

平成 30 年度環境省委託業務

平成 30 年度セルロースナノファイバー活用製品の性能評価事業委託業務

セルロースナノファイバーを利用した
住宅部品高断熱化による CO₂ 削減
成果報告書

2019 年 3 月

事業代表者

国立大学法人 静岡大学
(先端バイオマス利用コンソーシアム)

共同実施者

国立大学法人 名古屋工業大学
国立大学法人 山口大学
学校法人 常翔学園 大阪工業大学
学校法人 同志社 同志社大学
倉敷紡績株式会社
トクラス株式会社
ランデス株式会社
YKK AP 株式会社
岡山県農林水産総合センター森林研究所
静岡県工業技術研究所

目次

要旨	1
1. 業務の概要	7
1. 1 業務テーマ	7
1. 2 業務の目的	7
1. 3 業務の期間	7
1. 4 本業務に至った背景	7
1. 5 業務の内容	8
1. 6 事業実施体制	13
1. 7 本業務終了後の計画	15
2. 業務成果報告	16
(1) 外皮部品における断熱性向上に関する技術開発	16
① 外壁部品における断熱性向上に関する技術開発	16
ア 外壁構成素材の試作	16
1) 高断熱セルローズ系断熱材	16
2) 高断熱木質ボード	22
3) 高断熱無機ボード	33
イ 外壁部品としての評価	51
1) 外壁部品の試作	51
2) モデルルーム評価	52
② 天井部品における断熱性向上に関する技術開発	61
ア 天井構成素材の試作	61
1) 高剛性化粧合板	61
2) 高断熱グラスウール	74
イ 天井部品としての評価	78
1) 天井部品の試作	78
2) モデルルーム評価	79
③ 床部品における断熱性向上に関する技術開発	82
ア 床構成素材の試作	82
1) 高断熱 WPC フロア	82

2) 高断熱ウレタンボード.....	122
3) 高断熱セルローズ系断熱材.....	143
イ 床部品としての評価.....	143
1) 床部品の試作.....	143
2) モデルルーム評価.....	143
④開口部品における断熱性向上に関する技術開発.....	148
ア 開口断熱に対する CNF 利用の検証.....	148
イ 開口部品としての評価.....	154
(2) 内装部品における断熱性向上に関する技術開発.....	159
①内壁部品における断熱性向上に関する技術開発.....	159
ア 内壁構成素材の試作.....	159
1) 高断熱内装不燃ボード.....	159
2) 高断熱ウレタンボード.....	163
イ 内壁部品としての評価.....	163
1) 内壁壁部品の試作.....	163
2) モデルルーム評価.....	164
②浴室壁部品における断熱性向上に関する技術開発.....	165
ア 浴室壁構成素材の試作.....	165
1) 高断熱ウレタンボード.....	165
2) 高断熱内装不燃ボード.....	165
3) 構成による高断熱化.....	165
イ 浴室壁部品としての評価.....	172
1) 浴室壁部品の試作.....	172
2) システムバス評価.....	178
③浴室天井部品における断熱性向上に関する技術開発.....	187
ア 浴室天井構成素材の試作.....	187
1) 高剛性 FRP 素材.....	187
2) 高断熱吹付ウレタン.....	191
イ 浴室天井部品としての評価.....	199
1) 浴室天井部品の試作.....	199
2) システムバス評価.....	199
(3) 社会実装に向けた実証.....	200
①実用化に向けた環境整備.....	200
ア CNF 製品製造者に向けた情報の明確化.....	200
イ CNF 製品利用者に向けた情報発信.....	215

②経済性の評価	217
ア 各部品の経済性評価	217
イ 住宅メーカー等へのヒアリング	221
③リサイクルに関する調査	222
ア 熱可塑性樹脂部品	222
イ 熱硬化性樹脂部品	225
ウ 無機素材	232
④CO ₂ 削減効果の検証.....	237
⑤今後の事業計画	251
3. 総括.....	257

要旨

本業務では、セルロースナノファイバー（以下 CNF と略す）の形状に着目し、「空隙制御能」、「ネットワーク構造」、「化学的改質が可能」という特性を活かし、住宅部品のベース素材特性を引き立たせる添加剤的利用として、住宅部品の断熱性能向上により、エネルギー起源 CO₂ 削減を図る検証を実施した。

この内本年度は、高断熱部品による住宅 1 戸あたり年間 15kg 以上の CO₂ 削減を目標として、量産を想定した外皮及び内装部品の試作と、各部材で目標とする熱還流率の達成、並びにテストハウスでの評価を行い、住宅 1 戸あたり年間 310kg 以上の CO₂ 削減を実現した。

(1) 外皮部品における断熱性向上に関する技術開発

外壁、天井、床を構成する各素材の量産化試作を行い、以下の通り目標値を達成した。また、各素材について経済性を確保できる条件（材料、配合、生産設備及び生産能力）を確立した。

◆外壁素材

CNF 添加高断熱セルロース系断熱材（熱伝導率 0.037 W/mK）

CNF 添加高断熱木質ボード（熱伝導率 0.049 W/mK）

CNF 添加高断熱無機ボード（熱伝導率 0.176 W/mK）

◆天井素材

CNF 添加高剛性化粧合板（曲げ剛性 1.6 GPa、既存品と比較して 39% 向上）

CNF 添加高断熱グラスウール（熱伝導率 0.038 W/mK）

◆床素材

CNF 添加高断熱 WPC フロア（熱伝導率 0.120 W/mK）

CNF 添加高断熱ウレタンボード（熱伝導率 0.019 W/mK）

CNF 添加高断熱セルロース系断熱材（熱伝導率 0.037 W/mK）

また、これらの素材を用いて試作した外壁、天井、床部品の熱貫流率はそれぞれ 0.33、0.18、0.27 W/m²K を達成した。また、すべての部品で既存品と同等の施工性を持つことを確認した。

さらに、開口断熱に関する CNF 利用の検証を行い、合わせガラス中間膜に CNF フィルムの利用をすることで、耐候性や日射透過率は既存の中間膜フィルムと同等でありながら、優れた熱膨張や弾性率が得られることを確認した。また、モデルルームを対象とした有限体積法による数値解析シミュレーションより、熱伝導率が約 0.8 W/mK 下がることで 1 時間で室内温度に 2°C の差が生じることを確認した。

(2) 内装部品における断熱性向上に関する技術開発

内壁、浴室壁および浴室天井を構成する各素材の量産化試作を行い、以下の目標性能を達成した。また、各素材について経済性を確保できる条件(材料、配合、生産設備及び生産能力)を確立した。

◆内壁、浴室壁

CNF 添加高断熱内装不燃ボード (熱伝導率 0.174 W/mK)

CNF 添加高断熱ウレタンボード (熱伝導率 0.019 W/mK)

◆浴室天井

CNF 添加高剛性 FRP 素材 (GF/EP との比較でヤング率 225%、引張強度 210% 向上)

CNF 添加高断熱吹付ウレタン (熱伝導率 0.0208 W/mK)

これらの素材を用いた内壁と浴室壁、浴室天井部品の熱貫流率はそれぞれ 0.18、1.28、0.34 W/m²K を達成した。(1) の外皮部品と内壁部品をモデルルームに組み込み評価を行ったところ、7.3%の CO₂ 削減効果が得られたほか、既存品と同等の施工性を持つことを確認した。また、試作した浴室壁部品と浴室天井部品をシステムバスに組み込み評価を行ったところ、25.5%の CO₂ 削減効果が得られた。

(3) 社会実装に向けた実証

実用化に向け、CNF 製品製造者に対しては空隙と断熱性の相関関係を提示するとともに、CNF 製品利用者に対しては、CNF 添加断熱部品を利用することによる省エネ効果を提示した。

本事業試作品を用いた住宅 1 戸当たりの製造及び施工コストは既存住宅に対して 95,000 円の増加となる一方で、年間暖房費は 6 地域で 4,948 円/年、メンテナンスコストは 35,000 円/年のコスト削減になることが試算された。住宅メーカー等に対するヒアリングから、施工性については問題がないこと、既存品と比べたイニシャルコスト高をどれだけ抑えられるかが課題となること示された。また、断熱効果は消費者には効果が実感しにくい指標であるため、宿泊型の体験イベントなど、体感型の PR が有効であることが示唆された。

開発部品のリサイクル性を検証するために、熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂および無機素材のリサイクル方法の検討および再利用後の機械的特性を検証した。熱可塑性樹脂はリサイクル後にも 90%以上の機械的特性を維持していること、熱硬化性樹脂では、CNF の添加により粉砕性が向上すること、無機素材は粉砕して複合材料のフィラーとして再利用可能であることが示された。

ライフサイクルアセスメントでは、原材料および製造段階、使用段階、廃棄輸送・処理のそれぞれの段階において、CO₂排出量の削減が見られた。住宅1戸、1年あたりで見ると、全体として310 kgのCO₂排出量の削減が見込まれ、そのうち使用段階による削減は、224 kgであった。

事業展開においては、導入が早い工務店等のビルダーを対象とし、これら業界資源でも対応できる部素材をメーカーの実情に則した製品仕様で実現した。このように、使い手側、作り手側双方のリスクを軽減することで、早期実用化～普及拡大を図り、2023年にはスタンダード化できる事業計画を提案した。

Summary

Cellulose nanofiber (CNF) is nano sized material which constructs a network structure and is easy of chemical modification. Also CNF can be used as a material to control the void structure of composite material. In this task, improvement of heat insulation capacity for housing parts by using CNF-added material was investigated to reduce the Carbon dioxide (CO₂) emission.

In this fiscal year, housing parts such as casing or interior using CNF were produced with mass-production model. These CNF-added housing parts accomplished their target heat insulation capacity. Heat transmission coefficient was calculated based on the actual measurement of produced housing parts. Also these housing parts were installed in the model house to evaluate the heat insulating effect. We demonstrated more than 310kg of CO₂ will be reduced per year/household.

(1) Technical development for the heat insulation of casing parts

CNF-added housing parts for exterior wall, ceiling and floor were produced under mass production procedure and several target performance was achieved. Optimal material, blending condition, production facilities and capacity for economical aspects were established.

◆ Exterior wall

Cellulosic insulation board (Thermal conductivity: 0.037 W/mK)

Interior fiberboard (Thermal conductivity: 0.049 W/mK)

Interior inorganic board (Thermal conductivity: 0.176 W/mK)

◆ Ceiling

CNF reinforced rigid plywood (Flexural rigidity: 1.6 GPa, 39% higher than conventional products)

Glass wool (Thermal conductivity: 0.038 W/mK)

◆ Floor

Wood plastic composites flooring (Thermal conductivity: 0.120 W/mK)

Urethane board (Thermal conductivity: 0.019 W/mK)

Cellulosic insulation board (Thermal conductivity: 0.037 W/mK)

Assembled exterior wall, ceiling and flooring parts made by developed materials achieved lower thermal transmittance such as 0.33 W/m²K, 0.18 W/m²K and 0.27 W/m²K, respectively. These casing parts also showed the equivalent workability to the conventional parts.

The effect of CNF on the thermal insulation at the opening parts. CNF interlayer of

laminated glass showed better thermal expansion and Young's modulus than conventional interlayer whereas its weather resistance and light transmission were same as conventional interlayer.

(2) Technical development for the heat insulation of interior parts

CNF-added housing parts for interior wall, bathroom wall and ceiling were produced under mass production procedure and several target performance was achieved. Optimal material, blending condition, production facilities and capacity for economical aspects were established.

◆Interior and bathroom wall

Nonflammable board (Thermal conductivity: 0.174 W/mK)

Urethane board (Thermal conductivity: 0.019 W/mK)

◆Bathroom ceiling

CNF reinforced rigid fiber reinforced plastic (FRP) (Tensile modulus and strength: 200% higher than control FRP)

CNF added sprayed urethane (Thermal conductivity: 0.0208 W/mK)

Assembled interior wall, bathroom wall and bathroom ceiling made by developed materials achieved lower thermal transmittance such as 0.18, 1.28 and 0.34 W/m²K, respectively. These interior wall were installed with casing parts in the model house and resulted in the 7.3% of CO₂ reduction. These interior parts also showed the equivalent workability to the conventional parts. Bathroom parts installed in the prefabricated bath unit resulted in the 25.5% of CO₂ reduction compared to the conventional bath unit.

(3) Verification for the practical realization

We offered the information regarding CNF products for both manufacturer and customer. The relationship between thermal insulation and void structure was provided for the manufacturer of CNF related products. Energy saving effect by using CNF products was also proposed for the customer.

In the case of developed parts, cost of manufacturing and construction was estimated to be 95,000JPY/year/household higher than the case of conventional parts. However, cost of heating and maintenance was estimated to be reduced for 4,948 and 35,000JPY/year/household, respectively. Based on the interview for housing manufacturers, developed parts showed the equivalent workability to the conventional parts. Therefore the reduction of manufacturing cost will be the future issues. For the customer, experienced-based promotion might be effective since insulating effect is hard to realize.

As an evaluation of recyclability, recycling procedure for thermoplastic resin, thermosetting resin based composites and inorganic material were investigated. Also mechanical properties of reproduced materials were tested. Thermoplastic resin based materials maintained more than 90% of mechanical properties compared to virgin material. CNF-added thermosetting resin based material showed higher grindability than control. It was also suggested that ground inorganic materials was available for the filler of composite material.

Life cycle assessment revealed that the CNF-added housing parts showed lower CO₂ emission for each stage. Finally 310 kg/year/household of CO₂ emission will be reduced by using CNF-added housing parts.

In this task, mass production prototype of each materials and parts were proposed for the builders toward the development of new business. These proposed materials can reduce the cost for both manufacturer and customer and results in the rapid expansion of CNF-based material. We proposed a business plan to be able to standardize in 2023.

1. 業務の概要

1. 1 業務テーマ

セルロースナノファイバーを利用した住宅部品高断熱化による CO₂削減

1. 2 業務の目的

環境省では、植物由来の素材で鋼鉄の5分の1の軽さで5倍の強度等の特性を有するセルロースナノファイバー（以下「CNF」という。）に着目し、様々な製品等の基盤となる樹脂材料にCNFで補強したCNF活用材料（複合樹脂等）を使用することで、CO₂の削減を図ることを目的とした事業を推進している。

住宅分野における省エネルギーへの取り組みにおいては、国民意識の高まりもあり、省エネ設備の導入が進んでいる。しかしながら、家庭部門におけるエネルギー起源のCO₂排出量は、2013年度で201百万tであり、2030年の排出量目安である122百万tを達成するためには、約4割を削減する必要がある（地球温暖化対策計画）。家庭部門におけるエネルギー消費のうち、暖房エネルギーは全体の23.1%（資源エネルギー庁、エネルギー白書2015）と高く、周囲を外気に晒されている戸建て住宅では、住宅外皮部分の「断熱性向上」はさらなるCO₂排出削減対策として有効な手法である。しかしながら、この「断熱性能向上」は、古くから取り組まれているものの、既存部品の性能向上には限界がある。そこで、本事業では、新たな取り組みとして、革新的素材であるセルロースナノファイバー（CNF）の特性を活用し、高断熱住宅部品の提案・試作を行い、その効果を実証する。

現在、国内外においてCNFは、複合材利用における補強効果が注目されているが、本事業では、CNFの繊維形状に着目し、「空隙制御能」、「ネットワーク構造」及び「化学的改質が可能」という特性を活かし、住宅部品のベース素材特性を引き立てる添加剤として活用し、住宅部品の断熱性能を向上させることにより、エネルギー起源のCO₂削減を図る。具体的には、発泡断熱剤にCNFを添加し、微細な空隙層を形成させることによる、熱伝導性低下に取り組む。

1. 3 業務の期間

平成30年4月1日から平成31年3月31日

1. 4 本業務に至った背景

住宅分野における省エネルギーへの取り組みにおいては、国民意識の高まりもあり、省エネ設備の導入が進んでいる。しかしながら、家庭部門におけるエネルギー起源のCO₂排出量は、2013年度で201百万tであり、2030年の排出量目安である122百万tを達成するためには、約4割を削減する必要がある（地球温暖化対策計画）。家庭部門におけるエネルギー消費のうち、暖房エネルギー

は全体の 23.1%（資源エネルギー庁、エネルギー白書 2015）と高く、周囲を外気に晒されている戸建て住宅では、住宅外皮部分の「断熱性向上」はさらなる CO₂ 排出削減対策として有効な手法である。しかしながら、この「断熱性能向上」は、古くから取り組まれているものの、既存部品の性能向上には限界がある。

このような背景を踏まえ、革新的素材であるセルロースナノファイバー（CNF）の特性を活用し、高断熱住宅部品への活用提案に至った。

1. 5 業務の内容

本業務では、高断熱部品により住宅 1 戸当たり 15kg 以上の CO₂ 削減が実現できる部品を実証する。本年度は、目標を達成するために、（1）～（3）の業務を実施する。

（1）外皮部品における断熱性向上に関する技術開発

①外壁部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 外壁構成素材の試作

1) 高断熱セルロース系断熱材

量産（実用化）に則した条件で、CNF 添加高断熱セルロース系断熱材を試作すること。また、この量産試作品は、目標熱伝導率（0.038W/mK）を確保していること。

2) 高断熱木質ボード

た量産（実用化）に則した条件で、CNF 添加高断熱木質ボードを試作すること。また、この量産試作品は、目標熱伝導率（0.120W/mK）を確保していること。

3) 高断熱無機ボード

量産（実用化）に則した条件で、CNF 添加高断熱無機ボードを試作すること。また、この量産試作品は、目標熱伝導率（0.200W/mK）を確保していること。

イ 外壁部品としての評価

1) 外壁部品の試作

モデルルーム評価用の外壁部品 9m²を試作すること。また、この部品において、目標熱貫流率 0.35W/m²K を確保すること。

2) モデルルーム評価

試作部品をモデルルームに設置し、実測により断熱性能を評価するとともに、既存部品に対する CO₂ 削減効果を明らかにすること。なお、モデルルームでの評価に際して、住宅メーカーの参加も検討すること。

②天井部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 天井構成素材の試作

1) 高剛性化粧合板

量産（実用化）に則した条件で、CNF 補強高剛性化粧合板を試作すること。また、この量産試作品は、目標曲げ剛性（既存部品に対し 27%以上の向上）を確保していること。

2) 高断熱グラスウール

量産（実用化）に則した条件で、CNF 添加高断熱グラスウールを試作すること。また、この量産試作品は、目標熱伝導率（0.045W/mK）を確保していること。

イ 天井部品としての評価

1) 天井部品の試作

モデルルーム評価用の天井部品 14m²を試作すること。また、この部品において、目標熱貫流率 0.22W/m²K を確保すること。

2) モデルルーム評価

試作部品をモデルルームに設置し、実測により断熱性能を評価するとともに、既存部品に対する CO₂ 削減効果を明らかにすること。なお、モデルルームでの評価に際して、住宅メーカーの参加も検討すること。

③床部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 床構成素材の試作

1) 高断熱 WPC フロア

量産（実用化）に則した条件で、CNF 添加高断熱 WPC フロアを試作すること。また、この量産試作品は、目標熱伝導率（0.120W/mK）を確保していること。

2) 高断熱ウレタンボード

量産（実用化）に則した条件で、CNF 添加高断熱ウレタンボードを試作すること。また、この量産試作品は、目標熱伝導率（0.033W/mK）を確保している

こと。

3) 高断熱セルロース系断熱材

(1) -①-ア-1)にて同時に実施

イ 床部品としての評価

1) 床部品の試作

モデルルーム評価用の床部品 14m²を試作すること。また、この部品において、目標熱貫流率 0.33W/m²Kを確保すること。

なお、本項目における品質確認として、原料 CNF 入木粉の基礎性状評価については再委託を可とする。

2) モデルルーム評価

試作部品をモデルルームに設置し、実測により断熱性能を評価するとともに、既存部品に対する CO₂ 削減効果を明らかにすること。なお、モデルルームでの評価に際して、住宅メーカーの参加も検討すること。

④開口部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 開口断熱に対する CNF 利用の検証

ガラス部分として、CNF シートの間膜利用等、枠部分として CNF 補強の塩ビ素材利用等、既存サッシ構成の範囲内で、CNF 利用による高断熱化の調査およびサンプル試作を行うこと。

