

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

氏 名 中 谷 岳 史

論 文 題 目

木質空間の熱伝達機構に関する研究

論文審査担当者

主 査	名古屋大学准教授	山 崎	真 理 子
委 員	名古屋大学教授	佐 々 木	康 寿
委 員	名古屋大学教授	土 川	覚
委 員	名古屋大学教授	山 本	浩 之
委 員	名古屋大学助教	安 藤	幸 世
委 員	名古屋大学助教	水 谷	章 夫

論文審査の結果の要旨

気候変動の要因である地球温暖化に対し、世界的に森林の価値が改めて再評価され、その持続的な保全と管理が求められて久しい。木質バイオマスは、その一翼を担う資源として適正な利用管理が求められている。近年では、欧米を中心にマテリアル利用が強く促進され、農学系分野ではこれに柔軟に対応できる新しい材料開発が盛んである。

利用現場である建築分野における温室効果ガスの削減策として、建設エネルギーの削減、既存建築物内の省エネルギー化、廃棄時のエネルギー削減が挙げられる。このうち、木質バイオマスは建設・廃棄エネルギーにおいて、他材料と比べて非常に高い優位性を有している。しかし、既存建築物内の省エネルギー化、すなわち断熱性や気密性に対しては研究が進んでおらず、人工材料に大きく後れをとっている。木質バイオマスや農業系廃棄物の原料とした断熱材の開発事例は少なくないが、いずれも単なる廃棄物利用にとどまっており、熱伝達機構に基づく高機能設計理論は示されていない。一方、新たな構造材料である CLT (Cross laminated timber) は、木材の熱容量が効果を示すと考えられ、建築物に対する断熱性能の発揮が期待されている。しかし、現在の建築物における環境設計は定常設計が基本となっており、熱容量が効果を発揮する非定常設計は行われていない。これは、金属材料では定常設計が基本となること、コンクリートでは熱容量は大きいものの、断熱設計に効果が期待されるものではないことが原因である。すなわち、非定常設計は木質材料において特に効果が高い設計法である。

以上の背景のもと、本博士論文は、木質繊維系断熱材の内部微小空間における熱伝達機構と、木質系壁体の屋外一壁体一建築内部の居住空間領域の熱伝達機構を検討し、木材の有する熱特性を有効に利用する知見を得ることを目的とした。論文構成は7章となっている。第1章で研究背景ならびに既往研究を述べ、材料や壁体の熱貫流、そして室内温熱環境に関する先行研究と関連づけながら、研究背景と目的、そして研究意義を明確にした。第2章では熱移動理論について詳述されている。第3章では、まず木質繊維系断熱材内部の微小空間の熱伝達機構の評価を目的として、製材時廃棄物の鉋屑を原料にした木質系マット状断熱材の熱物性として、熱伝導率と容積比熱を測定した。また原料の鉋屑とケナフの配合比率やマット密度、熱流方向が熱物性値に及ぼす影響を検討した。第4章では、第3章の実験結果を基に、自然素材特有の複雑な空隙形状に対応するため、複合材料における熱伝達理論を新たに誘導し、自然素材由来の断熱材内部の熱伝達機構を定量評価する手法を提案した。一方、第5章では、木質材料で構成された居住空間を対象とし、実大モデルの同時測定を用いた温熱環境評価を行った。この実験結果により示された非定常性について、第6章では木質材料の非定常効果を定量的に解析し、等価熱抵抗による設計法を提案した。第7章では、論文の結論として以上の総括を行うとともに、今後の学術研究の展開を述べている。

以下に、第3章から第6章の知見をまとめる。

【第3章】

製材時廃棄物の鉋屑を原料にした木質系マット状断熱材の熱物性を確認する為、熱伝導率と容積比熱を測定した。また原料の鉋屑とケナフの配合比率やマット密度、熱流方向が熱物性値に及ぼす影響を検討した。以下に結果を示す。

