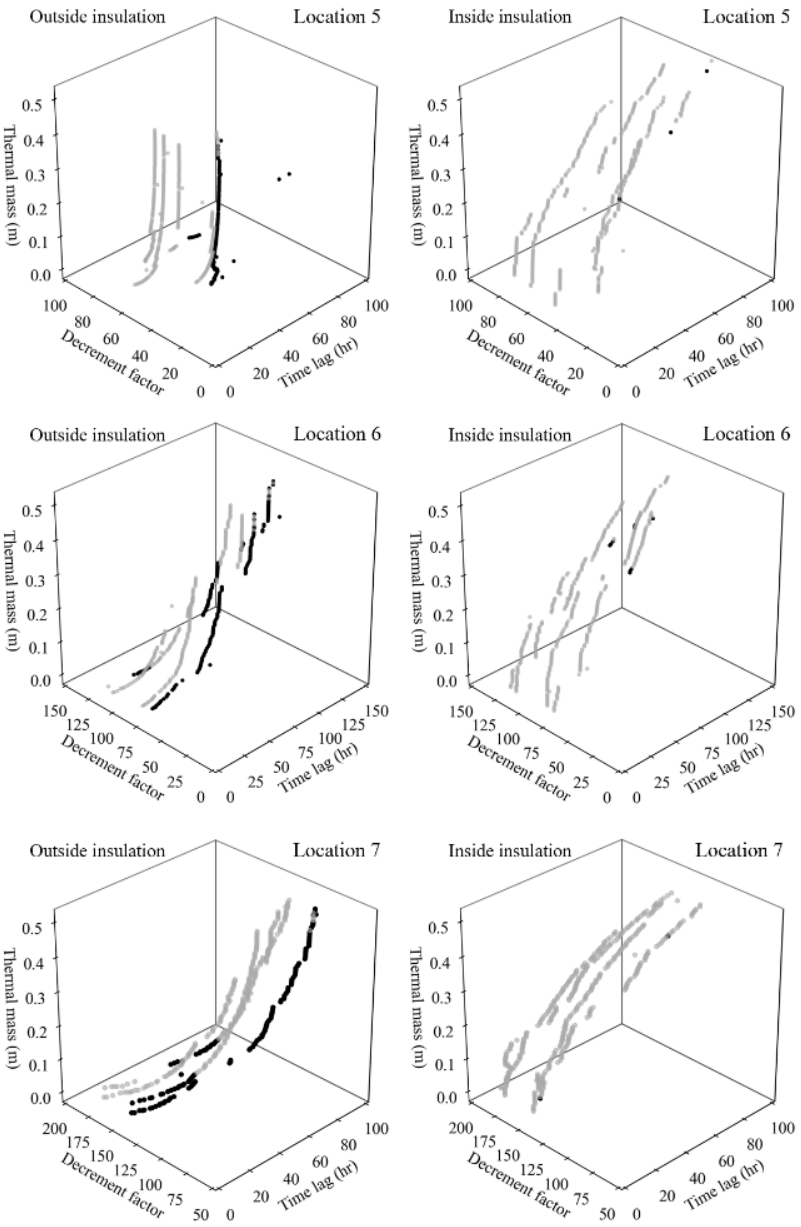


図 6-3 断熱材位置ごとの各地域区分(5 地域, 6 地域, 7 地域)における多目的最適化

*●はパレート解、●は実行可能解を示す。

6.3. 木材厚さによる検討

本節では、6.1 節において示した多目的最適化について、木材厚さの観点から詳細な分析を行う。図 6-1 における最適化の結果を、木材厚さを X 軸とした XY 平面グラフによって、検討を行う。各地域区分における図 6-1 の Thermal mass-TL 平面に投影したパレート解及び実行可能解を図 6-4 に示す。また、各地域区分における図 6-1 の Thermal mass-DF 平面に投影したパレート解及び実行可能解を図 6-5 に示す。

TL は全体として、木材厚さの増加に伴い増加するが、TL と木材厚さが他に優劣されない場合であってもパレート解にならない場合が存在する。これは、DF が十分小さい値を取らないためであり、地域によってはパレート解が TL に対する寄与度が小さい可能性が考えられる。

