

寒冷地域のCLT建物の室内環境とヒートブリッジの解析

Indoor environment and heat bridge analysis of CLT building in cold region

学生会員 袁 迅 (北海道大学) 正会員 森 太郎 (北海道大学)
正会員 羽山 広文 (北海道大学)

Jin EN*¹ Taro MORI*¹ Hirofumi HAYAMA*¹

*¹ Hokkaido University

CLT (Cross Laminated Timber) is a panel material that is laminated and bonded so that the fiber direction of lamina is orthogonal for each layer. It is used in many large buildings mainly in Europe, and has recently been used for Japanese architecture. CLT is a woody material and can be expected to have better heat insulation performance than other materials like RC, but on the other hand, it is joined by metal, so that heat bridge may occur. In cold regions, heat insulation must be used, so the heat insulation performance is inferior to heat insulation, so the CLT itself may be a heat bridge. In this study, we discuss the indoor environment of CLT single storey building constructed by Hokkaido Forestry Research Institute and examination and simulation results.

1. 研究の背景と目的

CLT (Cross Laminated Timber) とは、ラミナの繊維方向が層ごとに直交するように積層して接着したパネル材である。1995年頃からオーストリアに利用を初め、近年、カーボンニュートラルを目的として、欧州を中心に多くの大型建物で利用されている。日本においては、単にカーボンニュートラルだけでなく、林業の活性化を目的として、導入が進められている。

CLTの利点としては、①パネルを工事現場で組み立てる工法であるため工期を短縮できる。②規格材を採取した後の残材を有効活用できるがある。③CLTはRCに比べると軽く、④木質材料であるため、建設、廃棄時の二酸化炭素排出量は他の材料に比べて著しく低く、また、RCと比べると断熱性能が高い等である。一方、CLTは木質材料であり、RC等に比べて断熱性能が期待できるが、一方で、金属によって接合されるため、熱橋が発生する場合がある。また、断熱材と比較すると断熱性能に劣るため、寒冷地の場合は断熱材を使用しなければならず、場所によってはCLT自体が熱橋となる場合もある。



Fig. 1 Outlook of CLT Building

本研究では、旭川市の北海道立林産試験場に建設されたCLT建物を対象に、実測でCLT建物の

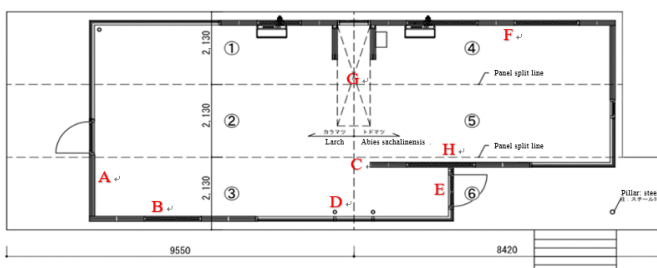


Fig. 2 Plan of CLT Building

冬期エネルギー消費量を測定し、CLT壁の熱貫流率を推定し、また、サーモカメラで熱画像を撮影し、CLT構造に熱橋が生じやすい箇所及びその温度の低下する程度について評価した。また、FEMを用いたシミュレーションを行い、各部の温度低下に伴う結露の可能性について評価した。

2. 建物の概要

Fig.1に建物の外観写真を示す。また、Fig.2に建物の平面図を示す。建物の延べ床面積は約83m²で、見学施設として使用されており、普段、人は常駐していない。CLTは150mmの5プライのものを使用しており、二種の樹種が使用されている。平面図の左側はカラマツ、右側はトドマツである。また、CLT同士の接合は主に引きボルトによって行われている。

3. 実測調査

室内に電気ヒーターを設置し、設定温度と建物の外側の断熱厚さ(0mm、50mm、100mmのEPS設置)をパラメータとして暖房用電力消費、室内温湿度、炭酸ガス濃度の計測を実施した。