1. 全測定条件の平均熱伝導率は $0.069(\pm 0.005) \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ であった。マット密度と熱伝導率は負の相関であった。熱伝導率が最小となったのは、密度 $0.08 \text{ g}/\text{cm}^3$, (Wood shaving : Kenaf of 25% : 70%) の条件であり、 $0.061(\pm 0.002) \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ であった。
2. 断熱マットの原料がプレーナー屑単体もしくはケナフ単体では、マット密度の増減によって熱伝導率が大きく変動した。鉋屑とケナフ繊維を等配合することで、熱伝導率の分散が小さくなり、安定した。熱流方向間(水平, 上向き, 下向き)による熱伝導率の影響は、統計的に確認できなかった。
3. 木質繊維系低密度マットの全測定条件の平均容積比熱は $150(\pm 46) \text{ kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ であった。マット密度と容積比熱は正の相関であった。容積比熱が最大となったのは、マット密度 $0.08 \text{ g}/\text{cm}^3$, (Wood shaving : Kenaf of 70% : 25%) の条件であり、 $229(\pm 55) \text{ kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ であった。配合比について、マット密度と容積比熱の関係を分散分析で検定した。配合比の影響は確認できなかった。

【第4章】

木質系マット状断熱材を対象に、複合材料の熱伝導率の推定モデルを作成し、熱移動経路を検討した。また実験条件の範囲外の要因を推定し、マットの高密度化による熱伝導率の低減を推定した。さらに熱伝導率の低下を目的に、添加繊維の繊維密度による熱伝導率の低下効果を検討した。以下に結果を示す。

1. 熱伝導率の推定モデルは、Hagerモデルを複合材料に適用できるように改良した。
2. 材料密度と配合比から、マット密度変化に伴う繊維層と空気の体積割合の関係を算出した。ケナフと鉋屑の繊維比重が異なる為、マット密度が同一でも鉋屑の配合比が多くなるほど、マット内部の空気の体積割合が増加した。
3. 熱伝導率モデルにより、マット内部の伝熱経路の検討を行った。実験条件内の密度範囲では、マット密度が高くなると、伝導成分による熱伝導率は増加し、放射成分による熱伝導率は低下した。放射成分による熱伝導率の低下が相対的に大きい為、密度増加によりマット全体の熱伝導率は減少した。
4. 実験条件より高密度の条件を推定すると、マットを高密度にすることは放射成分の熱伝導率を低減するのに有効であった。しかしマット密度を $0.10 \text{ g}/\text{cm}^3$ 以上になると、放射成分による熱伝導率の低下が止まる。また空気の体積割合が減少する為、伝導成分による熱伝導率が増加し、マット全体としては熱伝導率が増加に転じることが予想された。

5. 熱伝導率推定モデルを用いて、鉋屑に混合する繊維の密度がマット全体の熱伝導率に及ぼす影響を検討した。繊維の密度を高くすると熱伝導率は低下した。スギと同程度の密度(0.40g/cm^3)の繊維を用い、密度を高くすれば、マット全体の熱伝導率は $0.060\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ を下回る可能性が予測できた。

【第5章】

木造住宅の壁体構成が室内温熱環境に及ぼす影響を明らかにするため、同一敷地内に建設された3種類の実験棟の温熱環境について、実測調査に基づいて検討した。各実験棟は同一形状、同一容積であり、壁体の仕様が異なる。Type MW は板土複合壁仕様、Type M は土壁仕様、Type I は断熱壁仕様である。非空調条件の自然室温を計測した。また実験棟の連続空調時のエアコンの消費電力を測定し、壁体構成が省エネルギーに及ぼす影響を検証した。結果を以下に示す。

1. 非空調条件では、月平均室内気温の水準及び外気温より室温が高くなる時間割合は、Type I > Type WM > Type M の順であり、断熱性能の大小関係と一致した。
2. 年間を通じた室温上昇率(室温日較差/外気日較差)を検討した結果、Type M は年間を通じて 100%以下に分布するのに対して、Type I は 100%以上に分布した。Type WM は、Type M と Type I の間の傾向を示した。Type M は断熱性能が低いために室温上昇が抑制され、熱容量が大きいことで室温が平準化したと考えられる。
3. 空気温度の位相遅れを検討した結果、実験棟間で最高気温と最低気温の出現時刻で差が見られた。Type WM が最も位相遅れが大きく、位相遅れには熱容量に加えて、断熱性能が影響することが示された。
4. 室内外温度差と空調用消費電力量は相関関係にあり、室内外温度差が大きくなると消費電力量が増加した。両変数はバイリニアの関係にあり、室内外温度差が約 20°C を超えると消費電力量の増加傾向が大きくなった。
5. 各実験棟の消費電力量と室内外温度差の一日の時間的変動には、建物の熱負荷や熱容量が関係することを示した。

【第6章】

熱容量による貫流熱量低減効果を検討する為、非定常熱伝導方程式による数値解析を行った。夏季の西側壁体を対象とし、相当外気温度と室内気温は第2章の計測データを用いた。終日を通じ、相当外気温度が室内気温より高い。壁体種類と厚さを解析要因とし、日積算室内側貫流熱量を検討した。以下に結果を示す。