イ 開口部品としての評価

開口部評価で一般に用いられるシミュレーションにて、開口部の断熱性の評価を行うこと。

(2) 内装部品における断熱性向上に関する技術開発

①内壁部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 内壁構成素材の試作

1) 高断熱内装不燃ボード

量産（実用化）に則した条件で、CNF 添加高断熱内装不燃ボードを試作すること。また、この量産試作品は、目標熱伝導率（0.200W/mK）を確保していること。

2) 高断熱ウレタンボード

(1) -③-ア-2) にて同時に実施

イ 内壁部品としての評価

1) 内壁部品の試作

モデルルーム評価用の内壁部品 27m²を試作すること。また、この部品において、目標熱貫流率 0.29W/m²K を確保すること。

2) モデルルーム評価

試作部品をモデルルームに設置し、実測により断熱性能を評価するとともに、既存部品に対する CO₂ 削減効果を明らかにすること。なお、モデルルームでの評価に際して、住宅メーカーの参加も検討すること。

②浴室壁部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 浴室壁構成素材の試作

1) 高断熱ウレタンボード

(1) -③-ア-2) にて同時に実施

2) 高断熱内装不燃ボード

(2) -①-ア-1) にて同時に実施

3) 構成による高断熱化

本開発技術を応用した高断熱化の手法を提案すること。

イ 浴室壁部品としての評価

1) 浴室壁部品の試作

システムバス評価用の浴室壁部品 16m²を試作すること。また、この部品において、目標熱貫流率 1.86W/m²K を確保すること。

2) システムバスの評価

試作部品を用いシステムバスの評価を実施し、既存部品に対する CO₂ 削減効果を明らかにすること。

③浴室天井部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 浴室天井構成素材の試作

1) 高剛性 FRP 素材

量産（実用化）に則した条件で、CNF 補強高剛性 FRP 素材を試作すること。また、この量産試作品は、目標曲げ剛性（たわみ量 2mm 以内）を確保していること。

2) 高断熱吹付ウレタン

量産（実用化）に則した条件で、CNF 添加高断熱吹付ウレタンを試作すること。また、この量産試作品は、目標熱伝導率（0.033W/mK）を確保していること。

イ 浴室天井部品としての評価

1) 浴室天井部品の試作

システムバス評価用の浴室天井部品 4m²を試作すること。また、この部品において、目標熱貫流率 0.57W/m²K を確保すること。

2) システムバス評価

試作部品を用いシステムバスの浴室暖房効果を評価し、既存部品に対する CO₂ 削減効果を明らかにすること。

（3）社会実装に向けた検証

①実用化に向けた環境整備

ア CNF 製品製造者に向けた情報の明確化

発泡系断熱材においては、空隙サイズが断熱性に及ぼす影響、繊維系断熱材においては、空隙と空気対流のシミュレーションをもとに、CNF 添加手法が断熱性に及ぼす影響を評価し、品質管理に寄与できる技術データを提示すること。

イ CNF 製品利用者に向けた情報発信

シミュレーションにより、本開発断熱部材と室内温度環境の関係を明らかにすること。

②経済性の評価

ア 各部品の経済性評価

本開発部品と既存部品の経済性の比較、検証を行うこと。

イ 住宅メーカー等のヒアリング

本開発部品に関する市場調査を実施すること。

③リサイクルに関する調査

ア 熱可塑性樹脂部品

フロア WPC のマテリアルリサイクル手法の提案をすること。

イ 熱硬化性樹脂部品

ボード系ウレタン断熱材のマテリアルリサイクル手法の提案をすること。

ウ 無機素材

無機ボードのマテリアルリサイクル手法の提案をすること。

④CO₂削減効果の検証

各種部品の試作を通じ、実測データでの LCA 評価を実施すること。また、試作部品の熱伝導率を用いた省エネ効果の推定とモデルルームでの実測評価双方での CO₂削減効果を明らかにすること。

⑤今後の事業計画

本事業においての実試作・実利用を踏まえ、本開発品の実用化に向けた課題、カビ等の耐久性、法規や業界基準等の規制など、対策等を明らかにして、実用化計画を策定すること。

1. 6 事業実施体制

静岡大学が事業代表機関とし、名古屋工業大学、山口大学、大阪工業大学、同志社大学、岡山県、静岡県、倉敷紡績株式会社、トクラス株式会社、ランデス株式会社及び YKK AP 株式会社が共同研究機関として参画した。実施体制は以下の通りである。

□先端バイオマスコンソーシアム (静岡大学)

(1) 外皮部品における断熱性向上に関する技術開発

・ 外壁部品構成素材の量産試作

岡山県森林研究所、静岡大学、名古屋工業大学、山口大学

・ 外壁部品の試作

岡山県森林研究所、静岡大学、名古屋工業大学

- ・天井部品構成素材の量産試作
静岡大学、大阪工業大学
- ・天井部品の試作
岡山県森林研究所
- ・床部品構成素材の量産試作
同志社大学、山口大学、倉敷紡績、岡山県森林研究所
- ・床部品の試作
トクラス
- ・開口断熱に関する CNF 利用の検証および開口部品の評価
YKK AP
- ・モデルルーム評価
岡山県森林研究所

(2) 内装部品における断熱性向上に関する技術開発

- ・内壁構成素材の量産試作
ランデス、倉敷紡績
- ・内壁部品の試作、モデルルーム評価
岡山県森林研究所
- ・浴室壁構成素材の量産試作
倉敷紡績、ランデス、山口大学
- ・浴室天井構成素材の量産試作
静岡大学、倉敷紡績
- ・浴室壁・天井部品の試作、システムバス評価
トクラス

(3) 社会実装に向けた検証

- ・CNF 製造者、利用者に向けた情報発信
名古屋工業大学、大阪工業大学
- ・経済性の評価、住宅メーカーへのヒアリング
静岡大学
- ・リサイクルに関する調査
山口大学
- ・CO₂ 削減効果の検証
静岡大学 (LCA 評価を外注 (委託))
- ・今後の事業計画
静岡大学、静岡県、岡山県

1. 7 本業務終了後の計画

本業務は、既存断熱素材を CNF の活用により高断熱化することが中心となっている。したがって、利用者である住宅メーカー側にとっては、仕様変更レベルであり、導入への抵抗感は少ない。共同実施者には、断熱部品を製造するメーカーと使用するメーカー双方が参画している。そのため、断熱性向上に加え、経済性や使い勝手までを考慮して検証しており、流通上の問題も本業務を進める中で解決の道筋を付けられる見込みである。このような背景から、本業務終了後、平成 33 (2021) 年度から本格的に市場導入し、平成 35 (2023) 年度にはスタンダード化を目指す。一方、平成 32 (2020) 年度の住宅部品立上げと同時に、同じ部品を使用するリフォーム市場、集合住宅市場にも普及活動を実施する。

一方、事業化におけるリスクとしては、法規制等もあるが、部品であるため、最終消費者がこの効果を認知できない点があげられる。今回、部品を使用して住宅設備を製造するメーカーも参画しているため、ある程度の普及活動は実施できるが、製品販売からのバックアップには限界がある。そこで、CNF 産業活用に積極的な静岡県、岡山県が参画することで事業化・普及に向けた取り組みを強化する。これらの行政機関が普及活動を積極的に担うことで全国への波及を図っていく。さらに、本コンソーシアムには、農学系、工学系の両分野の学術機関が参画しており、講演会等での情報提供による普及活動も有効であるほか、学術機関は、企業活動からはニュートラルな立場にあるため、参画企業がカバーできない産業界への連携と普及活動が期待できる。

2. 業務成果報告

(1) 外皮部品における断熱性向上に関する技術開発

①外壁部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 外壁構成素材の試作

1) 高断熱セルローズ系断熱材

A 概要

量産 (実用化) に則した条件で、CNF 添加高断熱セルローズ系断熱材の量産試作を実施した。この量産試作品の熱伝導率は 0.037W/mK で、目標値 (0.038W/mK) を確保した。さらに経済性を確保できる仕様 (使用材料、配合、生産設備および生産能力) を確立した。以下には、その詳細を示す。

B 量産試作および量産試作品の評価

a 原材料

セルローズ系断熱材は木質繊維あるいは紙パルプ (解繊古紙を含む) などセルローズ系原料を主体に製造される断熱材の総称であり、ボード・マット状の成形製品と (壁内部や天井裏への) 吹き込み式の製品に大別される。吹き込み式の製品に CNF を添加した場合、施工現場でナノ繊維が飛散する可能性が否めず、安全性検証や施工方法の改良に時間を要するため、ボード・マット状の成形製品がより実用化に近いと考えられる。また、成形製品は一般的に湿式製法 (紙漉きの原理) が用いられているが、製造段階で CNF を添加するためには、最適な製造工程の検証や既存生産設備の改良などに時間を要するために、既製の製品へ CNF スラリーを塗布・含浸させる手法がより実用化に近いと考えられる。なお、これらのセルローズ系成形製品には表 1 に示す種類がある。

表 1 インシュレーションボードの種類と主な品質の規定

種類 (JIS A 5905, JIS A 9521より引用)		密度 g/cm ³	含水率 %	曲げ強さ N/mm ²	熱伝導率 W/(m・k)
タタミボード(T-IB)		0.27未満	5~13	1.0以上	0.056以下
A級インシュレーションボード(A-IB)		0.35未満		2.0以上	0.058以下
シージングボード(S-IB)		0.40未満		3.0以上	0.067以下
インシュレーション ファイバー断熱材	ファイバーマット	0.03以上		—	0.040以下
	ファイバーボード	0.15以上	0.5以上	0.052以下	

以上、速やかな実用化を想定した製品開発の観点から、ベースとなるセルローズ系断熱材として、図 1 に示す市販の国産カラマツを原料とした厚さ 40mm のインシュレーションファイバーマット (ウッドファイバーLD、(株)木の織

維、※以下「WF」と記載) を用いた。なお、製品の熱伝導率は0.04W/mK (公称値) である。

既製のCNFには様々な種類があり、原料や平均繊維径および長さ等が異なる。今回は、表2に示す市販のCNF3種を用いた。



図1 本調査に用いた市販WF (厚さ40mm、幅430mm、長さ1、240mm)

表2 本調査に用いた市販CNF

CNF種別 記号	製品名	型番	原料	平均繊維径 ^{※1} (nm)	比表面積 ^{※1} (m ² /g)	価格 ^{※2} 1kgあたり	メーカー
CNF-a	BiNF-i-s	WMA-10002	紙パルプ	10~50	120	約3,00円	(株)スギノマシン
CNF-b	CellFiM	C-100		30~200	150	約80円	モリマシナリー(株)
CNF-c		L-45	ヒノキチップ	50~300	90		

※1 メーカー公称値

※2 CNFの価格は購入数量、スラリー濃度により変動があるため、10kg購入時における1wt%スラリーのおよその価格として算出

b 量産試作

CNF添加WFは、WF上部からCNFスラリー (CNF希釈を水で希釈したもの) を散布浸透し、乾燥するだけの極めて簡単な工程により生産可能である。WFは軽量で、散布するCNFスラリーも水性であるため、量産装置は既存の汎用装置・部品を組み合わせる比較的安価に製造可能である。今回の量産試作に用いた装置を図2に示す。

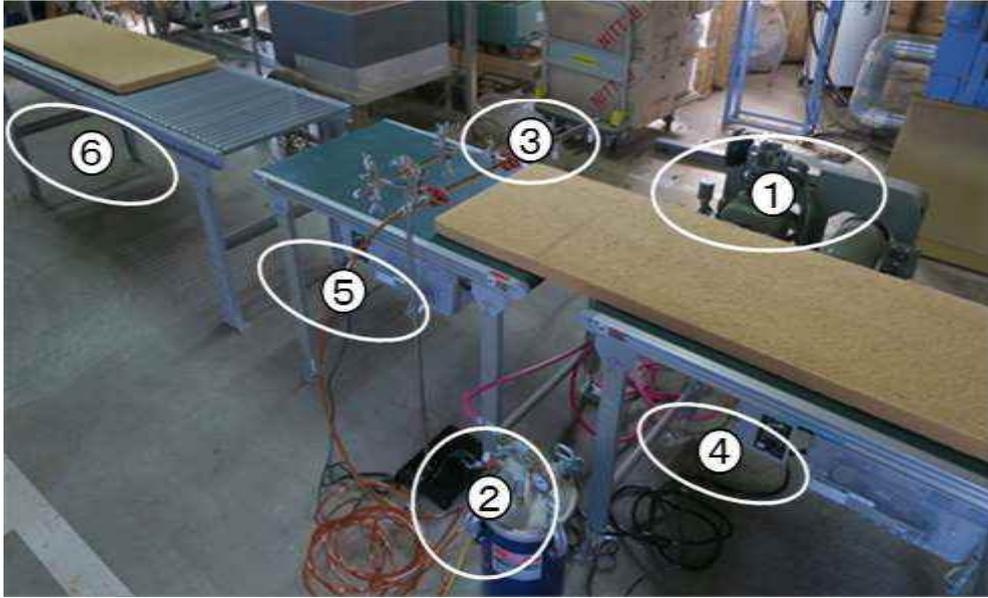


図2 CNF 添加 WF 量産試作装置

製造工程は、圧送タンク (②) に投入された CNF スラリーが、コンプレッサ (①) から供給される空気圧により、散布ノズル (③) へ輸送され、コンベア (④)、⑤) で移送される WF に塗布される。フリーローラー (⑥) 上に移送された WF を電気乾燥炉に投入し、低温乾燥 (60℃、24hr) することで、CNF 添加 WF を製造した。

コンベアのインバーター (送り速度) および圧送タンクの圧力調整により、CNF スラリーの塗布量を 6l/m^2 とし、量産試験を行った結果、図 1 に示す寸法の WF では 40 枚/hr の CNF 塗布が可能であった。付帯作業を含め、本装置を用いて 1 日 (稼働時間 7hr) で 180 枚程度の WF に CNF を添加可能と考えられる。なお、この枚数は都市部における平均的な住宅 (30 坪) の外皮に用いられる枚数に相当する。その後、24 時間の乾燥工程を経るため、一日あたりの生産能力は実験段階で 90 枚 (1 ライン) である。

c 量産品の性能評価

・熱伝導率

量産された WF の一部から、20cm 角の試験片を切り出し、測定機 (HC-074/200、英弘精機 (株)) を用いて JIS A 1412-Part2 (定状法-熱流計法) に準拠して熱伝導率を測定した。試験条件および工程を図 3 に示す。

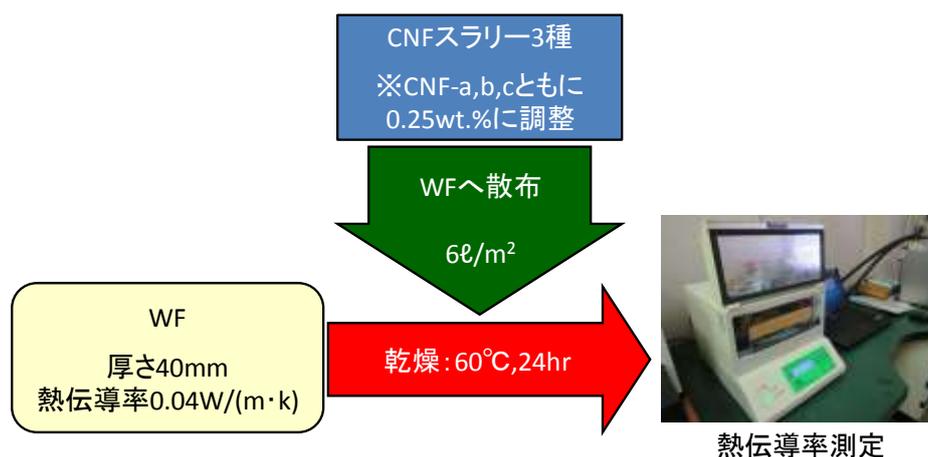


図3 CNF添加WFの性能評価

熱伝導率測定結果を表3に示す。なお、表中の数値は各種試験片9体の測定値を用いて算出した。いずれのCNFを用いた場合もすべての試験片が目標値0.038W/mKをクリアした。CNF種別による差が僅かに認められるものの、より安価なCNF-b、CNF-cを用いた場合でも、ほぼ同等の性能が得られたことから、原料コスト面においても実用性があると考えられる。

表3 量産したCNF添加WFの熱伝導率

CNF種別	熱伝導率			密度		
	(W/m·K)			(g/cm ³)		
記号	平均値	標準偏差	CV(%)	平均値	標準偏差	CV(%)
CNF-a	0.0369	0.0001	0.21	0.050	0.002	3.85
CNF-b	0.0372	0.0002	0.45	0.052	0.002	4.21
CNF-c	0.0372	0.0003	0.68	0.051	0.003	5.18

・機械的特性

本開発品が分類されるインシュレーションファイバー断熱材におけるファイバーマットの規格には、強度等の機械的特性が規定されておらず、実用上においても求められる強度はない。施工業者への聞き取り調査においては、CNF添加によりスポンジ状のマットがやや堅くなるため、壁体内に納める（間柱の間に嵌め込む）際の柔軟性がやや損なわれる短所が発生する反面、ファイバーマットのハンドリング時に生じやすい裂けや欠けが無くなる長所が生じるという意見が聞かれた。

・耐久特性

セルローズ系断熱材は、壁体内・小屋裏・床下等、直射日光や風雨に曝され

ない環境に用いられるが、このような環境下においては耐久性においても実績のある材料であり、CNF 添加 WF についても同等の耐久性が求められることから、昨年度に試作した CNF 添加 WF 試験片の物性について経時変化を追跡調査している。

試験片 (20cm×20cm) は 3 種類で、それぞれ繊維長の異なる CNF スラリー 0.25wt.% を 0.5l 添加したものである (BiNF-i-s 極短、標準、極長繊維を添加した WF をそれぞれ CNFS、CNFM、CNFL と表記)。製造後、室内で 5 ヶ月養生した後、北向き軒下倉庫で 10 ヶ月屋外養生 (図 4) した時点における各試験体の厚さ、密度、熱伝導率を表 4 に示す。

表 4 CNF 添加 WF の物性経時変化



試験体 (添加CNF)	0ヶ月経過 (製造時)	5ヶ月経過 (室内養生)	15ヶ月経過 (屋外養生)	5ヶ月経過 (室内養生)	15ヶ月経過 (屋外養生)
種別	厚さ(mm)			厚さ変化(%)	
CNFS	36.94	36.96	37.03	0.05	0.24
CNFM	37.37	37.2	37.41	-0.46	0.11
CNFL	36.33	36.51	36.54	0.49	0.57
種別	密度(g/cm ³)			密度変化(%)	
CNFS	0.055	0.055	0.055	0.36	0.18
CNFM	0.054	0.054	0.054	0.37	-0.37
CNFL	0.055	0.055	0.055	0.18	-0.36
種別	熱伝導率(W/m・K)			熱伝導率変化(%)	
CNFS	0.0378	0.0376	0.0379	-0.53	0.26
CNFM	0.0379	0.0381	0.0377	0.47	-0.58
CNFL	0.0379	0.0377	0.0376	-0.42	-0.69

図 4 WF の屋外養生風景

それぞれの CNF 添加 WF において、10 ヶ月の屋外養生を含む、15 ヶ月経過後の数値は製造直後とほぼ同等であった。すなわち、寸法変化と密度にほぼ変化が生じておらず、また熱伝導率の変化も極めて小さく、製造初期に確保された目標性能 (0.038W/mK 以下) を維持している。

実際には外気の湿度変動や紫外線に直接曝されない用途であることを考えると、本開発品は既存のセルローズ系断熱材同様、十分な耐久性を有していると考えられる。

C 経済性の評価

表 5 には、本量産試作をもとに施工費まで含め算出した開発品コストと既存品コストの比較表を示す。既存セルローズ断熱材に対し、住宅 1 戸当たり 6,229 円のコストアップとなる。これは、施工時に CNF 塗布工程が追加されたため

ある。しかしながら、後述するライフサイクルコストで評価すると使用者にてコスト回収できる。

表5 開発品と既存品のコスト比較

項目		使用量	単価	原価	備考	
開発品	変動費	セルローズ系断熱材	371.4 kg/戸	667 円/kg	247,724 円/戸	ウツボファイバー株式会社製ウツボファイバーLD-B(105mm)設計+面格×50%
		CNF	3.8 kg/戸	1,000 円/kg	3,750 円/戸	中期的CNF面格を想定
		計			251,474 円/戸	
	固定費	現場施工のため発生せず				
施工費	職人人件費	5.0 日/戸	10,000 円/人/日	50,000 円/戸	CNF塗布工程を含む	
	計			301,474 円/戸		
既存品	セルローズ系断熱材市販品	375.2 kg/戸	667 円/kg	250,245 円/戸	ウツボファイバー株式会社製ウツボファイバーLD-B(105mm)設計+面格×50%	
	施工費	職人人件費	4.5 日/戸	10,000 円/人/日	45,000 円/戸	
	計			295,245 円/戸		
コスト比較(開発品-既存品)				6,229 円/戸		