3.1 CLTの熱貫流率の推定

Fig.3に電力消費と内外温度差の関係を示す。0mmの時の相関係数は低いものの、50mm、100mmの相関係数は比較的高い値が得られ、熱損失係数は無断熱0.95、0.63、0.58W/(m²K)となった。一般住宅と比較すると低い値であるが、CLTが断熱性能を持っているだけでなく、屋根と床にはCLTに加え200mmの断熱をしており、また、使用時以外は換気量(50m³/h、0.25ac/h)を低くして運用しているためそのような値となったと考えられる。また、この結果からCLTの熱貫流抵抗を計算したところ、約1.1m²K/Wとなり、壁の厚さを150mmとしたときの熱伝導率は0.13W/mKとなり欧州でCLTの物性値として用いられる値とおおよそ一致した。

3.2 サーモカメラによる室内の表面温度

サーモカメラを用いて対象建物の8カ所(Fig.2)の室内外の熱画像を撮影した。撮影日付、断熱状況及

び外気温度をTable.1に示す。Case1の熱画像をFig3-1~8に示す。Fig3-1はA点の壁である。一般的な場所 (b) に比べて、座金が設置されている場所 (a, c, d) の温度が2°C程度低下し、熱橋となっていることが分かる。Fig3-2はA点の床である。d点の温度は、e点よりも5°C低下していた。単に隅角部という

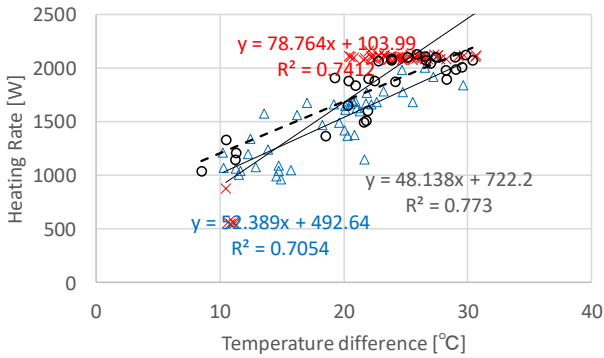


Fig.3 Relationship between Temp Difference and Heating Rate

Table. 1 Photographing Condition

Date	Insulation/mm	Outdoor temp/°C
Case1: 2019/11/6	Win 50, Wall 0	3.1
Case2: 2019/11/11	Win 50, Wall 50	7.2
Case3: 2019/11/25	Win 50, Wall 50	-2.1
Case4: 2019/12/20	Win 50, Wall 100	-5.9

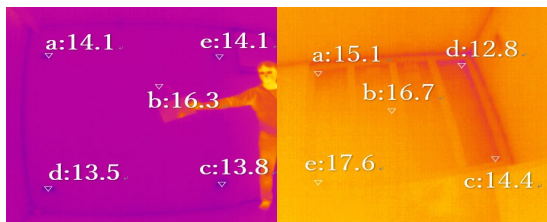


Fig.3-1 A

Fig.3-2 A(corner)

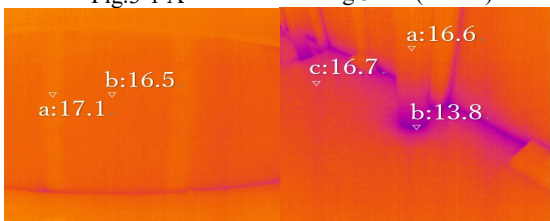


Fig.3-3 B

Fig.3-4 D

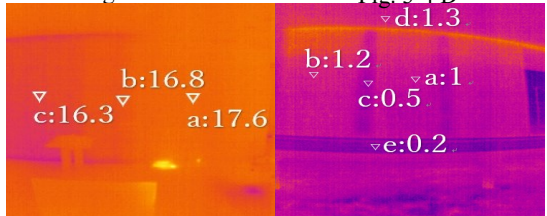


Fig.3-5 H

Fig.3-6 B(outside)