DF は、全体として、木材厚さの増加に伴い減少した。パレート解は、全体を通して DF が地域区分の各木材厚さにおいて最も小さい値で分布した。そのため、DF の減少はパレート解となるために大きく寄与している可能性が考えられる。

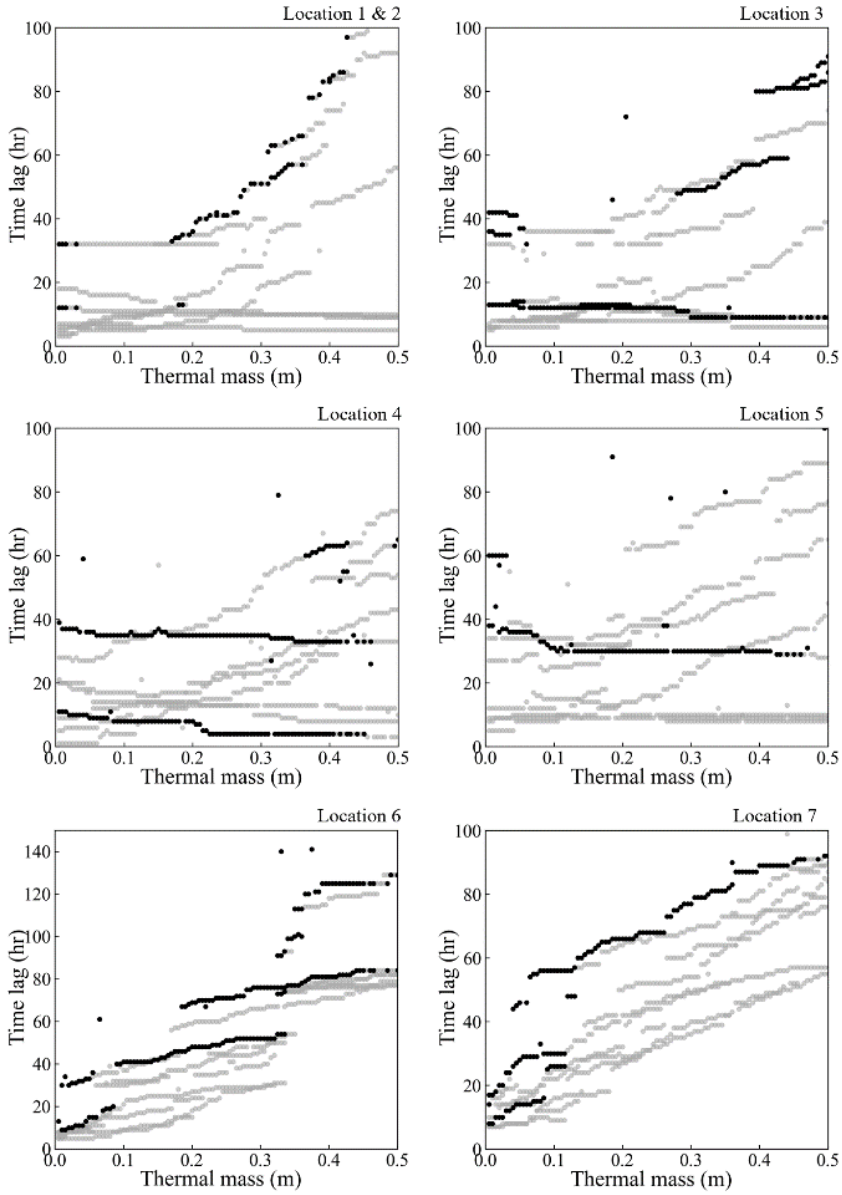


図 6-4 目的最適化における Thermal mass-TL 平面に投影したパレート解及び実行可能解

*●はパレート解、●は実行可能解を示す。

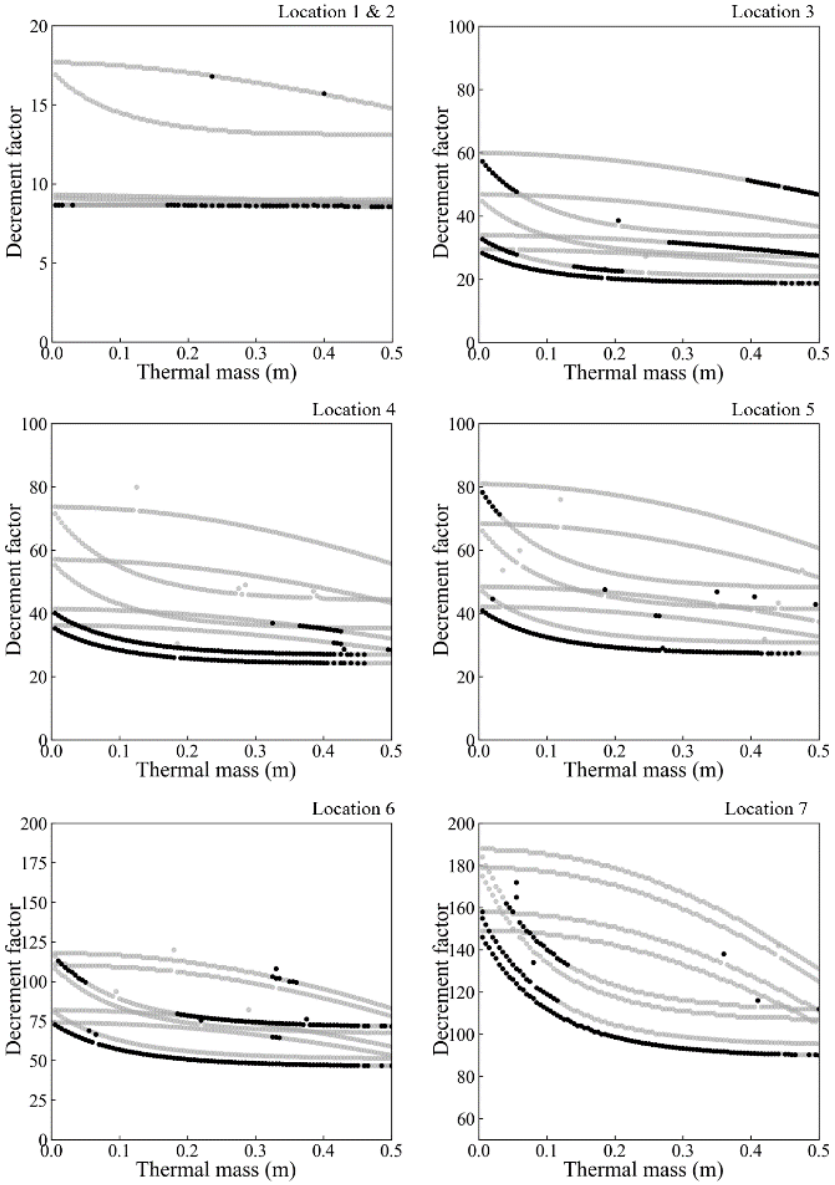


図 6-5 目的最適化における Thermal mass-DF 平面に投影したパレート解及び実行可能解

*●はパレート解、●は実行可能解を示す。

6.4. 方位による検討

本節では、6.1 節において示した多目的最適化について、壁体の方位の観点から詳細な分析を行う。図 6-1 における最適化の結果を、壁体の方位ごとに分類し、検討を行う。本研究で検討した壁体の方位は、北側壁面、西側壁面、東側壁面、南側壁面の四通りである。図 6-6, 図 6-7, 図 6-8, 図 6-9, 図 6-10, 図 6-11 は、図 6-1 の結果を方位ごとにプロットしたものを示す。

パレート解は、図 3-6~図 3-11 を通して北側壁面に分布した。これは、北側壁面では年間を通して壁面への日射の影響が小さく、DF が他の方位と比較して小さい値であったためであると考えられる。また、1&2 地域、3 地域、4 地域において、北側壁面及び西側壁面に入射する全日射量の差が小さく、DF が小さい値を示したため、パレート解が分布していたと考えられる。また 5 地域、6 地域、7 地域においては、主に北側壁面及び南側壁面においてパレート解が分布した。北側壁面では、年間を通して壁面への日射の影響が小さいため DF が小さい値を示しパレート解が分布し、南側壁面では、年間を通して壁面への日射の影響が大きいため、熱移動の遅延が生じやすく TL が大きい値を示しパレート解が分布した。