2) 高断熱木質ボード

A 概要

量産 (実用化) に則した条件で、CNF 添加高断熱木質ボードの量産試作を実施した。この量産試作品の熱伝導率は、0.049W/mK で、目標値 (0.120W/mK 以下) を確保した。さらに、経済性を確保できる仕様 (使用材料、配合、生産設備および生産能力) を確立した。以下には、その詳細を示す。

B 量産試作および量産試作品の評価

a 原材料

実用化を想定し、市販されている CNF (BiNF-i-s、WFO-10010、スギノマシン) を用いた。また、木質ボード (インシュレーションボード) 用繊維として、構造用木質ボード (MDF) に使用されている針葉樹繊維 (ラジアータパイン、大建工業株式会社) を使用した。

b 量産試作

図 5 に CNF 添加ファイバーボード作製の工程図を示す。目標ボード密度を 0.07、0.10、0.20、0.30g/cm³ の 4 条件、CNF 添加率を 0、5、10、15% の 4 条件で計 16 条件のボードを作製した (表 6)。ボード寸法は 300mm×300mm×10mm とした。目標ボード密度に必要な繊維量を測り取り、表 6 に示す CNF 添加率 (= CNF 固形分/気乾繊維重量) 分の CNF を加え、繊維量に対して濃度が 1.5% となるように水を加えた。攪拌機を用いて、回転数 750rpm で 10 分間攪拌した。成形木枠底面に、上からテフロンシート、目開き 100 メッシュの金網 30 枚を敷き詰めた。フォーミングボックスに懸濁液を流し込み、懸濁液内の繊維が安定したら、テフロンシートを引き抜き、脱水してマットを抄造した。抄造後のマット両脇に厚さ制御用の 10mm 鉄製棒を設置し、0.6MPa で 1 分間、合板製造用の冷圧プレスを用いて冷圧を行った。冷圧後のマットを鉄製棒を入れたまま万力で厚さを固定し、乾燥機で 105°C、24 時間の乾燥を行った。乾燥後のボードは 20°C、65%RH 下で 1 週間以上養生した。図 6 に完成したボードの図を示す。なお、ボード製造において、すべて汎用的な設備、装置で行った。

その後、性能評価として、曲げ試験、吸水試験、吸湿試験、熱伝導率の測定、ボード表面の SEM 観察を行った。これらの試験についても、すべて汎用設備で実施可能な項目である。

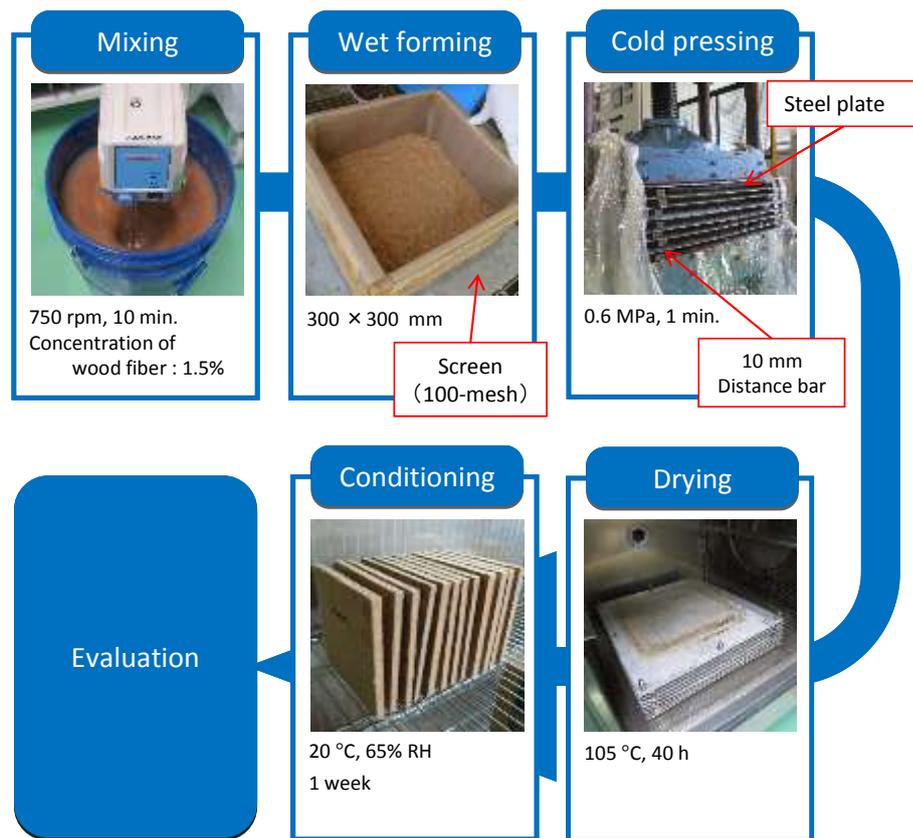


図 5 CNF 添加ファイバーボード作製の工程図

表 6 ボード作製条件

No.	Target density g/cm ³	CNF addition ratio %
1		0
2	0.1	5
3		10
4		15
5		0
6	0.2	5
7		10
8		15
9		0
10	0.3	5
11		10
12		15



図 6 CNF 添加ファイバーボード

乾燥機の性能 (容量) が生産性を高める鍵となるが、本試作において使用した乾燥機では 300mm×300mm のボードが 1 日あたり 10 枚できたが、大型の汎用乾燥機を導入することで生産性は 6 倍に向上できることを確認した。

c 量産品の性能評価

・熱伝導率

ここで一般的な断熱材内の伝熱要素について説明する。断熱材における熱の移動は (1) 固体伝導伝熱、(2) 気体伝導伝熱、(3) 対流伝熱、(4) 輻射伝熱 (放射伝熱) の4つの要素と考えられている。ちなみに (3) の対流伝熱は、断熱材の空隙サイズが 2-3mm 以下になるとゼロに近くなると言われている。残りの3つの断熱要素に関しては、(1) 固体伝導伝熱は応力伝達と伝達経路が同じ固体であるため、接合点を増やし機械的強度を高くすると熱が伝わりやすくなる。また (2) 気体伝導伝熱に関しては、0°C、1 気圧のもとで静止気体 (窒素) の気体伝導伝熱は 0.026 W/mK であり、この値が多く of 固体の伝導伝熱よりも著しく小さいため、一般的には気体を多く含んだ断熱材の方が断熱性が高くなると言われている。この気体伝導伝熱を更に低下させるためには、断熱材内の空隙サイズを空気の平均自由行程 (原子が衝突の間に走る平均距離) 以下にすることが必要である。(4) 輻射伝熱に関しては、赤外領域の光を反射する、もしくはは吸収して再輻射を防ぐために熱に変換する層を高温境界側に設けることが有効であると言われている。

以上を踏まえ、図7に作製したボードの熱伝導率と CNF 添加率との関係を示す。いずれのボードにおいても目標値 (0.120W/mK 以下) を達成している。またこの図から、密度が増加するほど、気相が減少し、固体伝導による伝熱が増加するため、熱伝導率は増加することが分かる。これは多くの断熱材に見られる現象である。また後述するが、CNF 添加によりボード密度が増加したため、CNF 添加によって熱伝導率が増加した。

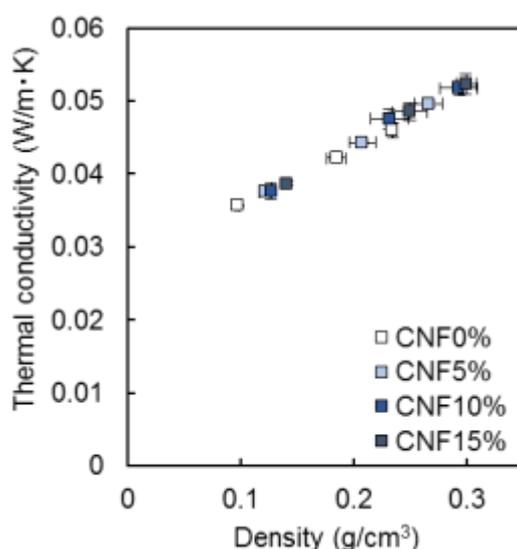


図7 ボードの熱伝導率と CNF 添加率との関係

・機械的特性

表 7 にボードの密度測定結果を示す。ボード密度は、どの目標密度の条件においても、CNF 添加率が 0 から 15% に上昇するに従い、実際のボード密度が 0.03 ~0.05 g/cm³ ほど増加した。これはボード厚さが 2mm 程度低下したことによるものである。CNF を添加することでボード厚さが低下し理由として、CNF によってより多くの水が保持されたことや乾燥時の水の表面張力による圧縮力が増加したことが考えられる。

表 7 ボードの密度

CNF addition ratio %	Board density	
	Target	Actual
	g/cm ³	
0	0.07	0.08±0.01
5		0.09±0.01
10		0.10±0.00
15		0.11±0.01
0	0.10	0.10±0.00
5		0.11±0.00
10		0.12±0.00
15		0.14±0.00
0	0.20	0.18±0.00
5		0.20±0.00
10		0.21±0.00
15		0.23±0.01
0	0.30	0.25±0.02
5		0.26±0.01
10		0.28±0.01
15		0.29±0.01

図 8 に層密度分布測定結果を示す。いずれの条件においても、CNF 添加率が増加するほど厚さが低下し、密度が増加することがこの結果からも言える。

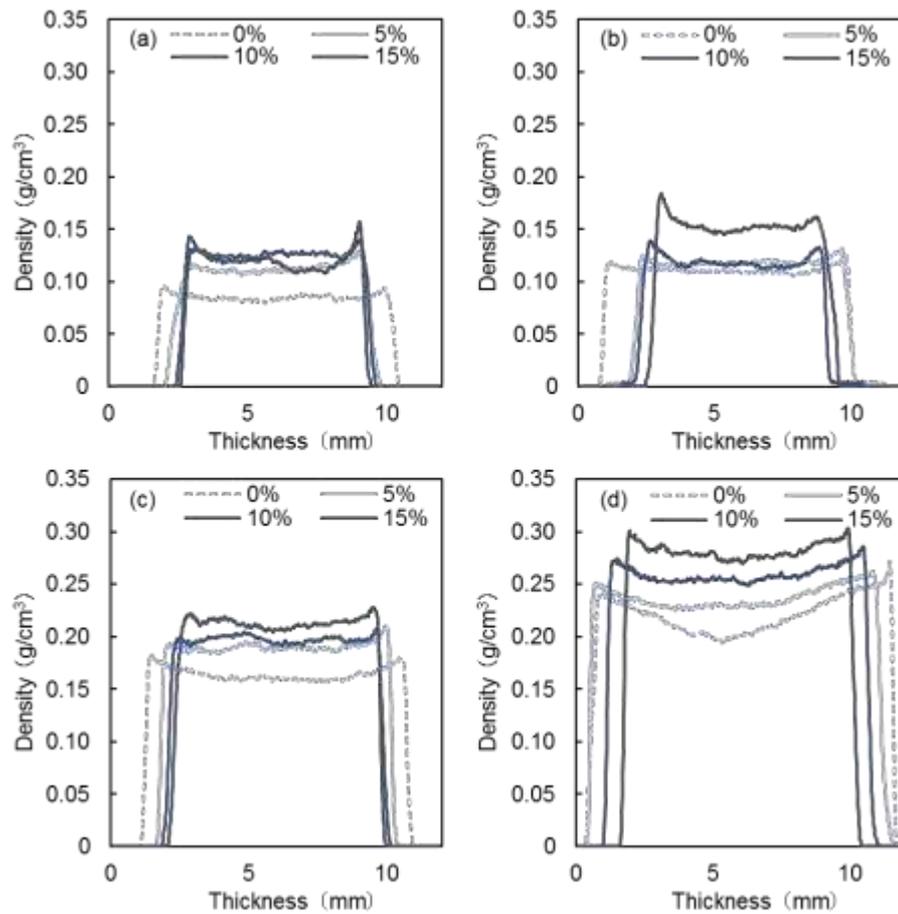


図8 ボードの層密度分布
 目標密度(a)0.07 (b)0.10 (c)0.20 (d)0.30 g/cm³

図9にCNF添加率ごとのボード表面のSEM観察結果を示す。CNF添加率が0%では、木材繊維の表面はなめらかで木材繊維間に多くの空隙が確認できるが、添加率5%では木材繊維にCNFが付着し始め、10%や15%ではCNFが木材繊維間を埋めるように凝集膜を形成している様子が観察された。

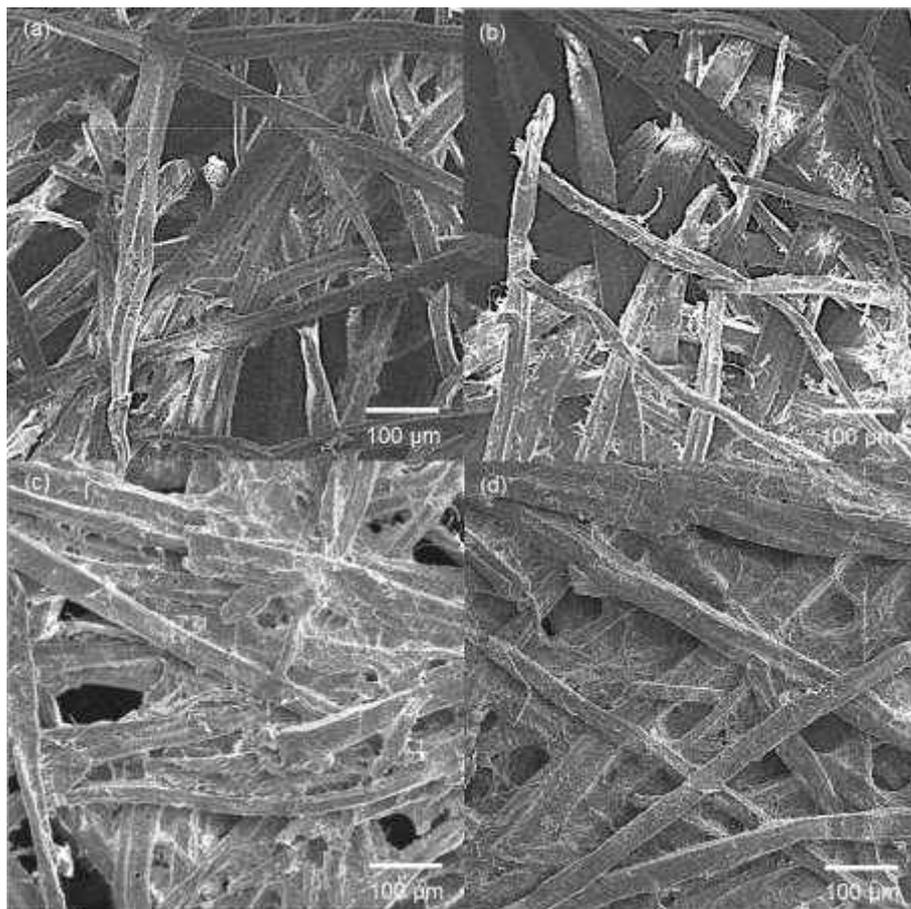


図9 ボード表面のSEM画像
CNF添加率：(a) 0%、(b) 5%、(c) 10%、(d) 15%

図10に、より高倍率でのボード表面の観察結果(密度 0.3 g/cm^3 、CNF添加率5%)を示す。この図から、木材繊維表面にCNFが付着している様子が観察された。木材繊維とCNFを付着させる要因は水素結合である。特にCNFはナノオーダーまで解繊されていることで大量の水酸基が露出しているため、CNF懸濁液を通常の熱乾燥で乾燥した場合、CNF同士が多量の水素結合をすることで、凝集体を形成する。

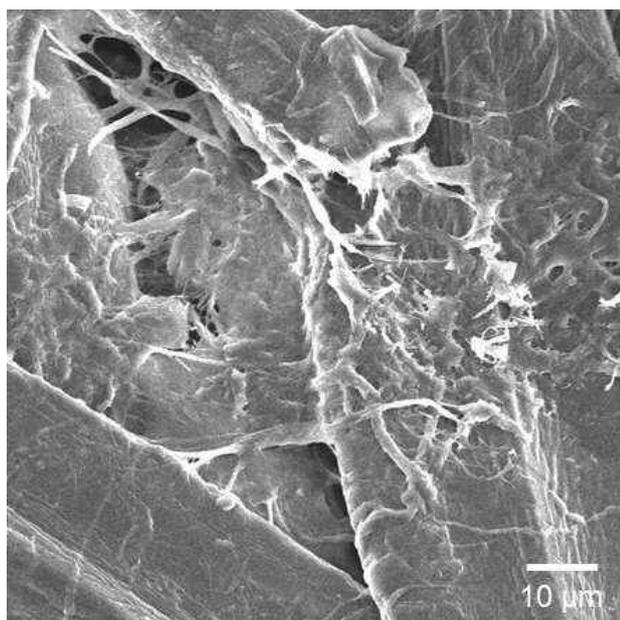


図 10 ボード表面を拡大した SEM 画像

図 11 に曲げ性能について示す。どの目標密度のボードにおいても、CNF 添加率が上昇するほど MOR および MOE は向上し、CNF 添加率が 0% から 15% に上昇すると、MOR と MOE が 3 倍以上増加した。最も高い値は CNF 添加率 15% の時に 6.0MPa であった。CNF 添加率 0% のボードにおいては、木材繊維間に形成される水素結合の量が少ないと考えられるが、CNF を添加することで、木材繊維間に CNF を介した水素結合が多数形成され、木材繊維同士の結合を改善したと考えられる。

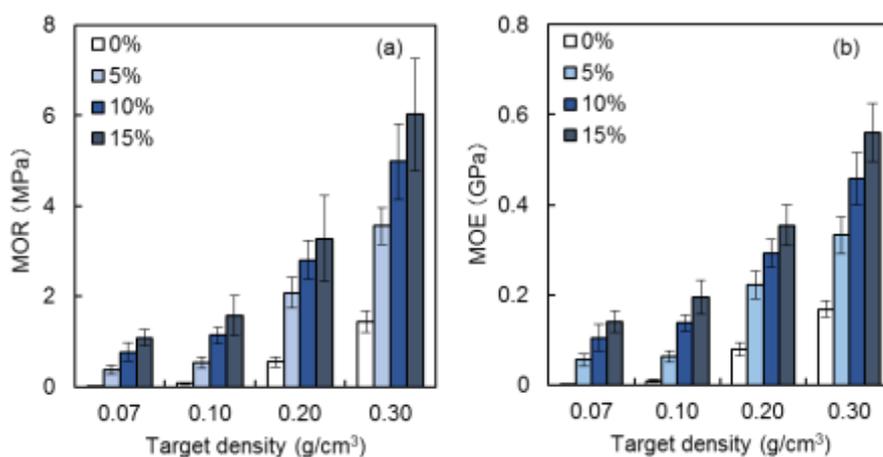


図 11 ボードの曲げ性能 (a) MOR、(b) MOE

図 12 に曲げ性能 (MOR) と熱伝導率との関係を示す。この図より MOR が同じ値の時、CNF を添加した方が、CNF 未添加に比べ、熱伝導率が低いため、CNF を添加することで強度と断熱性能の高いファイバーボードを作製可能であるといえる。一般的には、断熱材の接合点を増やし機械的強度を高くすると、固体伝導伝熱が高くなると考えられるが、本実験では、CNF 添加によって曲げ性能は著しく向上したにも関わらず、熱伝導率は大きく増加しなかった。