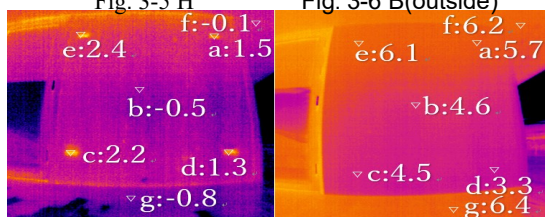


Fig.3-7 A(outside) Fig.3-8 A (outside, insulation50mm)

だけでなく、CLTの床下に鉄骨梁が設置されており、その影響で著しい温度低下が発生したと考えられる。Fig.3-7-8は、A点を外側から撮影した画像である。断熱材がない場合には座金が熱橋となり、約3°C温度上昇していたが、外断熱 (50mm) を行うと、金属部の温度上昇は解消された。但し、この条件でも室内側からは温度低下は確認でき、引きボルトを通じて外部の低温が伝わったと考えられる。また、Fig.3-8において、庇、床の張り出し部が断熱材の温度に比べ高くなっており、CLTが熱橋になっていたが、その温度差は2°C程度であり、RCと比べた場合の断熱性能の高さが証明された。

B (Fig.3-3) におけるb点は非構造壁の温度である。非構造壁は、断熱材を合板で挟んだ構造であり、CLTよりも断熱性能が良くなっているため、室内表面温度が0.6°C上昇していた。外側 (Fig.3-6) も、他の箇所と比べて0.5°C低くなっていた。D (Fig.3-4) における柱は鉄骨梁に繋がっているため、ヒートブリッジになっていた。H (Fig.3-5) における間仕切り壁の温度は外壁に比べて1.3°C程度高くなっていた。

4 FEMによる温度分布の解析

4.1 シミュレーションの目的

本研究では、外気温、室温、断熱性能が異なる条件で実測による検証を行ったが、さらに多様な条件下での検討を行うためにFEMによるシミュレーションを実施した。

4.2 ソフトウェアと解析手法の概要

FEMとは、解析的に解くことが難しい微分方程式の近似解を数値的に得る方法の一つであり、方程式が定義された領域を小領域 (要素) に分割し、各小領域における方程式を補間関数で近似する手法である。解析に用いたソフトウェアはComsolである。Comsolは1986年7月にスウェーデンのSvante LittmarckとFarhad Saiediによって始められたクロスプラットフォームのソフトであり、マルチフィジクスに適用が可能である。