1. 壁体の内部温度分布を計算した。夕方の短波日射の低下に伴い、頂点を有する放物線型が出現し、相当外気温度が室内側気温より高い状態でも、外気側表面では室内から外気に向けた逆向きの熱流方向が生じた。外気側熱的境界の再放熱は、夕方から翌日の日出まで継続した。
2. 夕方から夜間にかけて、外気側熱的境界において再放熱が生じた。厚さ 100mm の

壁について、材料間で日積算再放熱量を比較した結果、土>木材>木質繊維マット>グラスウールの順であり、容積比熱の大小関係であった。またグラスウールでは外気側壁体表面の再放熱が殆ど生じなかった。

3. 外気側熱的境界における再放熱量を入力熱量で除した値を再放熱率と定義した。熱的定常仮定では、再放熱率は0%である。板壁厚さ50mmでは再放熱率10%程度であるのに対し、厚さ100mmで35%、厚さ200mmで65%となった。再放熱量は、壁体厚さが強く影響した。
4. 室内側貫流熱量を外気側壁体入力熱量で除した値を熱通過率と定義した。熱的定常仮定では、熱通過率は100%である。板壁厚さ50mmでは熱通過率90%程度であるのに対し、厚さ100mmで70%、厚さ200mmで40%程度となった。再放熱によって、日積算貫流熱量が低減され、厚みの影響が顕著であった。
5. グラスウールを基準とし、日積算室内側貫流熱量の等価熱抵抗を算出した。木材は55%、木質繊維系マットは90%の熱抵抗でグラスウール熱抵抗と等価となった。

以上のように、本博士論文は、木質バイオマスのマテリアル利用促進を目的として、木質系材料で構成された空間の熱伝達機構について実験的・理論的に評価を行ったものである。木質空間として、木質繊維系断熱材内部の微小空間と、木質系材料で構成された建築物内の居住空間のサイズが大きく異なる2種類の空間を対象としている。

微小空間の熱伝達機構について、空間を構成するバイオマス原料の形状および空間密度を解析因子とした。さらに、自然素材特有の複雑な空隙形状に対応するため、複合材料における熱伝達理論をHagerモデルを基に新たに誘導し、実測評価が困難な放射成分を伝熱成分の実験データを基に理論的に推定することにより、自然素材由来の断熱材内部の熱伝達機構を定量評価する手法を提案した。これにより、繊維状原料の密度の増加が高性能断熱材の開発を可能とすることを示した。以上の成果は、木質バイオマスを原料とする場合に限らず、あらゆる材料への適用が可能であり、特に農業系廃棄物などを含む自然素材系断熱材の最適化設計に大きく貢献するものである。

一方、木質系材料で構成された建築物内の居住空間の熱伝達機構について、まず、木質系、土系、グラスウール系の実大モデルを対象とした同時測定による、温熱環境評価実験を行った。この実大実験により、木質バイオマスの熱伝導率と容積比熱の関係性から特徴づけられる熱容量の効果を定量的に評価した。さらに、実験データを基にした非定常伝熱解析を行い、再放熱効果が居住空間の温熱環境に及ぼす影響を見出し、これを定量評価する手法として、日積算室内側貫流熱量の等価熱抵抗を提案した。その結果、木質材料の熱抵抗性はグラスウールの1.9倍、木質系断熱材では1.1倍の効果を持ち得ることを示すとともに、実験によりこれを確認した。

これらの研究成果について、報文として国際学術誌に2報が既に発表され、ほか2報が投稿準備中である。

以上のことから、本博士論文は、実験および理論誘導のいずれにおいても新規性と独自性が認められるとともに、高度の学術的価値を有していると判断された。また、木質バイオマスのマテリアル利用が促進される中、今後は省エネルギー性の向上が求められるが、これに対して環境設計、材料設計の両側面からアプローチした本研究成果は今後の学術研究に大きく貢献するものと考えられる。

試験の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 第	号	氏名	中谷 岳史
試験担当者	主査 山崎 真理子 佐々木 康寿 土川 覚 山本 浩之 安藤 幸世 水谷 章夫			
<p>(試験の結果の要旨)</p> <p>平成28年7月12日学位審査委員会において、主論文の内容を中心としてこれに関連する科目の学識および研究能力について試問し審査した結果、合格と判定した。</p>				