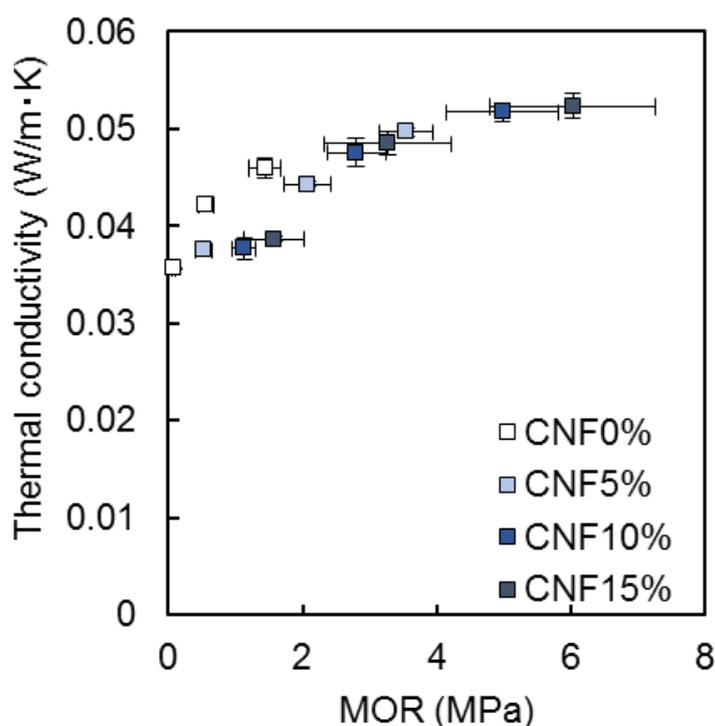


図 12 MOR と熱伝導率の関係

・耐久特性

図 13 にボード密度と吸水率 (WC) の関係について示す。吸水率とは、20°C の水中に 24 時間浸漬した後の重量変化率のことである。図 13 (a) は各試験体の WC、図 13 (b) 図は試験体密度と WC の関係を示す。図 13 (a) より、WC は CNF 添加率が増加するほど低下することが分かる。しかし図 13 (b) より、試験体密度が増加すると WC が低下することが分かる。これは密度の増加とともに、試験体内の空隙量が減少し、空隙に保持される水分量が低下したことが考えられる。これより、CNF 添加による WC の低下は CNF 添加による密度の増加が影響していることが示唆された。

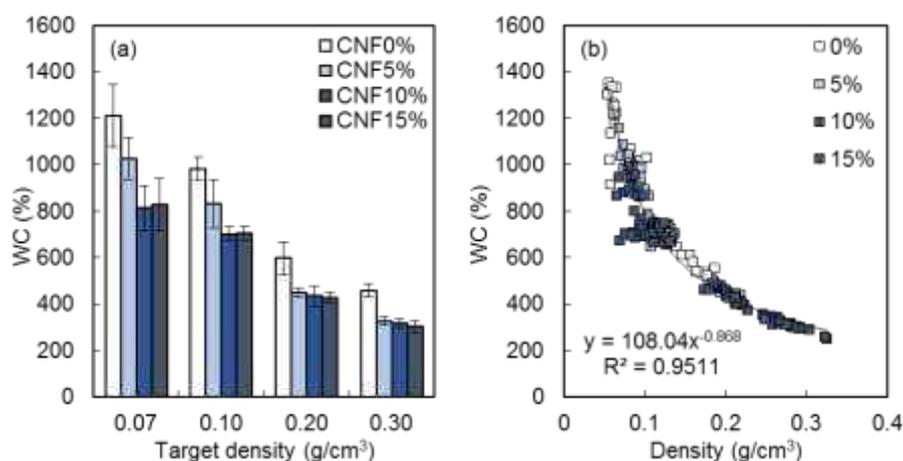


図 13 ボード密度と吸水率 (WC) との関係
(a) 目標密度との関係 (b) 実測密度との関係

以上の結果を踏まえ、テストハウスへの施工用量産試作品の製造条件は、密度 0.20g/cm^3 、CNF 添加率 15% と設定した。この場合の熱伝導率は前述したとおり、 0.049W/mK を確保しており目標値をクリアしている。

C 経済性の評価

表 8 には、本量産試作をもとに施工費まで含め算出した開発品コストと既存品コストの比較表を示す。既存の合板に対し、住宅 1 戸当たり 18,717 円のコストアップとなる。これは、本開発品では、新規設備導入によるコストを算出しているためであり、実際には、既設のインシュレーションボードラインを活用することで、コスト差は、半分以下となる。ただし、コストアップはするものの、後述するライフサイクルコストで評価すると使用者にてコスト回収できる。

表 8 開発品と既存品のコスト比較

項目		使用量	単価	原価	備考	
開発品	変動費	木繊維	112.6 kg/戸	140 円/kg	15,738 円/戸	市販木繊維相場より
		CNF	12.5 kg/戸	1,000 円/kg	12,506 円/戸	中期的CNF価格を想定
		副資材	125.1 kg/戸	10 円/kg	1,251 円/戸	梱包資材等
		電力	237.7 kW/戸	16 円/kwh	3,803 円/戸	使用電力=1.9kW/kg
		計			33,317 円/戸	
	固定費	償却費	125.1 kg/戸	87 円/kg	10,880 円/戸	投資額(攪拌機、プレス、乾燥器他=500百万円)
		人件費	125.1 kg/戸	25 円/kg	3,127 円/戸	3名×800万円/名
		管理費等	125.1 kg/戸	30 円/kg	3,752 円/戸	
		計			17,739 円/戸	生産量3000kg/日
	製造原価				51,076 円/戸	変動費+固定費
	販管費				7,661 円/戸	製造原価×15%
	施工費		3.5 日/戸	10,000 円/人/日	35,000 円/戸	軽量化による施工効率改善
職人人件費				35,000 円/戸		
計				93,737 円/戸		
既存品	合板		350.2 kg/戸	100 円/kg	35,020 円/戸	ウッドフラインバー(株式会社ウッドフラインバーLD-B(105mm)設計)価格×50%
	施工費		4.0 日/戸	10,000 円/人/日	40,000 円/戸	
	計				75,020 円/戸	
コスト比較(開発品-既存品)				18,717 円/戸		

3) 高断熱無機ボード

A 概要

量産 (実用化) に則した条件で、CNF 添加高断熱無機ボードの量産試作を実施した。この量産試作品の熱伝導率は、 0.176W/mK で、目標値 (0.200W/mK 以下) を確保した。さらに、経済性を確保できる仕様 (使用材料、配合、生産設備および生産能力) を確立した。以下には、その詳細を示す。

B 量産試作および量産試作品の評価

a 原材料

まず、高断熱無機ボードの作製法の概略を記す。高断熱無機ボードは無焼成固化法を利用し作製される。無焼成固化法は、原料粉体を摩砕し原料粉体表面の化学的活性を向上させ、これをアルカリ溶液と混合し原料粉体の表面を部分溶解再析出させることで固体を得る方法である。得られた固体を以下マトリックスと呼ぶ。高断熱無機ボード作製においては、先のマトリックス (シリカ固化体) を作製する際に造孔材となる炭酸カルシウムを所定量混合した後固化する。続いて酸処理によって炭酸カルシウムを溶出除去することで、多孔体を得る。ただし、一般に気孔率と材料強度はトレードオフの関係があるので、CNF で繊維強化をする。

高断熱無機ボードのマトリックス部分作製の原料は汎用フィラー用非晶質シリカ (アドマテックス製、SO-C1、一次粒子径 200nm) と窯業原料として用いられる石英粉 (F-Plan 製、KS-100S、粒子径 $160\mu\text{m}$) を用いた。用いた非晶質シリカと石英粉の粒度分布 (レーザー回折・散乱式粒度分布測定装置: Microtrac MT3200 II、マイクロトラック・ベル株式会社製) を図 14 に、電界放出型走査 SEM (FE-SEM: JSM-7600F、日本電子株式会社製) による観察結果を図 15 (左: 非晶質シリカ、右: 石英粉) に示す。

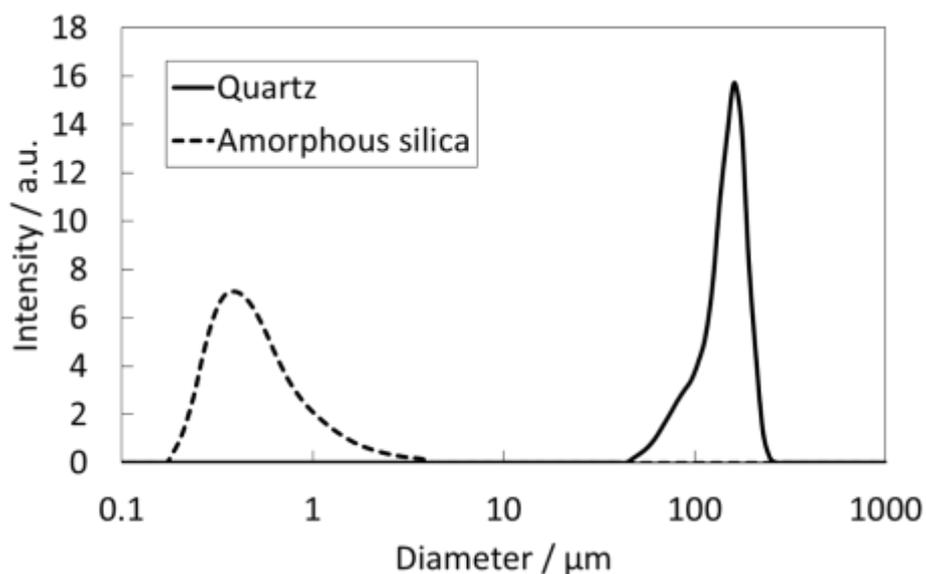
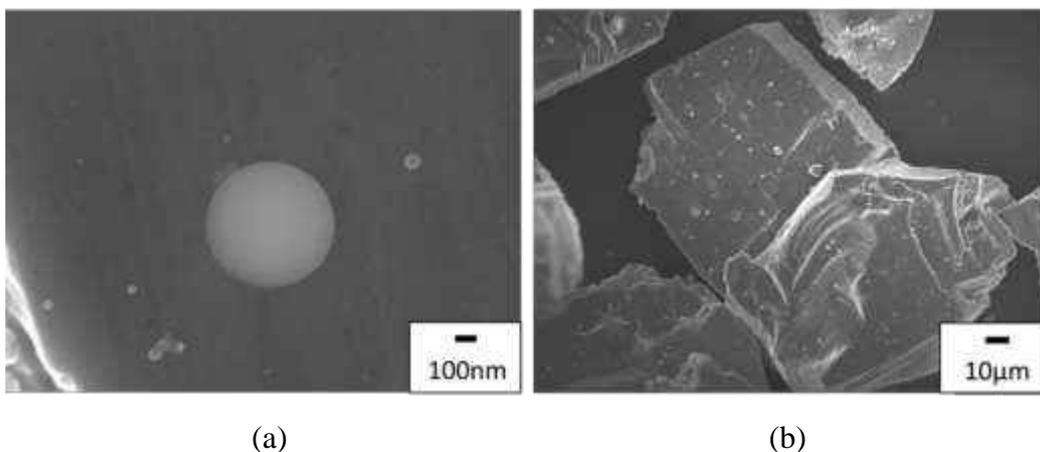


図 14 シリカ原料の粒度分布



(a) (b)
図 15 FE-SEM 像 (a) 非晶質シリカ (b) 石英粉

反応溶液として水酸化カリウム水溶液（富士フィルム和光純薬製）を用いた。造孔材には天然石灰石を粉砕した重質炭酸カルシウム（上田石灰製造製）を用いた。細孔径制御の為に、炭酸カルシウムは振動篩を用いて 100～212 μm にふるい分けし用いた。図 16 にふるい分け前後の炭酸カルシウムの粒度分布を示した。炭酸カルシウム粒子のふるい分け前の平均粒子径は 15 μm であり幅広い粒子径を有している。ふるい分け後の平均粒子径は 140 μm であることが確認された。また、図 17 にふるい分け前後の炭酸カルシウムの光学顕微鏡写真を示した。これらの図より、ふるい分け前後の炭酸カルシウムは不定形であることが確認された。また、ふるい分けにより 140 μm 前後の均一な粒子が得られた。図 18 に炭酸カルシウムの SEM 写真を示した。高倍像より 140 μm 前後の粗大な粒子の表面

には $1\mu\text{m}$ 程度の炭酸カルシウム微粒子が付着していることが確認された。

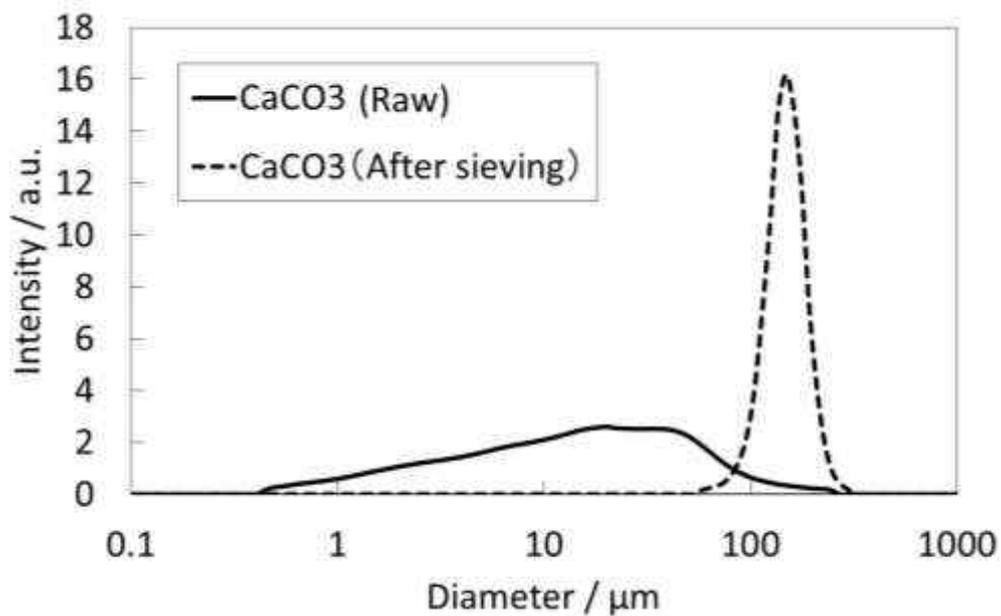


図 16 ふるい分け前後の炭酸カルシウムの粒度分布

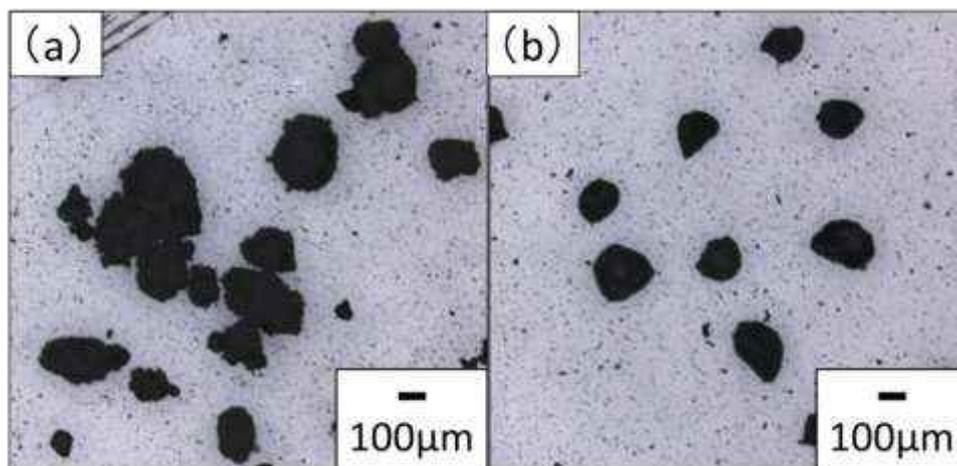


図 17 炭酸カルシウムの光学顕微鏡写真
(a) ふるい分け前 (b) ふるい分け後

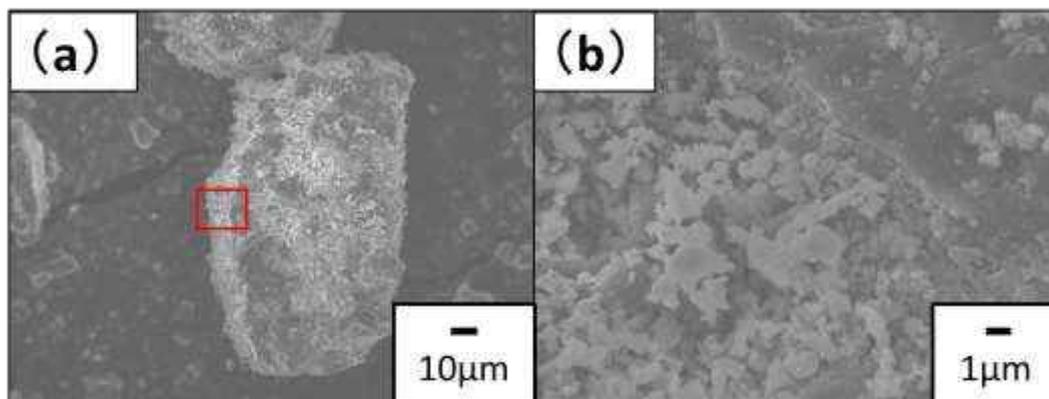


図 18 炭酸カルシウムの SEM 写真 (b) は (a) の四角部分の拡大

ここまでの原料シリカ、炭酸カルシウムはクラーク数の観点から言って地表面の存在比は高い。また、両材料とも国内で豊富に産する原料であり、各種業界で増量剤として用いられる安価な材料である。

反応溶液としてのアルカリは、水酸化カリウム水溶液（富士フィルム和光純薬製）を用いた。水酸化カリウムは汎用無機試薬として国内流通量も多く、化学薬品の中でも安価な試薬の一つである。

強化繊維として製造法の異なる2種類のセルロースナノファイバー（CNF）を用いた。1つ目はTEMPO酸化法により作製されたCNF（レオクリスタ、第一工業製薬製）であり（以下TEMPO CNFと略）、CNF非晶領域の一級水酸基に高密度にカルボキシル基を導入することで静電反発力により高分散化を実現している。2つ目はパルプ化した原料を水に分散させ加圧・噴出しするウォータージェット製法により作製されたCNF（BiNFi-s、WMo10002、BMa10002、Ima10002、スギノマシン製）である（以下、BiNFi-sと略）。図19にウォータージェット製法を用いて製造された繊維長の異なる3種類のCNF（BiNFi-s、WMo10002：繊維長中、BMa10002：長繊維長、Ima10002：極長繊維長、スギノマシン製、各々固形分2wt%）の光学顕微鏡写真を示した。