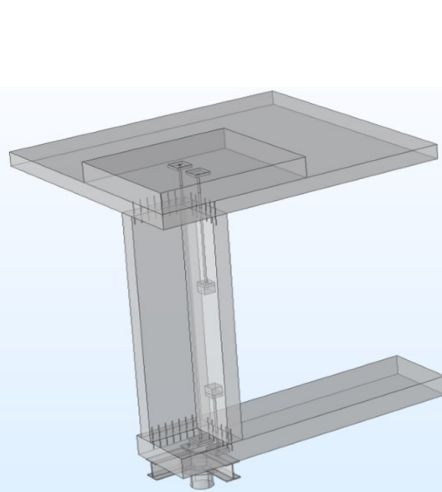


Fig.4 Corner model

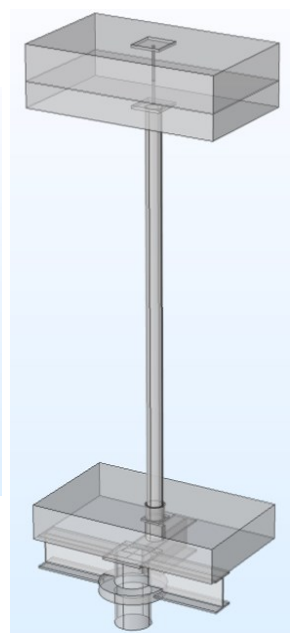


Fig.5 Pillar model

4.3 モデルと解析条件

Fig.2のA、B、また、Dを対象にシミュレーションを実施した。解析モデルをFig. 5-6に示す。壁、床と屋根はCLTパネルであり、金属引きボルトとジョイントで繋がられている。引きボルトはCLTパネルの中に埋め込まれるため、座金が埋め込まれる壁に貫通口がある。貫通孔の座金以外の場所には断熱材が充填されている。隅角における引きボルトがn屋根から床まで貫通し、鉄骨の梁に直接に繋がっている。床に埋め込まれる支圧板と基礎の間には填充物ではなく、空気だけである。柱 (Fig.5) は中空であり、床との接合部に隙間があるように設定した。解析条件をTable2-4に示す。室内側の境界条件は20°C、相対湿度50%とした。そのため、露点温度が9.5°Cである。外気条件は札幌市の最低気温を想定し、最低温度-28.5°C、最高温度-6.9°Cの間を24時間のsinカーブ表現する関数を作成した。

4.4 解析結果

1) コーナーの室内表面温度と結露の分析

Fig. 7にA点 (Fig.2) の室内表面温度を示す。壁と壁の接合部は、隅角部であり、さらに、金属の引きボルトが内部にあるため、床と壁の接合部よりも温度が低下している。また、右側の壁には金属の座金による温度低下が現れている。座金の貫通口は、結露防止のため、断熱材が充填されているが、熱流が金属部分に集中するため、かえって、温度が低下していると考えられる。Fig.8に床付近の熱流を示す。床全面に断熱材を貼り付けた後も、鉄骨梁付近は大きな熱流が発生し、結露が生じる可能性が示唆された。

Fig.9-14は各Caseごとの表面温度の頻度分布である。結露率は、Case1-6まで、断熱を強化していくに従って、0.24%~0.002%に低下した。但し、結露は1ヶ所でも生じると、室内の汚損やかびの被害が発生する可能性がある。CLTでは金属部材の取り扱いに十分注意する必要があることが示唆された。また、全体的な温度の頻度分布は断熱を強化するにしたがって、温度上昇した。すなわち、室温を維持するためのエネルギー消費量は減少する。但し、断熱強化に伴い、コストも上昇するため、断熱材の厚みと断熱性能のバランスを慎重に取り扱う必要がある。

2) 熱橋部の温度の推移。

Table2 Insurance condition

Condition	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
Corner	no insurance	floor insurance 150mm	Fig Case3 floor insurance 150mm+out insurance 25mm	floor insurance 150mm+out insurance 50mm	floor insurance 150mm+out insurance 75mm	floor insurance 150mm+out insurance 100mm
Pillar	no insurance	floor insurance 150mm	×	×	×	×

Table3 Simulation condition

Environment temperature (highest) °C	Environment temperature (lowest) °C	Indoor temperature °C	Indoor relative humidity %	Emissivity	Time h
-6.9	-28.5	20	50	1.00	72

Table4 Material setting

	CLT	Metal	Insulation	Air
Density/kg·m ³	400	7870	22	rho(Pa,T)
Cp/J/(kg·K)	2700	440	850	Cp(T)
K/w(m·K)	0.114	76.2	0.038	K(T)

Fig.15は、Fig. 7に示す3点の温度の推移である。壁 (断熱材) の温度は断熱性能が高いので、外気温にはほぼ一致している。一方、熱橋部 (床、天井) の温度と大きな差異はない。CLTの場合、断熱材よりは劣るものの、RCの3-5倍の断熱性能があるためと考えられる。また、外気温度が高い時、壁表面の温度は天井と床より高いが、外気温が下がると壁表面温度も天井と床より低くなっている。これは、CLTの熱容量の影響と考えられる。

3) 柱部の表面温度と結露の分析

Fig. 16は柱部の表面温度である。柱脚の温度は低下しているが、柱頭部の温度はそれほど低下していない。これは接合方法が異なるからで、柱脚部に外気に暴露された。鉄骨梁に接合されている面積が大きいので、温度低下が著しいと考えられる。Fig.17は、柱部の結露可能性の推移である。コーナーに比べると高い確率になっており、また、外気温の変動に伴って、変化している様子が分かった。Fig.18は柱部の表面温度の頻度分布である。累積頻度は断熱をしてもしなくても0.57%を維持しており、室内表面温度の頻度分布も大きな差異がない。すなわち、柱の周りに対して床下に外断熱をしても結露の防止及び室内環境の改善に効果がないと認められる。現在、柱が接続している鉄骨の梁の外側が外気に面しており、その影響と考えられる。