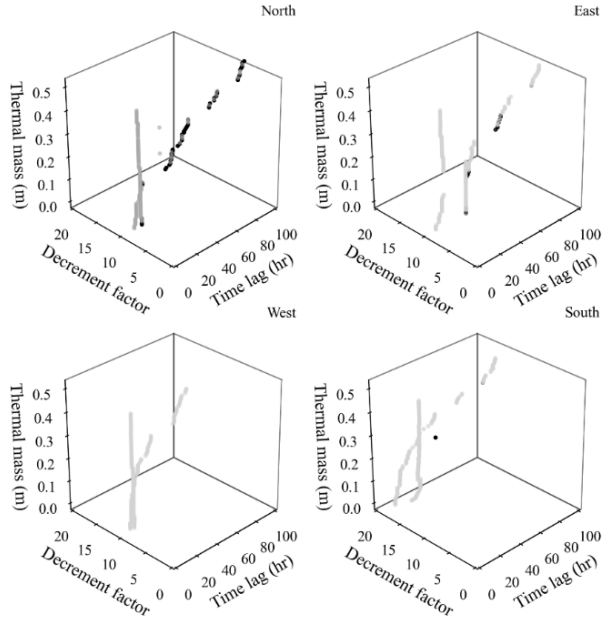


図 6-6 方位ごとの 1&2 地域における多目的最適化

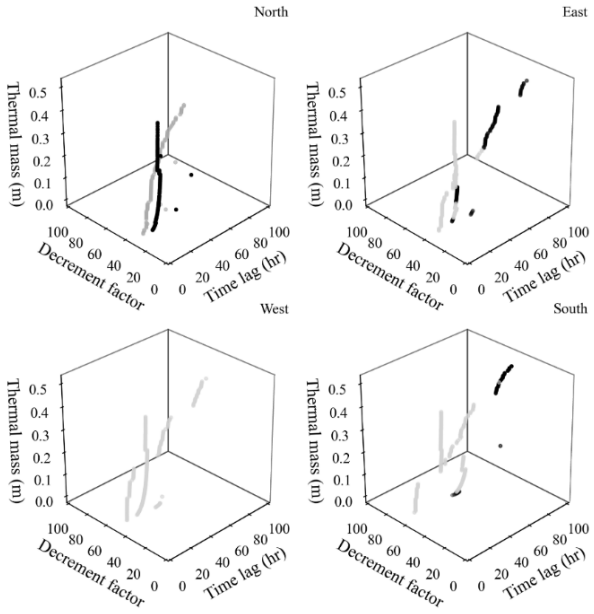


図 6-7 方位ごとの 3 地域における多目的最適化

*●はパレート解、●は実行可能解を示す。

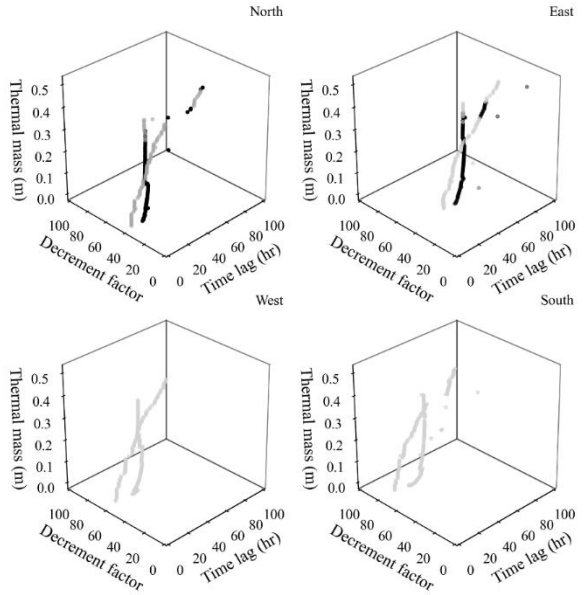


図 6-8 方位ごとの 4 地域における多目的最適化

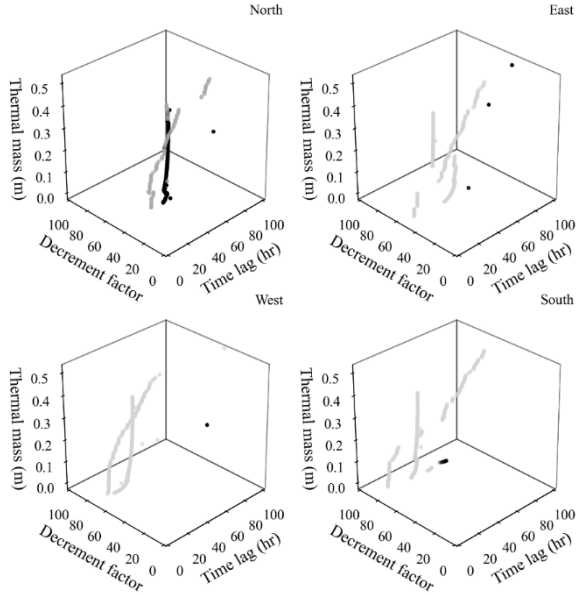


図 6-9 方位ごとの 5 地域における多目的最適化

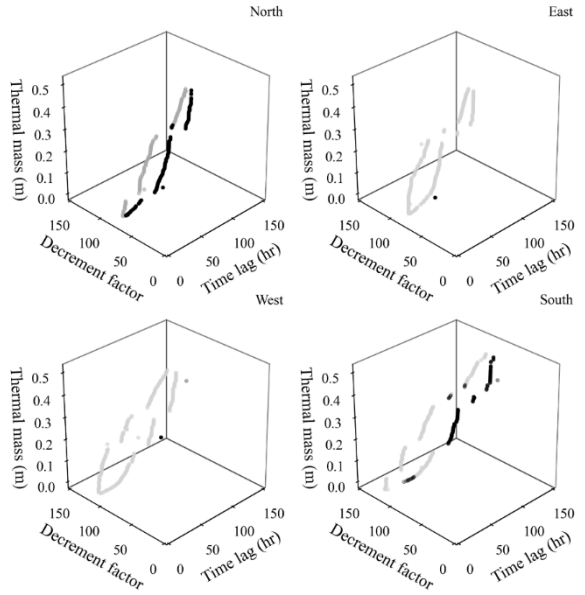


図 6-10 方位ごとの 6 地域における多目的最適化

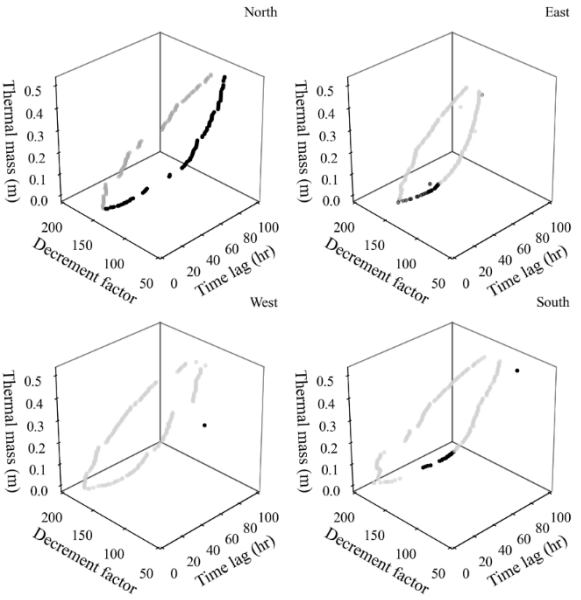


図 6-11 方位ごとの 7 地域における多目的最適化

*●はパレート解、●は実行可能解を示す。

7. 結果と文献値との比較

表 8 は TL・DF を用いて壁体の評価を行った研究における文献値である[24], [46]–[50]。各文献における外気側温度と室内側温度の最大値及び最小値、TL・DF の最大値及び最小値を本研究の値と比較する。

本研究における TL は、Balaji ら[46]による 2.51–12.28 よりも小さく、TL の最小値は Asan と Sancaktar[24]よりも小さい値であった。これは、本研究では小数点以下のタイムラグを考慮していないため、このような最小値であったと考えられる。また、本研究と外気温の最大値と室内温度が同程度である Balaji ら[46]の TL に近い値であったと考えられる。また外気温の下限値が Balaji らよりも小さかったため、TL の下限値も小さかったと考えられる。