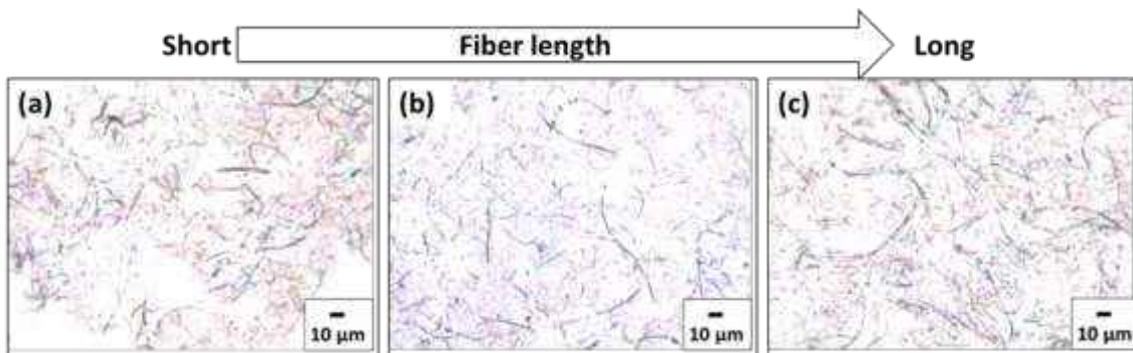


図 19 ウォータージェット製法を用いて製造された繊維長の異なる 3 種類の CNF の光学顕微鏡写真

(a) 中繊維長 (b) 長繊維長 (c) 極長繊維長

また図 20 に CNF (WMo10002 : 中繊維長、スギノマシン製) の SEM 写真を示した。繊維径は約 30nm であることが確認された。

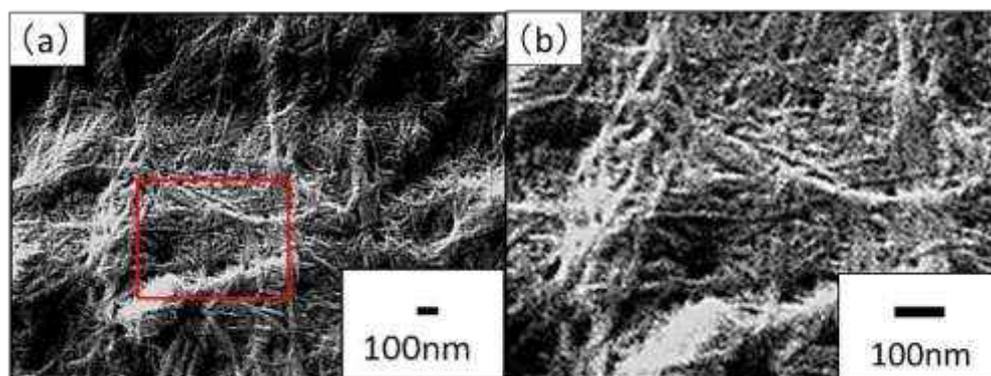


図 20 CNF (WMo10002 : 繊維長 中、スギノマシン製) の SEM 写真(b) は (a) の四角部分の拡大

また、図 21 に TEMPO 酸化法を用いて製造された CNF の TEM 画像を示した。繊維径は約 3nm であることが確認された。

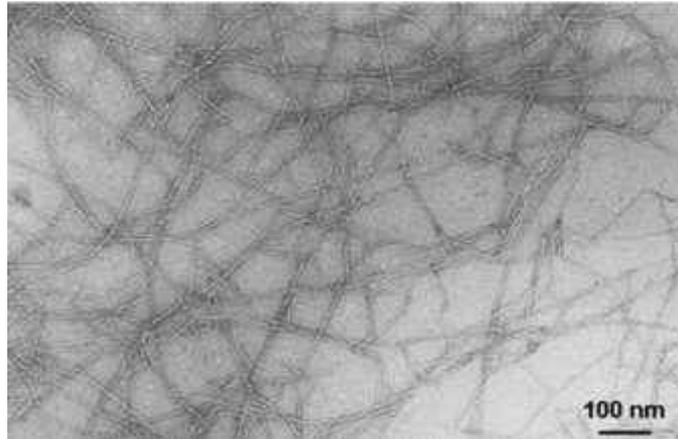


図 21 TEMPO 酸化法を用いて製造された CNF (第一工業製薬カタログより)

b 量産試作

CNF 添加高断熱無機ボードの生産方法を図 22 に示す。7 工程から構成されている。

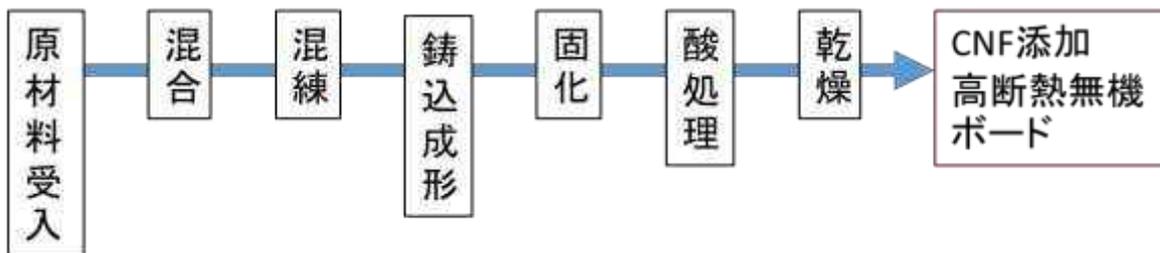


図 22 CNF 添加高断熱無機ボードの生産方法

以下、各生産工程毎に概要を説明する。

・原材料受入

前述した原材料である、非晶質シリカ、石英粉、炭酸カルシウム、CNF を用いた。強度及び熱伝導率の性能試験の為に様々な比率で調整したが、両性能から最終的に量産では、アモルファスシリカ 32.6 wt%、石英粉 41.2 wt%、炭酸カルシウム 21.1 wt%、CNF1.0 wt% (固形分換算) を用いることとした。

・混合

窯業業界で最もメジャーな方法である転動ミルを用いた。第一ステップは混合メディアであるジルコニアボールをポットに導入してシリカと石英粉のみ 3 時間混合した。第二ステップとしてボールを取り除き炭酸カルシウムを加えて 3 時間混合した。非晶質シリカと石英粉を転動ボールミルを用いて混合する際に、同時にメカノケミカル (MC) 処理を施すことが無焼成固化を実現するキーテク

ノロジーである。卓上ボールミルで操作条件を決定した条件を表 9 に示す。量産化は大型ミルを用いた。卓上で定めた条件と内表面での周速が同一となるように操作した。卓上ミルと大型ミルを図 23 に示す。

表 9 最適ミル条件

Rotation speed	150rpm
Pocessing time	12h
Milling pot	Polyethylene,1000ml
Milling ball	Zirconia,φ5mm
Powder weight	655g



図 23 卓上ミル架台とポット、工業用大型ミル

・混練

混合工程で得た混合粉体と CNF 水分散体を混練機を用いて 3 分間混練した。スラリー中の水分が混合粉体に対して 25wt.%の割合になるようにした。次にス

ラリー中に顆粒状の水酸化カリウム（固形分 85%）を三回に分けて加えさらに 3 分間混練した。この操作によりスラリー中の水酸化カリウム濃度は 3 mol/L になるように調整した。これらに用いた量産化に用いた混練機を図 24 に示す。

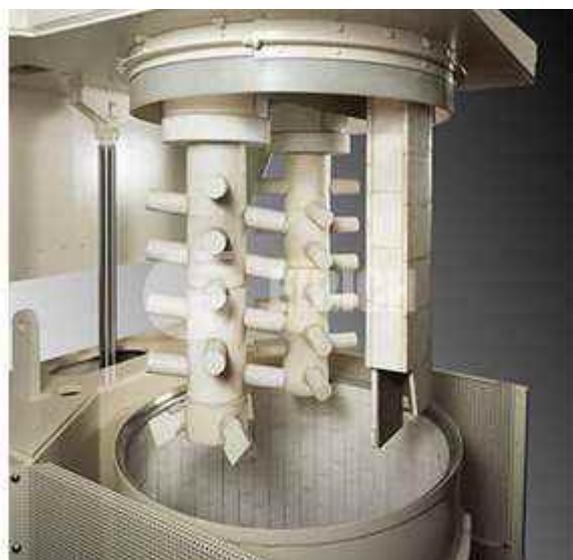


図 24 量産化に用いた混合機

・ 鑄込成形

混練物を図 24 の下部から流出させ、金属型（横 200mm×縦 50mm×厚 10mm）に鑄込んだ。ちなみに、今回の量産試作で使用した型は汎用のタイル型を転用した。一バッチの成形で 100 型を準備した。型への充填時間は一枚およそ 30 秒であった。したがって、100 型の鑄込に 50 分要した。脱泡をスムーズに行う為に図 25 に示すコンクリート鑄込み用のチューブ型振動機（日立工機製、UV28M、消費電力 380W）を補助的に用いた。鑄込後約 10 秒加振した。



図 25 チューブ型振動機

・ 固化

鑄込んだスラリーは蓋をして 60℃にて 1 時間加熱し、固化反応を促進した。固化条件を決定する際には箱型電気炉を用いたが、最終的には量産を見据えて

タイル生産などに使われるメッシュベルトで連続搬送される乾燥炉（図 26）を用いて生産した。加熱条件は箱型で決定した条件を用いた。



図 26 養生用に用いた連続乾燥炉の外観

・酸処理

固化体中の炭酸カルシウムを塩酸（1M）で溶出させ多孔体とする工程である。具体的には前で固化した 100 枚の固化体を 20L の塩酸に 4 時間浸漬した。

図 27 にシリカ/炭酸カルシウム無焼成固化体（石英粉:非晶質シリカ=7：3）中における酸処理時間と炭酸カルシウムの溶解率の関係を示す。

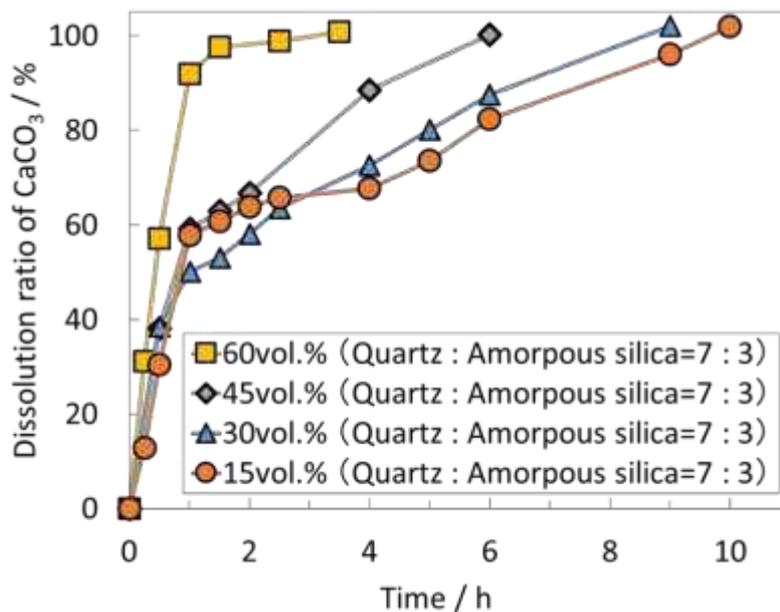


図 27 浸漬時間と炭酸カルシウムの溶解率

炭酸カルシウムの添加率が 15、30、45、60vol.%と増加するにしたがって酸処理時間は 10、9、6、2.5 時間と酸処理時間が短縮した。シリカ/炭酸カルシウム無焼成固化体中の炭酸カルシウム粒子が増加することで互いにパスを形成し、それらが連続で溶解することで酸処理時間の短縮につながったと考えられる。炭酸カルシウムのパーコレーションが溶出率を決定している。研究開発では高気孔率が高断熱をもらさないので、短時間で処理が完了することがわかる。本生産する場合には酸処理時に発生する二酸化炭素は、溶解残液である塩化カルシウム溶液に再流通することで、テンプレートとなる炭酸カルシウムを再度容易に得られる。これは通常の合成炭酸カルシウムの工程である。したがって、発生する二酸化炭素や残液の処理や環境負荷はほぼないといえる。

図 28 に酸処理時間が 5 分、15 分、30 分、60 分におけるシリカ/炭酸カルシウム無焼成固化体 (石英粉:非晶質シリカ=7 : 3、炭酸カルシウム添加率 60vol.%) の 3D 化した X-ray CT 画像および二値化処理後の画像を示した。酸処理前のシリカ/炭酸カルシウム無焼成固化体の炭酸カルシウムは比較的均一に分布している様子が確認できる。酸処理時間が 30 分では表面から炭酸カルシウムが溶解し、1 時間を経過したあたりで固化体内部の炭酸カルシウムがほぼ溶解していく様子が確認できる。したがって 1 時間以上浸漬することでも目的の多孔構造が得られることが分かった。

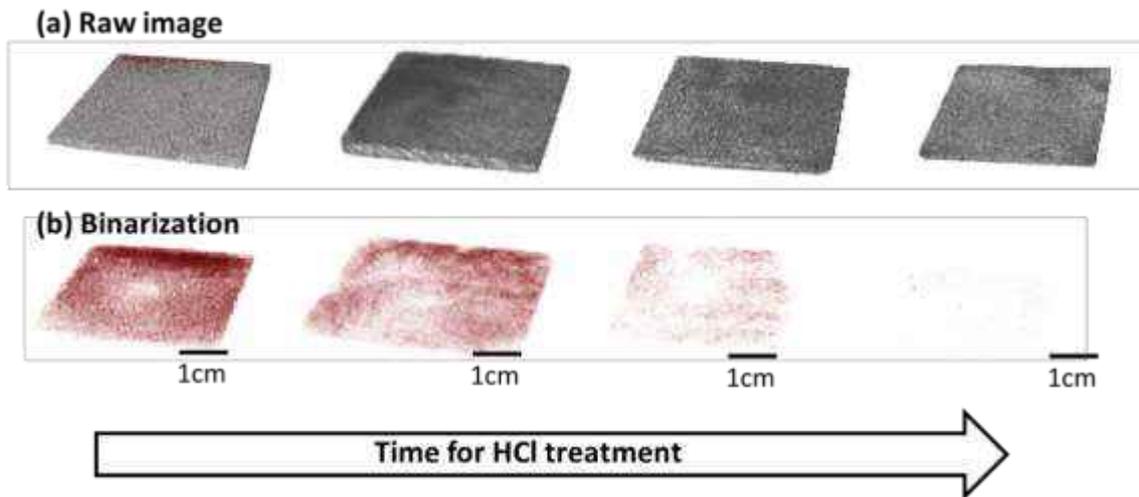


図 28 X-ray CT 観察による酸処理の様子
 (上：CT 画像、下：二値化像；赤が炭カル)
 左から酸処理時間が 5 分、15 分、30 分、60 分。

・乾燥

配合と性能の研究を行う際には、ボックス炉を用いて 120°C で 6 時間乾燥させていた。量産化の検討では図 26 の装置で時間短縮の為に、同じく 120°C、6 時間で乾燥を行った。その後の検討で、風通しの良い棚で自然乾燥させることでほぼ同等の強度熱伝導率を得られることが分かった。通常のタイル工場は通常広大なストックヤードがあるので、実生産ではこの乾燥工程は不要である。図 29 に乾燥後、つまり目的物である CNF 添加高断熱無機ボードの外観図を示す。



図 29 CNF 添加高断熱無機ボードの外観図

今回の量産試作では、通常の焼成タイル工場を用いて作製した。専用ラインではないので、各工程はマニュアルで調整したため、実証用に必要な 9 m^2 (900枚) 程度の生産量だった為、連続生産量について直接検証はできていない。しかしながら、汎用の焼成タイルの設備がほぼ流用できることが確認できた。この設備で連続生産することになれば、最低 $800\text{ m}^2/\text{日}$ の生産が可能であるので、本 CNF 添加高断熱無機ボードも同程度の生産が可能と考えられる。一般的なタイル工場では同様の設備が 10~20 直で稼働するのが通常である。したがって、 $8000\text{ m}^2/\text{日}$ の生産が可能といえる。これは通常の窯業材料および建材の生産に比しても少ない量ではない。

c 量産品の性能評価

・熱伝導率

図 30 に CNF 添加高断熱無機ボードの熱伝導率測定結果を示した。

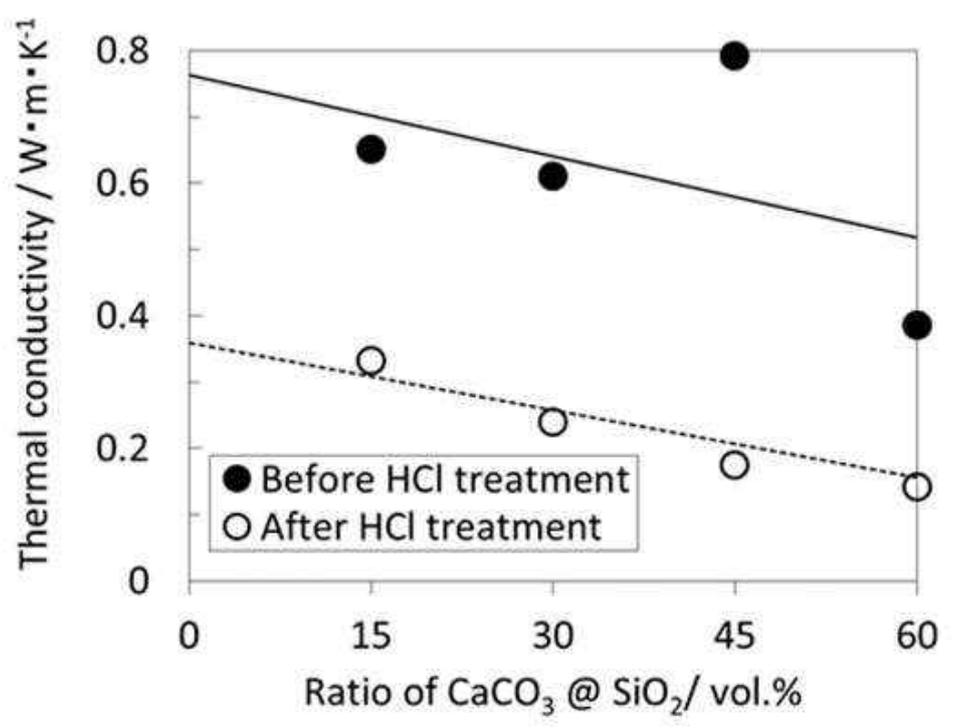


図 30 CNF 添加高断熱無機ボードの熱伝導率測定結果

●は炭酸カルシウムを酸処理により除去する前の熱伝導率である。○は除去後、すなわち成果物である CNF 添加高断熱無機ボードの熱伝導率である。炭酸カルシウム 45vol.% 及び 60vol.% を除去した CNF 添加高断熱無機ボードは、それぞれ

0.176 W/mK、0.142 W/mK とであり、プロジェクト目標である 0.2 W/mK を大きく下回る熱伝導率を示した。つまり、目標以上の高断熱材が得られたことになる。

・機械的特性

まずは CNF による補強効果を確認するため、炭酸カルシウムによる多孔化の工程経ずに CNF 混合シリカの無焼固化体 (以下: シリカ/CNF 無焼成固化体と記す) を作製したサンプルを用いて三点曲げ強度試験を行った。図 31 にシリカ/CNF 無焼成固化体の三点曲げ強度試験結果を示す。

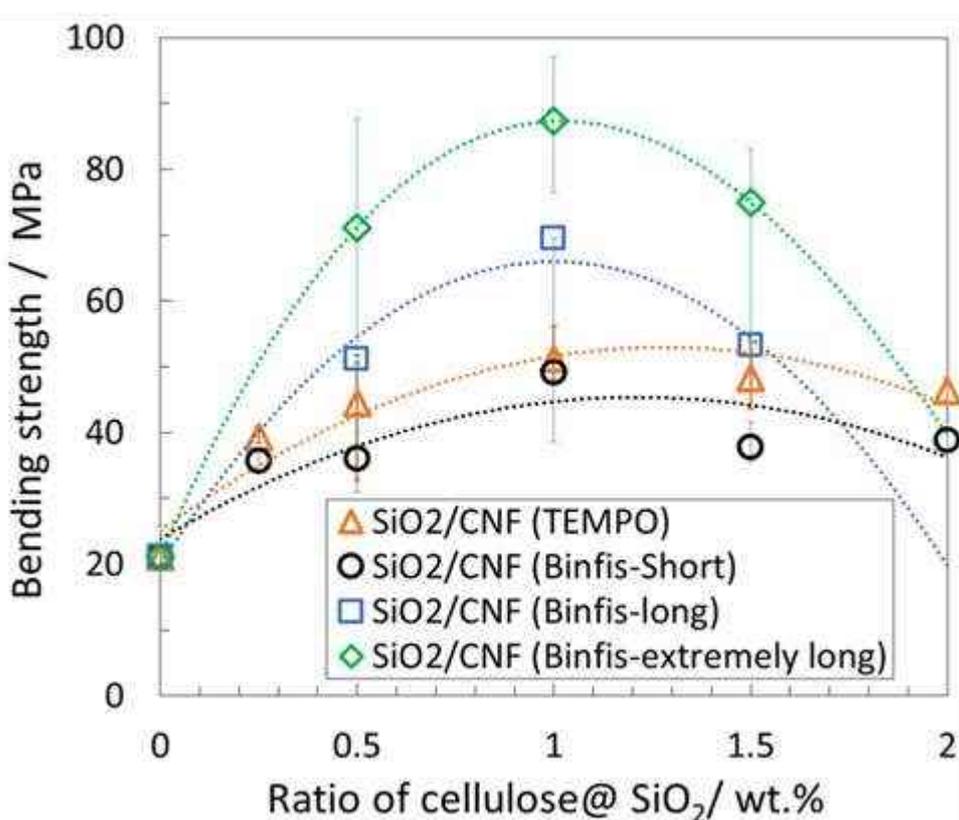


図 31 シリカ/CNF 無焼成固化体の三点曲げ強度試験結果

この結果より CNF を添加することによってシリカ無焼成固化体の曲げ強度が向上した。4 種の CNF いずれも添加率 1wt% で最大曲げ強度を示した。最高強度はスギノマシン製の極長 CNF (BiNF_i-s-extremely long) で平均曲げ強度は 87.3MPa であった。次はスギノマシン製の長 CNF (BiNF_i-s-long) で 69.4MPa、ついでスギノマシン製の中 CNF (BiNF_i-s-Short) が 51.2MPa であった。TEMPO 法に作製された第一工業製薬製の CNF (レオクリスタ) は 50.5MPa であった。CNF 添加率 1wt% 以降は BiNF_i-s CNF を添加した固化体の曲げ強度は、いずれも