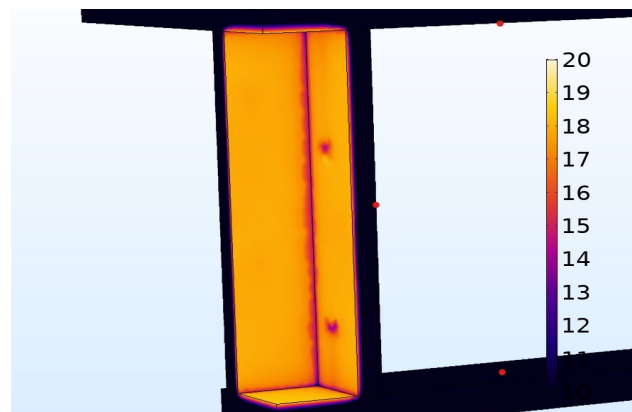


Fig.7 Result at 72h (Corner)

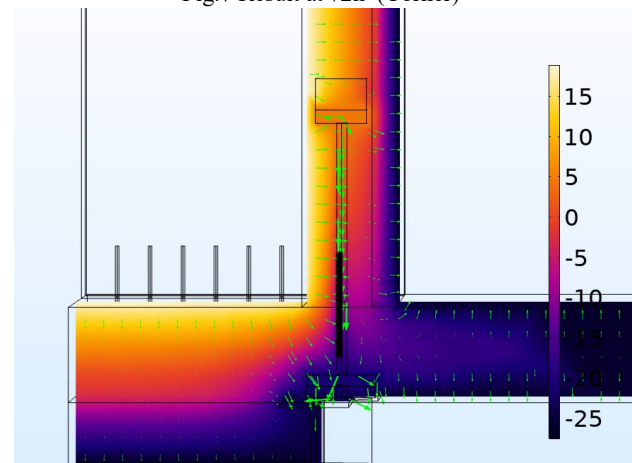


Fig.8 Heat Flow around Corner

5. 総括

- 1) 旭川の道立林産試験場に建設されたCLT建物の室内環境と暖房エネルギー消費量を測定し、その結果から、CLTの熱抵抗値、熱伝導率を算出した。その結果、欧州で利用されている値と概ね一致した。
- 2) サーモカメラで建物を熱橋部を調査した。引きボルトが埋め込まれている壁、隅角部、柱の周辺、断熱材のない壁にはヒートブリッジが生じることが分かった。
- 3) シミュレーションで実測結果を検証した。断熱材を厚くさせると、隅角の結露頻度が低減すること及び柱の結露頻度は外断熱厚さにあまり関係がないことが分かった。
- 4) 座金が暴露される箇所に断熱を行い、隅角に内断熱を行ってヒートブリッジを抑制する手法を提案した。

【参考文献】

- 1) 森 太郎, 鷹野 敦, 大島 亘, 植松 武是, カラマツCLT建造物の断熱性能の検証, 日本建築学会技術報告集, 24巻 (2018) 58号。
- 2) Seong JinChang, Seunghwan Wi, Sumin Kim, Thermal bridging analysis of connections in cross laminated timber buildings based on ISO 10211, Department of Architecture and Architectural Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Republic of Korea.
- 3) Chang S J, Wi S, Kim S. Thermal bridging analysis of connections in cross-laminated timber buildings based on ISO 10211[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 709-722.
- 4) Sami A, Al-Sanea, M.F. Zedan, Effect of thermal bridges on transmission loads and thermal resistance of building walls under dynamic conditions, APPLIED ENERGY Volume:98 Pages:584-593 Published:OCT 2012.
- 5) Julye Ramalho de Freitas, Eduardo Grala da Cunha, Thermal bridges modeling in South Brazil climate: Three different approaches, Energy and Buildings, Volume 169, 15 June 2018, 271-282.