本研究における DF は、他の研究の文献値よりも最小値は小さく、最大値は大きい結果であった。これは、本研究の検討の期間に冬期を含むこと、北面における壁面を検討したこと、日本における異なる気象条件を用いたことで、外気温の変動幅が大きく、DF の変動幅も大きくなったことに起因すると考えられる。

表 8 文献値との比較

Authors	Balaji et al. [52]	Faithipour and Hadidi [53]	Sun et al. [54]	Asan and Sancaktar [24]	Ozel and Ozel [55]	Quagraine et al. [56]	Present study
Outside temperature (°C)	13–36.6	29–43	12.5–20.0	0.0–1.0	Average of [57] on July 21	Kumasi in March and August	-12.7–36.3
Inside temperature (°C)	25	25	16	0.5	23	25	24
Time lag (hr)	2.51–12.28	0.40–7.00	8.32–10.34	0.03–1.23	4.98–15.20	2.00–4.00	0.00–12.00
Decrement factor	0.009–0.488	0.0712–0.232	0.021–0.064	0.140–0.730	0.0028–0.1840	0.199–0.327	0.0002–0.8781

8. 結論

通気層を含む断熱材及び熱容量の大きい材料による複層壁体に対して、タイムラグ・デクリメントファクターを目的関数とした多目的最適化を行った。本研究では、以下の知見が得られた。

1) TL は、地域区分が寒冷の地域であるほど小さい値に偏在し、DF は、地域区分が寒冷の地域であるほど小さい値の範囲に分布した。そのため、TL・DF において最適である壁体の条件が気象条件によって異なる。

2) 地域区分が寒冷の地域であるほど内側断熱条件では TL・DF において最適である壁体の条件となり、地域区分が温暖の地域であるほど外側断熱条件では TL・DF において最適である壁体の条件となる。

3) どの地域においても北側壁面において TL・DF において最適な壁体の条件が存在し、地域区分が温暖の地域であるほど南側壁面において TL・DF において最適な壁体の条件が存在した。

---

[43]裕赤坂, 和大武田, “通気層を有する外壁,屋根の遮熱・断熱効果の計算法,” 日本建築学会環境系論文集, vol. 70, no. 595, pp. 33–40, 2005, doi: 10.3130/aije.70.33_2.
[44]“官庁営繕：公共建築木造工事標準仕様書　令和4年版 - 国土交通省.” https://www.mlit.go.jp/gobuild/moku_hyoushi.html (accessed Dec. 07, 2022).
[45]“HEAT20　外皮性能グレード／2020 年を見据えた住宅の高断熱化技術開発委員会公式サイト.”

http://www.heat20.jp/grade/ (accessed Dec. 23, 2022).
[46]N. Balaji, M. Mani, and B. Reddy, “Thermal Performance of the Building Walls,” Jan. 2013.
[47]R. Fathipour and A. Hadidi, “Analytical solution for the study of time lag and decrement factor for building walls in climate of Iran,” Energy, vol. 134, pp. 167–180, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.06.009.
[48]C. Sun, S. Shu, G. Ding, X. Zhang, and X. Hu, “Investigation of time lags and decrement factors for different building outside temperatures,” Energy Build., vol. 61, pp. 1–7, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.02.003.
[49]M. Ozel and C. Ozel, Effects of wall orientation and thermal insulation on time lag and decrement factor. International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 2012. Accessed: Jan. 26, 2023. [Online]. Available: https://repository.up.ac.za/handle/2263/43033
[50]K. A. Quagraine, E. W. Ramde, Y. A. K. Fiagbe, and D. A. Quansah, “Evaluation of time lag and decrement factor of walls in a hot humid tropical climate,” Therm. Sci. Eng. Prog., vol. 20, p. 100758, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2020.100758.
[51] Records for weather data, State Meteorological Station, Turkey, 2005-2010.

４．今後の課題

本研究では、タイムラグ及びデクリメントファクターを目的関数として多目的最適化を行ったが、条件範囲を全て計算したのち計算結果からパレート解を求める方法を用いた。そのため、探索範囲が限定的であった。今後の展望として、NSGA-II といった最適化アルゴリズムを用いた広範囲条件における最適値の探索が必要であると考えられる。また、本研究で目的関数とした指標以外において、多目的最適化による検討が必要である。