減少傾向になった。いずれの CNF 添加量においても TEMPO CNF の曲げ強度は BiNFi-s CNF の曲げ強度より高かった。これらの違いが生じた原因として、用いた CNF の製造法の違いによる形状の影響が挙げられる。BiNFi-s CNF はウォータージェット法 (WJ 法) と呼ばれる製法を用いて製造されており、パルプ化した原料を水に分散させ、最高 245MPa に加圧・噴射し機械的処理によってナノファイバー化を達成している。その外形は TEMPO 法より一桁太く、太い繊維の周りにナノサイズオーダーの繊維が生成されている。それに対して TEMPO CNF は TEMPO 酸化法によって作製されており静電反発による非常に高い分散性を特徴としている。それゆえ、TEMPO CNF は数 nm の単繊維が均一に分散している。補強効果を期待する場合には、太い繊維の周りにナノサイズオーダーの繊維が生成されている方が、引き抜きに対する抵抗が高く、結果高い引き抜き効果となったと思われる。また、無焼成固化にはアルカリを用いる。一般に CNF はアルカリに対する耐性が低い。よって、TEMPO 法で得た CNF の様にごく微細な繊維は短時間で分解され分断されやすいのではないかと思われる。

次に、CNF 添加高断熱無機ボードの強度向上を目指して極長繊維の CNF (BiNFi-s-extremely long) をシリカ多孔質断熱材に複合化した。添加量は先に示した最高強度が得られた 1wt% の前後での効果を確認する為、CNF 添加量を 0~2wt% とした。結果を図 32 に示す。曲げ強度の補強効果の改善効果を分かりやすくする為、CNF を添加していない強度で除し百分率として改善強度を示した。

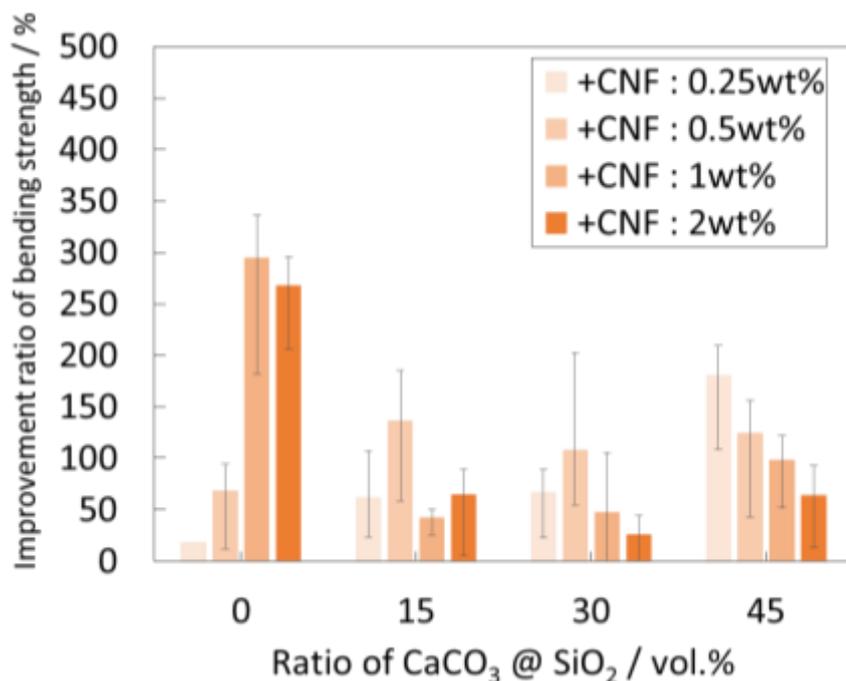


図 32 CNF 高断熱無機ボードの 3 点曲げ強度への CNF 添加効果

炭酸カルシウム添加率 0、15、30、45vol.%において、強度向上率は 294%、136%、108%、181%となり著しく曲げ強度が向上した。炭酸カルシウムの添加量、すなわち気孔率が上昇すると最大強度を示す CNF 添加量が少なくなった。次に、最大強度を示した CNF 添加量における CNF 添加高断熱無機ボードの最大曲げ強度をプロットし図 33 に示した。

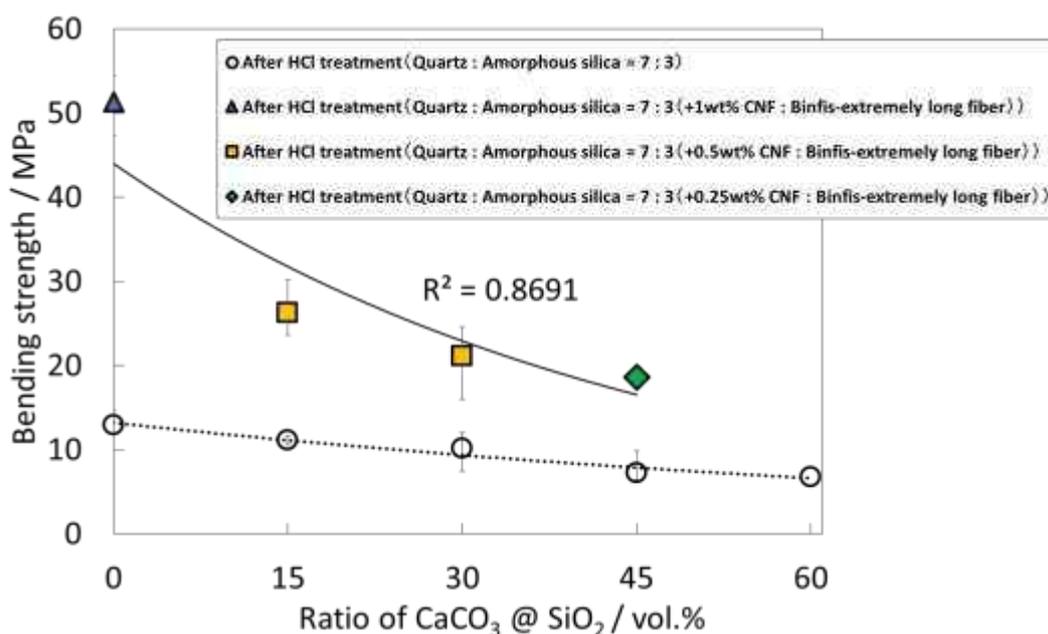


図 33 各気孔率 (炭酸カルシウム混合率) で最適な CNF 添加量での CNF 高断熱無機ボードの 3 点曲げ強度と CNF 無添加の場合の対比

○は CNF 無添加の強度であり、彩色されたプロットはそれぞれの炭酸カルシウム混合率 (気孔率) で最適な CNF 添加量における強度を示す。このグラフにおける黒実線は指数関数近似の曲線を表す。プロット結果より、炭酸カルシウム添加率の増加に伴い曲げ強度は指数関数的に減少することが確認された。決定係数 $R^2=0.8691$ であり、良好な適合性を示している。いずれの気孔率でも CNF 添加による補強効果は確認され、気孔率に対する効果が予測できる、つまり材料設計可能であることが示された。ちなみに、20MPa は一般の陶磁器タイルや食器用陶磁器のレベルであり、CNF 添加高断熱無機ボードがそれに相当する強度であることが示された。

・耐久特性

図 34 に耐熱試験の様子を示す。バーナーで約 1000℃まで加熱した。その後、20℃の冷水に投入し、外観を目視で確認した。CNF 高断熱無機ボードの原料は

数%の CNF を除いては全てが無機材料であるので、加熱中、加熱後にも炎を出すことはなかった。また、急冷時、急冷後に CNF 高断熱無機ボードに欠けや割れは観察されなかった。以上のことより、不燃性、耐熱性、耐熱衝撃性が高いことが確認できた。



図 34 耐熱試験の様子

CNF 高断熱無機ボードを 1cm 角の試験片とした。試験液は 3M の HCl 水溶液、水、3M の NaOH 水溶液をそれぞれテフロン容器に 500mL に準備した。これらに試験片を 7 日間それぞれ 21 個の試験片を浸漬した。この間、溶液はテフロン羽をもちいて 120rpm で攪拌した。試験片は攪拌で機械的に欠損しないように、テフロンメッシュで固定した。試験片はあらかじめ絶乾重量 (120°C4 時間で乾燥) を測定し、毎日試験片を 3 個取り出し、純水で十分洗浄後、絶乾させて重量を測定した。前後の重量差を試験開始前の絶乾重量で除し 100 分率とした。結果を表 10 に示す。

表 10 耐酸性及びアルカリ性試験の結果

	NaOH	水	HCl
1 日目	0.0%	0.0%	2.1%
2 日目	0.0%	0.0%	2.2%
3 日目	0.0%	0.0%	2.1%
4 日目	0.0%	0.0%	2.3%
5 日目	0.0%	0.0%	2.1%
6 日目	0.0%	0.0%	2.2%
7 日目	0.0%	0.0%	2.2%

結果より、アルカリと水に対しては何も変化がなく、耐性が高いことが確認された。一方、酸に対しては、僅かな重量減が確認された。これは残処理により除去されていなかった僅かに残った炭酸カルシウムが溶出した為では無いかと思われる。ただし、その量は2%程度であり絶対量としても0.02 g程度である。また初日にほぼ溶解は終了している。これらのことから、この変化が材料物性、特に強度に与える影響は極めて低いといえる。念のため7日間HClに浸漬後のサンプルの3点曲げ試験を実施した結果、その変化は酸処理していないサンプルの強度のエラーバー内に収まる程度であり、強度に影響がないことを確認した。

以上のことから、CNF 高断熱無機ボードは極めて高い耐酸性・アルカリ性をもつことが分かった。

C 経済性の評価

表 11 に、本量産試作をもとに施工費まで含め算出した開発品コストと既存品コストの比較表を示す。既存の石膏ボードに対し、住宅1戸当たり25,993円のコストアップとなる。ボード単体のコストとしては、250円/kg以下であり、タイル等のセラミック系建材に比べれば、十分対抗できるコストである。これは、無焼成である点が大きいの。一方、石膏ボードは、火力発電所の副産物である脱硫石膏を原料としていることから、無機系建材の中でも群を抜いて安価である。したがって、このコスト差は、やむを得ない点もある。しかしながら、本開発品は、断熱性だけでなく、耐久性が高いため、メンテナンス部分では、大きなアドバンテージとなっている。これら含めて後述するライフサイクルコストでの評価すると使用者にてコスト回収できる。

表 11 開発品と既存品のコスト比較

項目	使用量	単価	原価	備考
開発品				
変動費				
シリカ	204.6 kg/戸	150 円/kg	30,692 円/戸	市販シリカ相場より
石英粉	258.8 kg/戸	100 円/kg	25,877 円/戸	市販石英粉相場より
炭酸カルシウム	132.4 kg/戸	70 円/kg	9,268 円/戸	市販炭酸カルシウム相場より
CNF	6.0 kg/戸	1,000 円/kg	6,018 円/戸	中期的CNF価格を想定
副資材	601.8 kg/戸	20 円/kg	12,036 円/戸	梱包資材等
電力	240.7 kW/戸	16 円/kwh	3,852 円/戸	使用電力=0.4kW/kg
計			87,742 円/戸	
固定費				
償却費	601.8 kg/戸	49 円/kg	29,488 円/戸	投資額(粉砕機、混練機、成型機他=150百万円)
人件費	601.8 kg/戸	24 円/kg	14,443 円/戸	1.5名×600万円/名
管理費等	601.8 kg/戸	30 円/kg	18,054 円/戸	
計			61,985 円/戸	生産量1600kg/日
製造原価			149,728 円/戸	変動費+固定費
販管費			22,459 円/戸	製造原価×15%
施工費	2.5 日/戸	10,000 円/人/日	25,000 円/戸	軽量化による施工効率改善+クロスレス
計			197,187 円/戸	
既存品				
石膏ボード	1,350.6 kg/戸	29 円/kg	39,169 円/戸	吉野石膏通販価格
クロス	125.1 m ² /戸	416 円/m ²	52,025 円/戸	サンテツ通販価格
施工費	8.0 日/戸	10,000 円/人/日	80,000 円/戸	石膏ボード施工4日+クロス施工4日
計			171,194 円/戸	
コスト比較(開発品-既存品)			25,933 円/戸	

イ 外壁部品としての評価

1) 外壁部品の試作

A 概要

量産試作した各外壁構成素材を用い、モデルルーム評価用の外壁部品の試作を実施した。この部品の熱貫流率は、 $0.33/\text{m}^2\text{K}$ で、目標値 ($0.35\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 以下) を確保した。以下にはその詳細を示す。

B 外壁部品の試作および性能評価

各種外壁構成素材とスギ枠材を用いて幅 900mm ×高さ $1,800\text{mm}$ のパネルを製作し、テストハウス室内壁内側に取り付け固定した (図 35)。

実証区 (西部屋) に CNF 添加により高断熱化された各種外壁部品を、対照区に既存製品の構成素材を用いた外壁部品を取り付けた。実証区、対照区における外壁部品の断面構成を表 12 に示す。なお、CNF 添加セラミックおよびインシュレーションボードは開発担当機関の研究室において大判での製造と厚さの調整が困難であったため、 9.5mm 厚さの小割材での提供を受け、捨て貼り合板 (5.5mm 厚シナ合板) に貼付することでパネル化を行った。

表 12 外壁部品の断面構成

	室内側 ←		→ 室外側
実証区 (西部屋)	内装壁(15mm)	断熱層 (40mm)	外壁下地(15mm)
	CNF添加 無機ボード	CNF添加 セルロース系断熱材	CNF添加 木質ボード
対照区 (東部屋)	内装壁(15mm)	断熱層 (40mm)	外壁下地(15mm)
	既存無機ボード (石膏ボード)	既存セルロース系断熱材 (ウッドファイバー)	既存構造用木質ボード (構造用合板)



図 35 外壁部品の作成・取付の様子

2) モデルルーム評価

A 概要

試作部品を用いモデルルームに施工し、実測評価を実施した。なお、既存部品との比較においては、外皮部品および(2)①の内壁部品を施工した状態で実測評価を実施した。また、モデルルーム設置に関しては、住宅メーカーに依頼し、施工における課題点、改善点のヒアリングを実施した。部品の構成が同じである点から既存部品とハンドリング面で同等である回答を得た。以下には、その詳細を示す。

B モデルルームでの評価

a 既存テストハウスの概要

本調査には当研究室保有のテストハウス(図 36)を用いた。本テストハウスは、同じ仕様の東西2部屋を有し、主に内装材の種類による温湿度環境等の比較試験を行うために建設されたもので、主な特徴は図 37 に示すとおりである。



図 36 岡山県森林研究所内テストハウスの外観



図 37 テストハウスの主な特徴

これまでの利用実績から本テストハウスの東西両室は、同等の温湿度環境を保てる性能を有することが確認されている。これにより、東・西両室の内装構成を変化させて、室内環境に与える影響の比較調査が可能である。直近の冬期における東西両室の温湿度変化測定事例を図 38、39 に示す。非空調 (図 38) 空調時 (図 39) 共に東西両室および両室外 (南側庇下) の温湿度環境が同様に推移していることを示している。

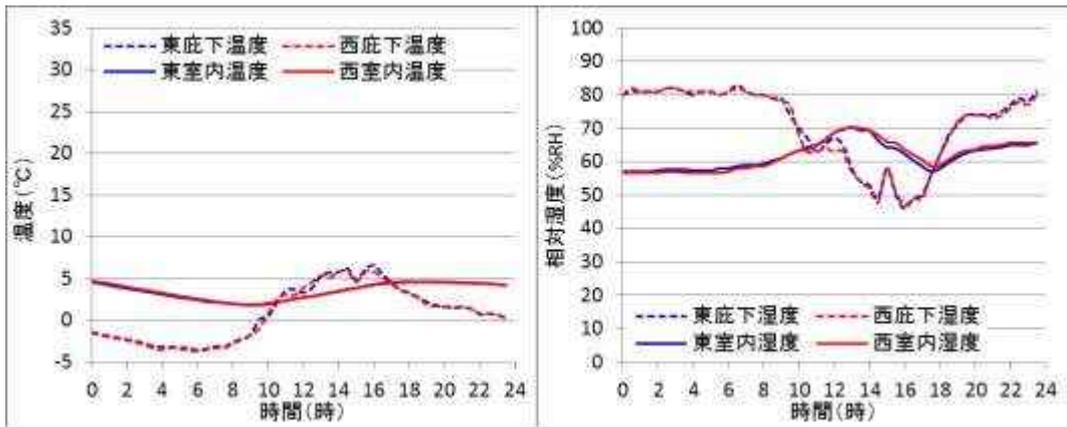


図 38 空調を行わない場合の東・西両室の環境比較例 (2017 年 1 月)

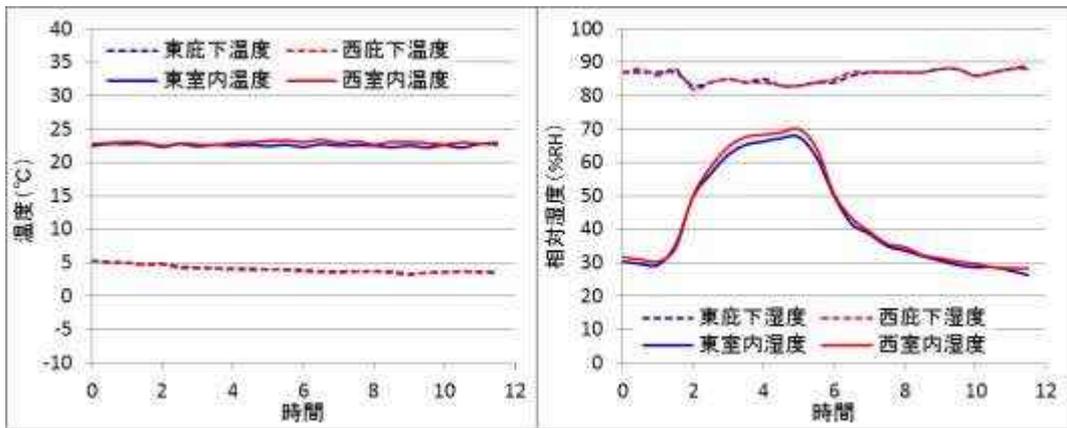


図 39 空調時 (エアコン、加湿器併用) の東・西両室の環境比較 (2017 年 1 月)

b 既存テストハウスを用いた評価の準備

今回の調査においては、既存の天井・壁・床の取替改修は予算的に困難であることから、室内側に被覆する形で、それぞれ開発素材を用いた天井・壁・床部品を取り付けた。

なお、本調査方法において当初より懸念される事項として、断熱施工が施された既存の住宅室内の内側へ比較する天井・壁・床部材を取り付けることで、本来の性能差が室内測定値に現れにくいことが考えられた。従って、本調査においては僅かな差でも捉えられるよう、事前に実施し得る改修を行った。すなわち、①テストハウス室内の気密補修および②南側開口部 (掃出し窓サッシ) の高断熱化である。以下にその詳細を記す。

①テストハウスの気密補修

既存のテストハウス室内の壁・天井には任意の内装仕上げ材を嵌め込めるレールが取り付けられており、レール取り付け箇所の一部で、壁や天井に切り欠きが存在する。この部分的な気密欠損の程度が東西両室において異なる可能性が

あるため、気密欠損箇所を発泡ウレタンにより充填した後、シリコンでコーキングする等により気密補修を行い、両室の気密測定を行った (図 40、41 参照) 気密補修後の気密測定 (減圧法、JIS A 2201) の結果、東西両室の C 値 (延べ床面積あたりの相当隙間量= cm^2/m^2) をそれぞれ 1.5、1.7 と低い値で近似したことを確認した。



図 40 テストハウス室内に設けられている内装仕上げ材嵌め込み用レール



図 41 気密補修 (欠損部へのウレタン吹付充填) と気密測定の様子

②南側開口部 (掃出し窓) の高断熱化

東西両室には南側に一般的なサイズ (約 1.8×2.0m) の大開口部 (掃出し窓) を有しており、この部分における熱の出入りをできるだけ抑えることが、両室における外皮・内層・天井・床部品の違いに起因する差を捉えるために重要と考えられた。そこで今回、既存のガラスサッシを高断熱ガラスサッシ (APW430、YKKAP) へ取り換えた (図 42)。これにより、掃出し窓ガラスの熱貫流率は $2.2\text{W/m}^2\text{K}$ から $0.78\text{W/m}^2\text{K}$ へ大きく向上した。

なお、今回取り付けられたガラスサッシは既存の引き違い窓タイプと異なり、気密確保に有利な開き窓タイプとなっており、この改修により上記に記載した両室の気密性能が損なわれていないことを同様の測定で確認している。