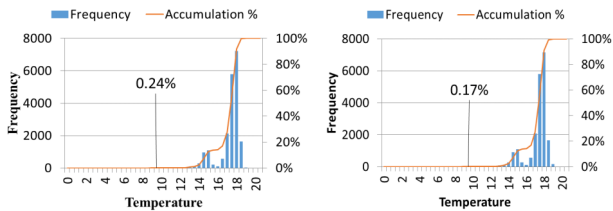


Fig.9 Case1(Corner)

Fig.10 Case2(Corner)

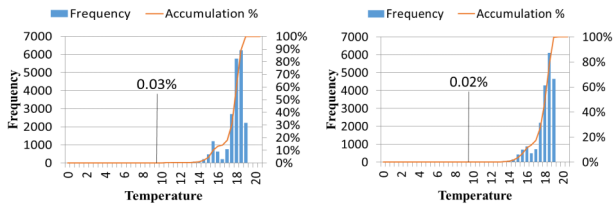


Fig.11 Case3(Corner)

Fig.12 Case4(Corner)

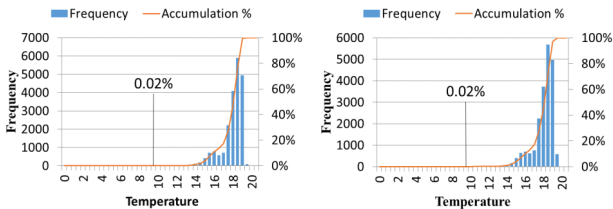


Fig.13 Case5(Corner)

Fig.14 Case6(Corner)

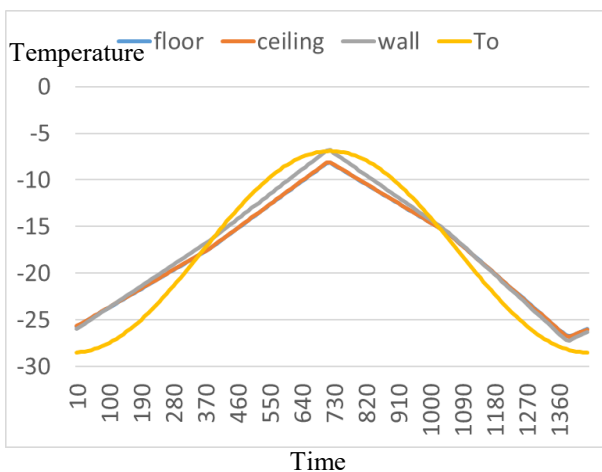


Fig.15 Case4 outside

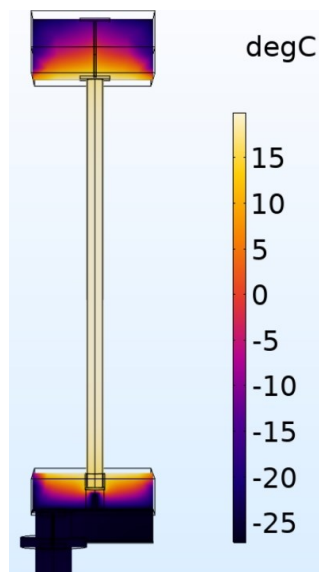


Fig.16 Result (Pillar) at 72h

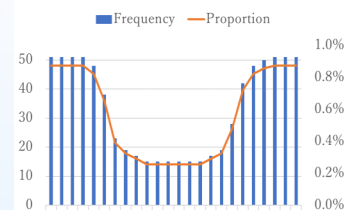


Fig.17 Condensation Frequency (Pillar)

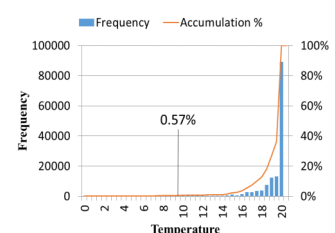


Fig.18 Case1(Pillar)