図 42 テストハウス両室の南側掃出し窓の交換 (高断熱化)

c テストハウス両室における各種測定項目

本調査における評価事項および測定に用いた機器を下記および図 43 に示す。

- ①室内気温・湿度・・・室内中央部で測定
おんどとり Jr. RTR-507L (株ティアンドデイ) を用いた。
- ②室内側表面温度・熱流・・・各構成部品の室内側表面で測定
熱流センサ Z2017 (日置電機株) とデータロガーを用いた。
- ③室内グローブ温度・・・室内中央部で北向きに測定
熱中症指数計 HI-200SD (株カスタム) を用いた。
- ④エアコン (暖房) 消費電力・・・コンセント差込口で測定
エコキーパーEC-03N (株カスタム) を用いた。



図 43 テストハウス室内測定に用いた機器

d 施工方法

(1) -①-イ-1)-B に記した方法で製作した各種外壁部品パネルをテストハウス実証区 (西部屋)、対照区 (東部屋) にそれぞれ配した。取り付けは既存室内壁に胴縁を介してパネルをビス止めした。なお、各種開発担当機関において量産できる構成部品数量に限りがあったため、外壁部品の配置は図 44 の赤枠部分とし、配置できない個所については市販ウレタンボードで被覆した。

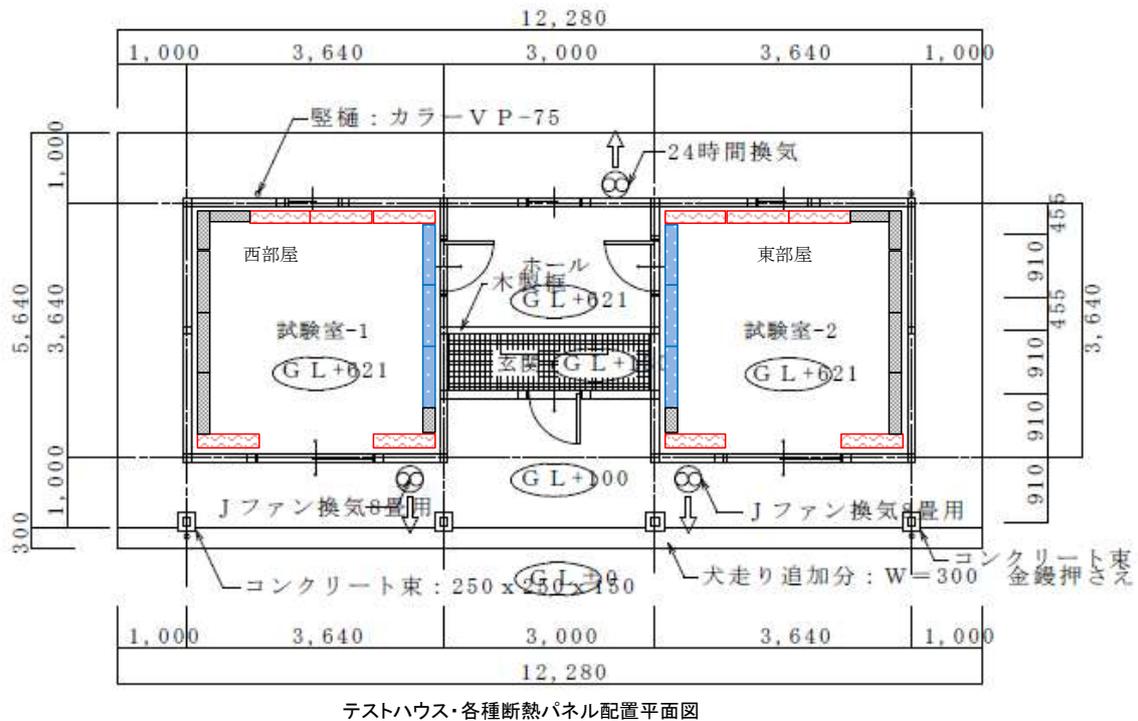


図 44 テストハウス室内への外壁部品 (パネル) 配置図

e 既存品との施工性の比較

今回は、研究室において試作した小割の部品を用いたため、対照区における既存大判製品に比較するとパネル化作業が煩雑になったが、実用化により大判製造が可能になれば、施工性になんら変わりはないと考えられた。

f 省エネ効果の検証

外壁・内層部品取り付け後のテストハウス両室（西部屋：実証区、東部屋：対照区）の気温（TA）変化推移の一例（72時間）を図45に示す。図に示すように両室のTAは屋外TAの変動に準じてほぼ同様に変動しており、明確な差は見られない。

一方、両室中央部で測定したグローブ温度（TG）についてみると、実証区TGが対照区に比較して若干高い傾向が認められた（図46）。

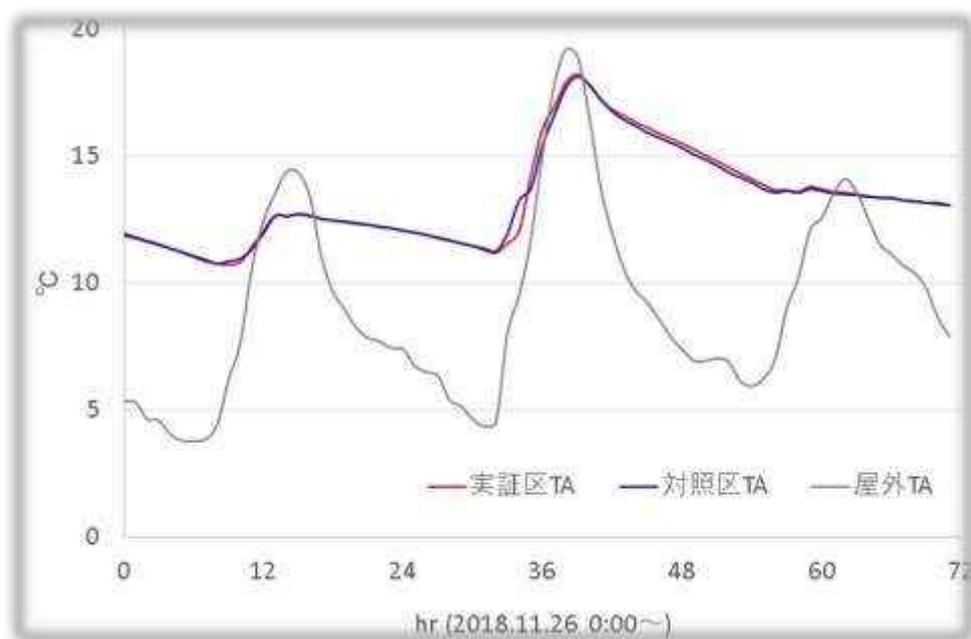


図45 テストハウス両室および室外気温 (TA) 変化

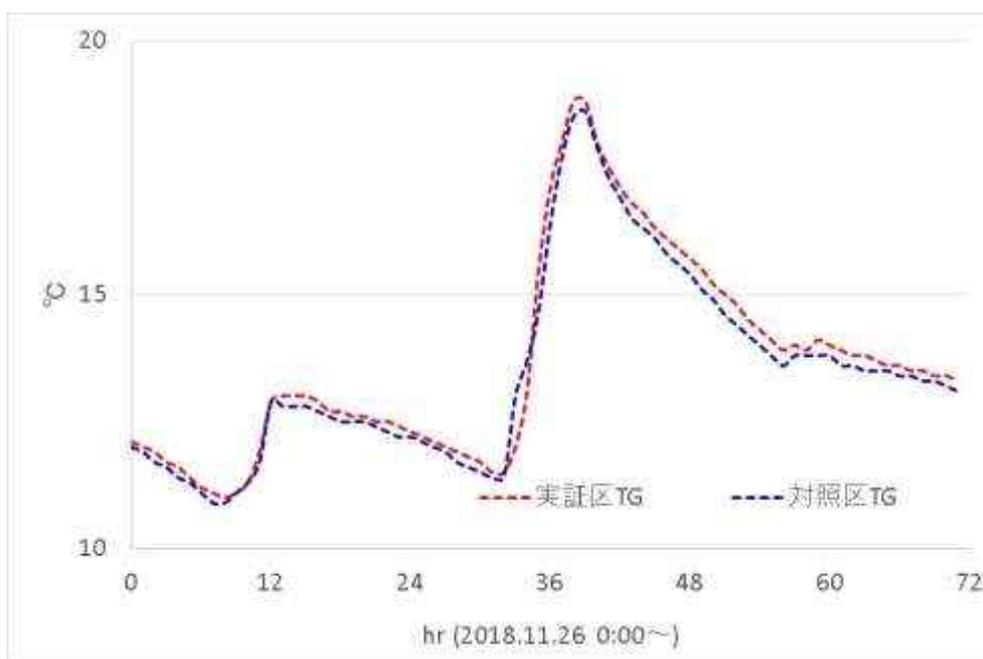


図 46 テストハウス両室のグローブ温度 (TG) 変化

この原因として、実証区と対照区における外壁部品表面熱流の違いに起因する表面温度の差が考えられる。図 47 に実証区と対照区における外壁部品表面で測定した熱流変動を、図 48 に外壁部品表面温度変動を示す。気温上昇時において実証区の外壁部品表面 (CNF 添加無機ボード) における熱流が、対照区の外壁部品表面 (既存石膏ボード) より小さい (図 47)。なお、熱流値のマイナス符号 (－) は、表面部材内部への熱の流入を示しており、CNF 添加無機ボードが既存石膏ボードより断熱性が高いことを示している。すなわち、周囲気温上昇時に断熱性が高い部材ほど内部への熱の拡散が遅く、表面温度はより上昇しやすいと考えられる (図 48)。グローブ温度 (TG) は周囲からの熱輻射による影響を受け、気温に比較し体感温度に近い値であるが、この壁表面温度の影響を受けていると考えられる。

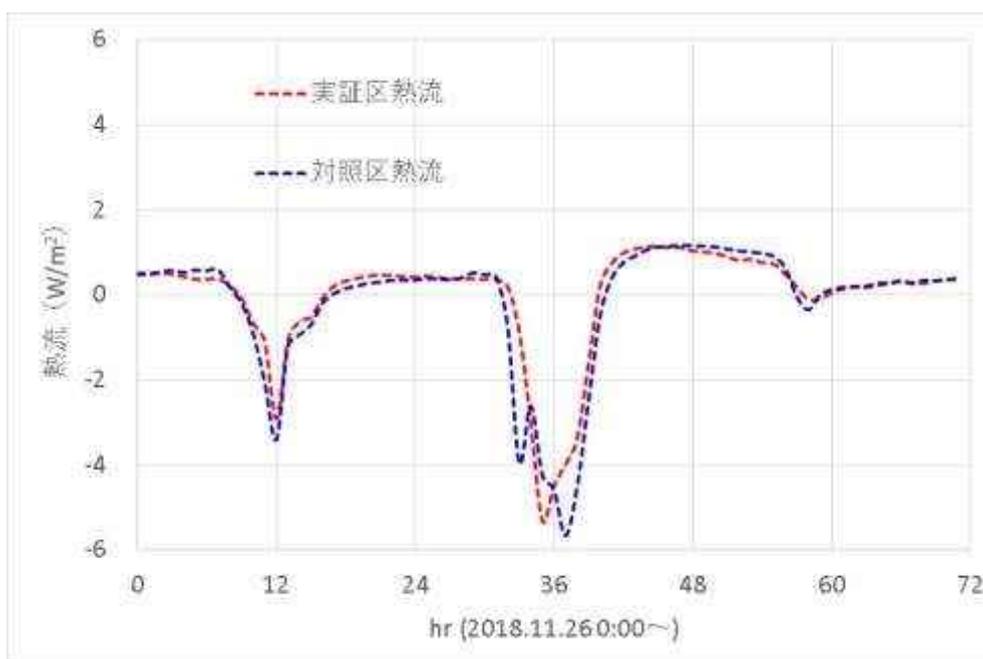


図 47 テストハウス両室における外壁部品表面の熱流変化

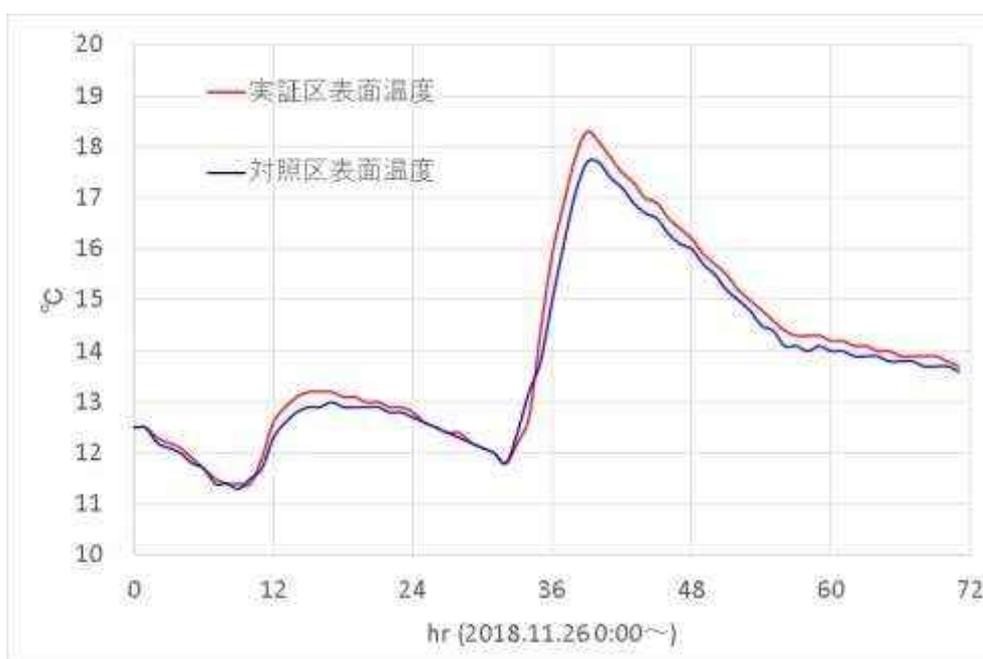


図 48 テストハウス両室における外壁部表面の温度変化

天井、外壁、内装、床部品を取り付けた状態で、両室のエアコン（暖房、25℃）運転した際の消費電力を表 13 に示す。調査時の外気条件によって電力消費にばらつきが見られたが、すべての調査回において実証区の方が低い電力消費となった。対照区との電力消費から換算すると、開発品を用いたモデルルームでは

既存の部品に対して平均で 7.3%の CO₂ 排出量削減となることが示された。

表 13 エアコン稼働試験の結果

調査 No.	調査開始		調査終了		エアコン設定		電力消費 (kWh)	
	日	時間	日	時間	設定温度	稼働時間	実証区	対照区
1	1/26	18:00	1/29	17:00	25	71	14.56	15.27
2	2/8	14:00	2/11	14:00	25	72	14.24	14.76
3	2/14	18:00	2/16	18:00	25	48	8.29	9.50
4	2/27	17:00	3/4	9:00	22	112	13.17	14.39

g 住宅メーカーのヒアリング結果

今回施工を担当した真庭市内工務店へのヒアリングの結果、今回開発された外壁構成素材は既存製品より軽量で、現場における切削性も問題ないため、取り扱いに関しては高評価を得た。

②天井部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 天井構成素材の試作

1) 高剛性化粧合板

A 概要

量産 (実用化) に則した条件で、CNF 補強高剛性化粧合板の量産試作を実施した。また、この量産試作品の曲げ剛性は、既存部品に対し、平均で 39%、特に合板表面の木目が曲げ応力の方向に直交する場合には 60% も向上 (量産試作品 = 1.6GPa、既存品 : 1.0GPa) し、目標値 (既存部品に対し 27% 以上の向上) を確保した。さらに、経済性を確保できる仕様 (使用材料、配合、生産設備および生産能力) を確立した。以下には、その詳細を示す。

B 量産試作および量産試作品の評価

a 原材料

セルロースナノファイバーは、市販の水分散 CNF (BiNFi-s WFo-10010、スギノマシン) を使用した。白色ゲル状の外観をしており、濃度 10 wt.%、粘度 130 Pa・s 以上である。CNF の直径は約 20 nm、長さは数 μm 以上である。これを濃度 1 wt.% まで純水で希釈して使用した。

ガラスマット (WBA000103、サンライト) はガラス繊維 (GF) がおおよそランダム配向した不織布 (面密度 300 g/m²) である。GF の直径は約 15 μm、繊維長は約 20 mm である。

エポキシ (EP) 樹脂 (828 三菱ケミカル)、EP 硬化剤 (T 三菱ケミカル)、反応

性希釈剤 (YED111N 三菱ケミカル) である。EP 樹脂 100 g に対して、EP 硬化剤を 20 g の割合で添加して使用した。可使用時間は 15~20 分であり、硬化条件は 80 °C×180 分×0.25MPa である。

いずれの材料も実用化を想定し、市販の材料を購入して使用した。

b 量産試作

ハイブリッド繊維基材ならびに複合材料の製造工程図を以下の図 49、図 50 に示す。

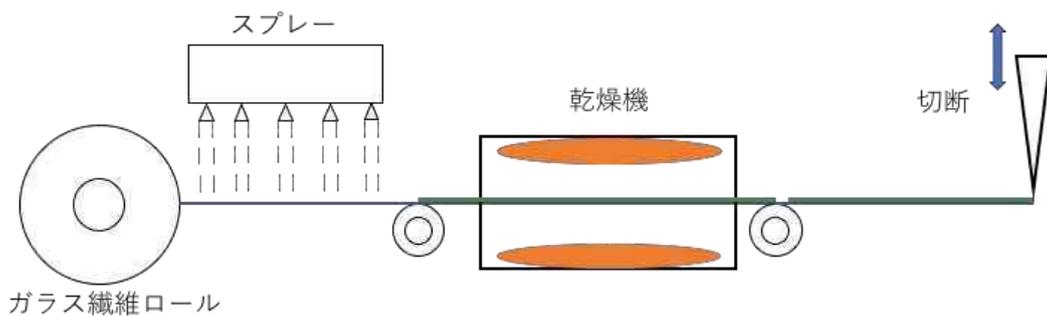


図 49 ハイブリッド繊維基材製造の工程

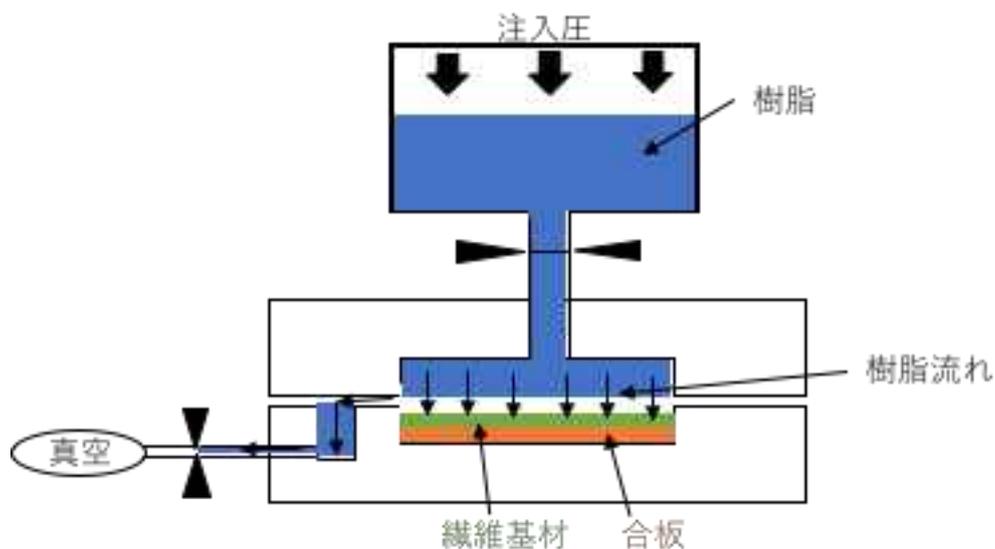


図 50 複合材料製造の工程

ハイブリッド繊維基材製造工程については、GF ロールから引き出された GF マット上にスプレーを用いて CNF 懸濁液を吹きつけ乾燥機で水分を乾燥させる

だけの簡単な工程であり、量産に適した製法となっている。

また、複合材料製造工程については、天井パネルのサイズの金型に設置した繊維基材への樹脂注入 (RTM) することにより、高品質な天井パネルが量産可能である。少量多品種生産の場合には、真空補助樹脂注入法 (VaRTM)、ホットプレスあるいはハンドレイアップによる低コスト化も可能であり、繊維強化複合材料の製造に用いられる汎用的な設備で製造可能である。上記の工程を、研究室で実施可能なレベルまで簡素化し施策を実施した。

CNF/GF 基材製作で用いた水分散 CNF の物性値を以下の表 14 に示す。供試材の CNF 懸濁液は、CNF を吹き付けるためには粘度が高すぎるため、純水で 1 wt.% まで希縮し、スターラーで攪拌して使用した。スターラーの攪拌条件は 1500 rpm×10 分とした。水分散 CNF の希釈過程を図 51 に示す。高濃度 CNT ゲルが攪拌することによって水中に一様分散した状態になっていることが分かる。また、粘度計を用いて希縮した水分散液の粘度を測定したところ 1Pa・s 以下であり、吹き付けが可能ほど十分に粘度が低下していた。

表 14 CNF 懸濁液の物性

CNF 直径 [nm]	20-50
CNF 長さ [μm]	2-5
懸濁液濃度 [wt.%]	11.2
粘度 [$\text{mPa}\cdot\text{s}$]	> 130,000

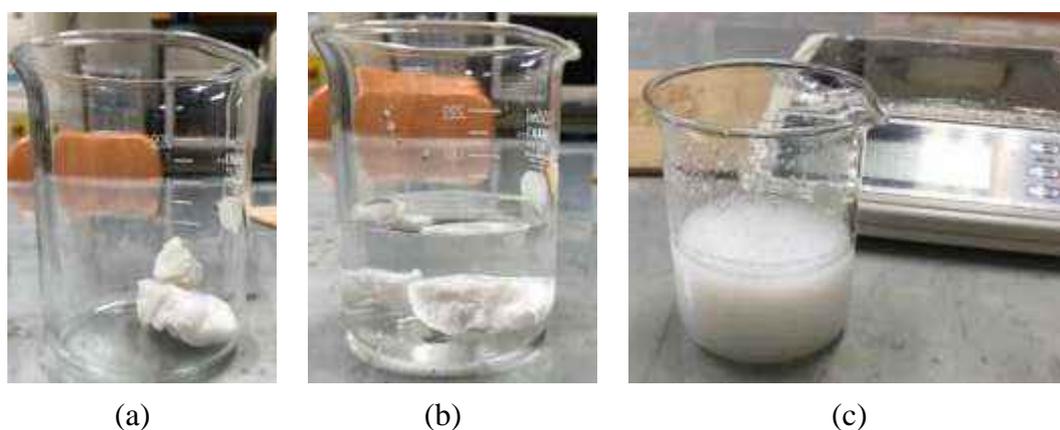


図 51 CNF の低粘度化
(a) CNF ゲル (b) 攪拌前 (c) 攪拌後

希縮後の CNF 分散水溶液をスプレーによって GF マット (面密度 $30\text{g}/\text{m}^2$) に吹き付けることでハイブリッド化した。吹き付け回数は最大 5 回とした。スプレー機材を図 52 に、CNF の吹きつけのイメージ図を図 53 に示す。



図 52 ハンドスプレー

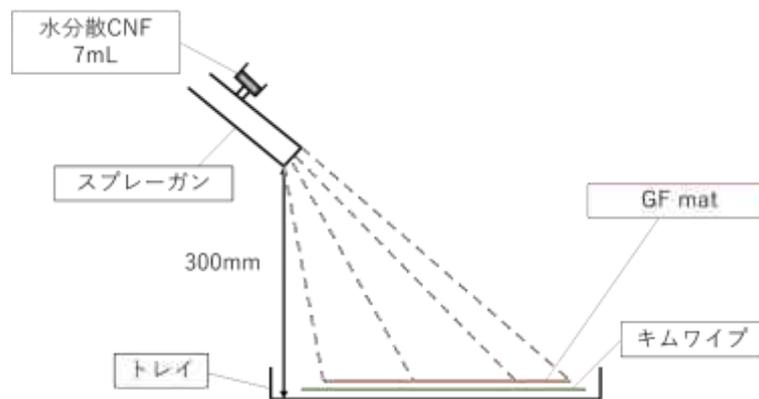


図 53 ラボスケールでの CNF のスプレー方法

GF マットをトレイに引かれている吸水マット上に置き、そのマットに対して 300 mm 離れたところからスプレーで CNF 水分散液を吹きかけた。スプレー圧は 0.1 MPa である。CNF 吹き付け前の GF マットと、吹き付けを行った CNF/GF ハイブリット繊維基材の表面状態の SEM 写真を図 54 に示す。

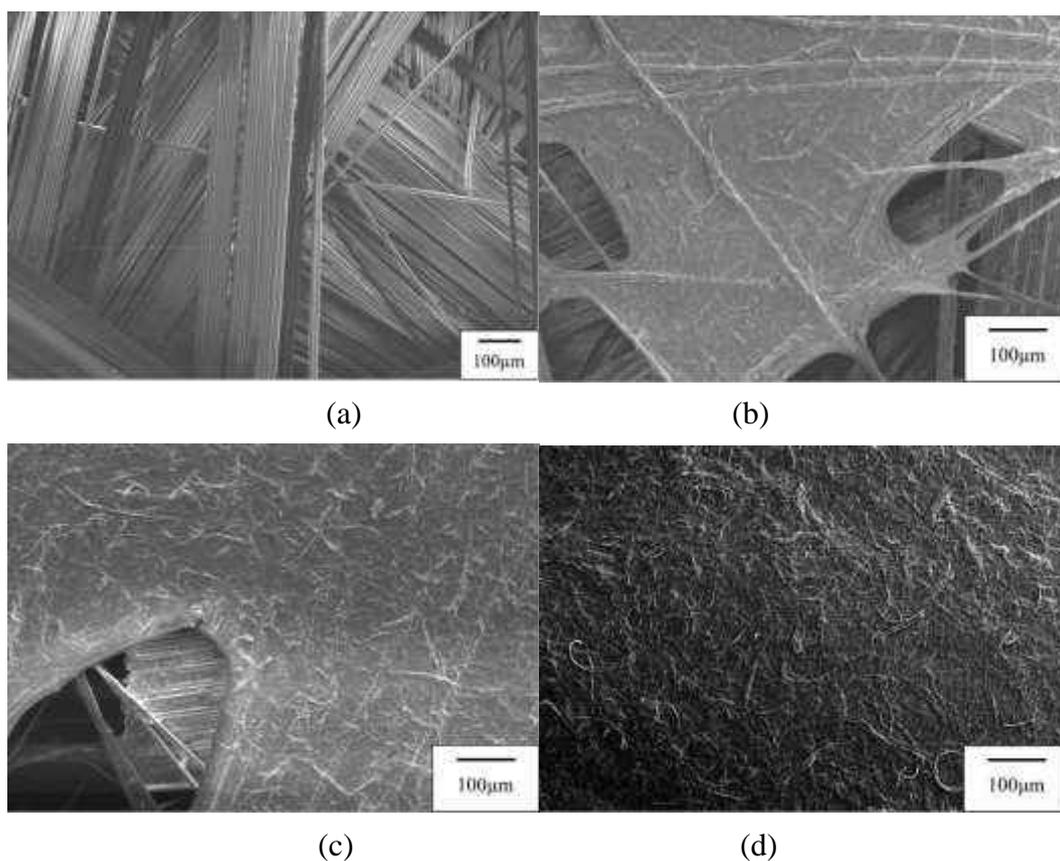


図 54 GF マットへの CNF のスプレー前後の SEM 観察結果
 (a) スプレー前 (b) スプレー 1 回 (c) スプレー 3 回 (d) スプレー 5 回

吹き付けにより、GF 間の空隙に CNF からなる膜が形成されていくことがわかる。また吹き付け回数が多くなるごとに、膜面積が増えていくことがわかる。吹き付け 5 回で、ほぼすべての GF 間の空隙に CNF からなる膜が形成した。5 回吹き付け終了時の繊維基材の体積含有率は CNF:GF=30:70 程度であった。

作製した CNF/GF 基材に対して EP 樹脂 (EP) を用いてラワン合板に接着し高剛性化粧合板を製作した。作成手順は以下のとおりである。

CNF/GF 基材を一日待機保存で乾燥させたのちに、内部の水酸基を完全に除去するために恒温機で $130^{\circ}\text{C}\times 60$ 分の加熱を行う。次に、EP 樹脂と水で希釈した CNF 分散液を 10 : 1 の割合で混ぜ合わせたものと硬化剤を 10 : 2 の割合で混ぜ合わせ樹脂の準備をする。EP 樹脂の含浸はハンドレイアップで行った。含浸手順は CNF を吹き付けていない GF 面に対しローラーを用いて塗って行った。その後ラワン合板の上に GF 面を貼り、仕上げに CNF 面にも EP 樹脂を塗った (図 55)。最後に繊維基材を乗せた合板をホットプレス (図 56) で $80^{\circ}\text{C}\times 180$ 分 $\times 0.25\text{MPa}$ で成形した。

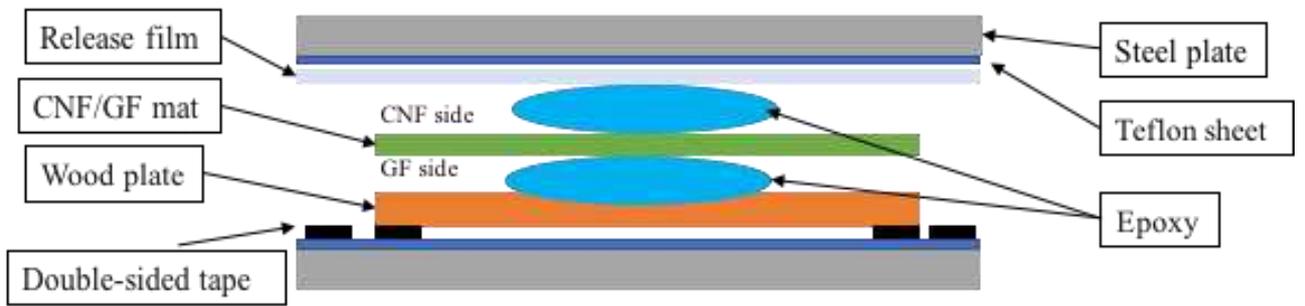


図 55 ホットプレスによる高剛性化粧合板製作の製作



図 56 ラボスケールホットプレスマシン

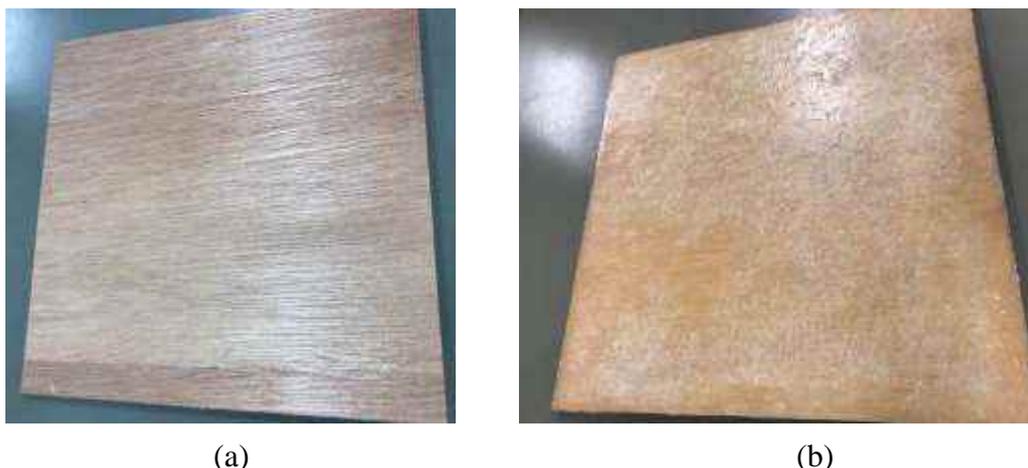


図 57 試作した高剛性化粧合板
 (a) 使用した合板 (b) 高剛性化粧合板

製作した合板の複合材料部分の体積含有率は CNF:GF:EP=13:28:59 であった。図 57 に高剛性化粧合板を示す。

以上のように、本研究では GF マットに CNF 水分散液を吹き付けることでハイブリッド繊維基材を容易に作成できた。液体 EP 樹脂を用いることで繊維基材に対してムラなく含浸させることができ、簡単に高剛性化粧合板を作成できる手法であると言える。

c 量産品の性能評価

・曲げ剛性

作製した CNF/GF/EP 複合材を張り付けた合板と合板のみの曲げ剛性を測定するために 3 点曲げ試験を実施した (図 58)。3 点曲げ試験は JIS K7017 を参考に行った。試験条件は、試験片寸法として全長 80mm、支点間距離は 64mm、幅 15mm、厚さ 4mm の短冊形状試験片であり、治具と中央の圧子は直径 10mm である。試験速度は 1.70mm/min とし室温大気中で実施した。試験片の引張荷重がかかる側にひずみゲージを取り付けひずみを測定した。木目方向合板、木目直交方向合板、CNF/GF/EP 複合材付き木目方向合板、CNF/GF/EP 複合材付き木目直交方向合板ともに 5 本ずつ試験を行った。

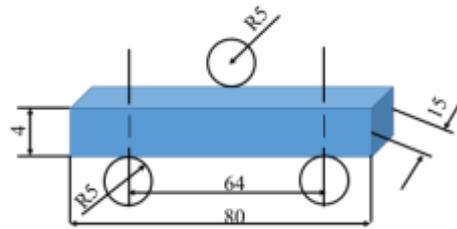


図 58 曲げ試験

得られた荷重－変位関係を図 59 に示す。

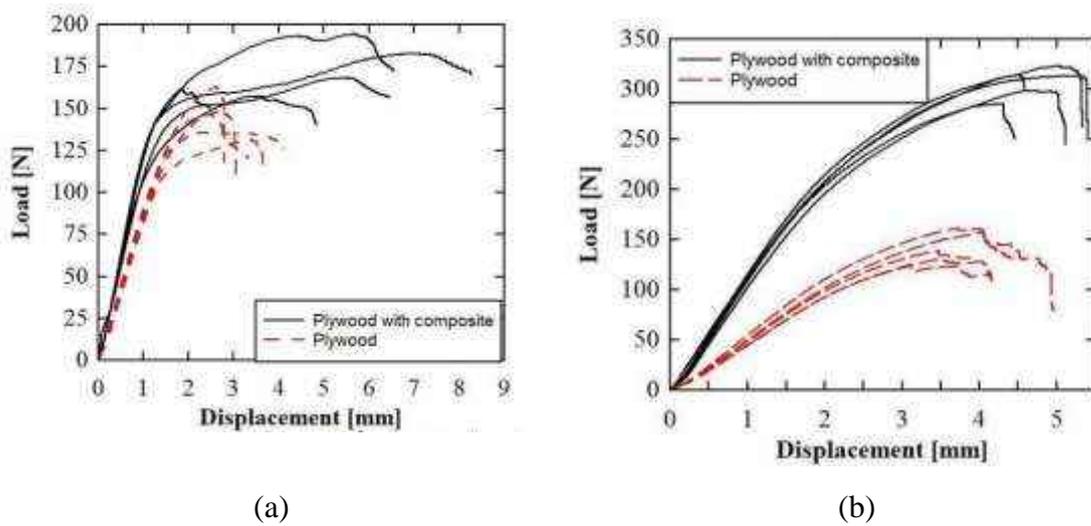


図 59 荷重－変位関係

(a) 表面の木目が曲げ応力方向と一致 (b) 表面の木目が曲げ応力方向と直交

荷重－変位関係を整理し、曲げ剛性として整理した結果を図 60 に示す。図のエラーバーは最小値と最大値を意味する。なお、曲げ剛性の取得はひずみ 0.0005~0.0025 に対応するたわみから算出した。

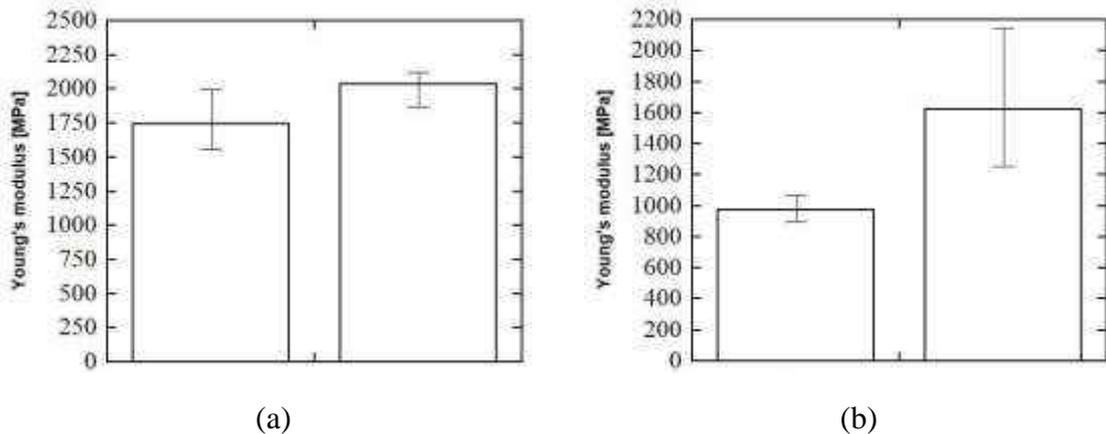


図 60 曲げ剛性

(a) 表面の木目が曲げ応力方向と一致 (b) 表面の木目が曲げ応力方向と直交

結果よりヤング率は木目方向に曲げ応力が作用する場合に 18%、木目直交方向に曲げ応力が作用する場合で 60%の向上が見られた。平均では 39%の上昇であり、よって目標であった既存製品性能から 27%向上を達成することができた。

・耐久特性とその他の測定データ

荷重—変位曲線より破壊までの吸収エネルギーをそれぞれ算出した。吸収エネルギーを比較した図 61 を示す。

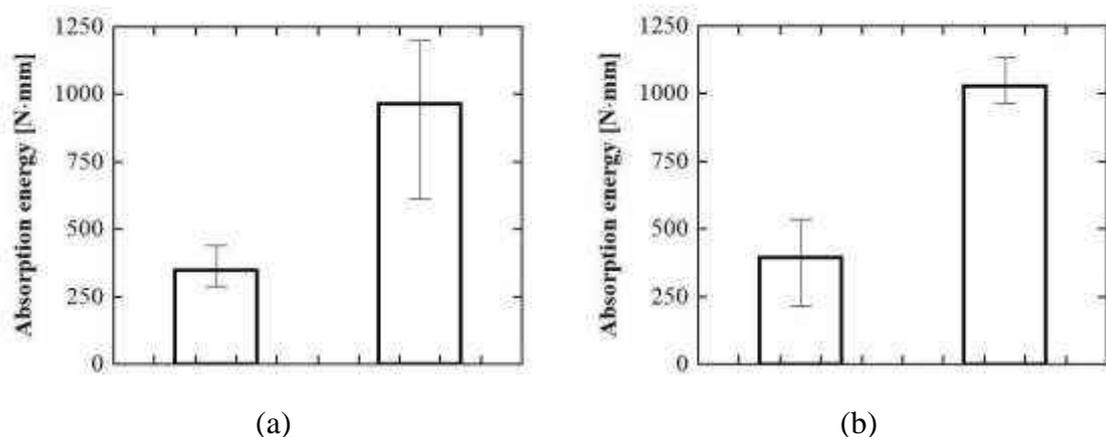


図 61 破壊までの吸収エネルギー

(a) 表面の木目が曲げ応力方向と一致 (b) 表面の木目が曲げ応力方向と直交

構造材料一般に高剛性化は破壊までの吸収エネルギーを減少させることが多いが、提案する高剛性化粧合板の場合は、高剛性化と同時に破壊までの吸収エネルギーを倍増させることが可能であり、提案手法の有用性を示している。

耐久特性の評価のために、強化部分である複合材料の飽和吸湿状態での引張試験を実施した。

なお本試験では、GF マットを面密度 30 g/m² (WBC000103、サンライト) のものに変更し、母材には EP フィルム (DRS-028、サンユーレック、樹脂目付量 150g/m²) を使用した。曲げ試験のサンプルより GF の量が 1/10 と少なくなることから、吸水の影響を評価しやすいが、言い換えると吸水の影響を過度に受けるサンプルとなっていることに注意が必要である。

作製した GF/EP 複合材、CNF/GF/EP 複合材の大気圧室温環境時の重量を測定後、純水中に浸漬し、適時取り出し、表面の水滴を吸水シートでふき取り、素早く重量を測定し、飽和吸水量と飽和給水時間を測定した。試験片が薄く小さいため、吸水シートでのふき取り時間は 10sec、重量測定時間は 10sec と設定して行った。浸漬時間は重量変化がなくなるまで行った。以下の図 62 に浸漬時間における吸水率のグラフを示す。吸水率の計算には式を用いた。

$$\text{Water absorption [\%]} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

ここで、 m_1 :初期測定、浸漬前の試験片重量 (mg)

m_2 :浸漬後の試験片質量 (mg)

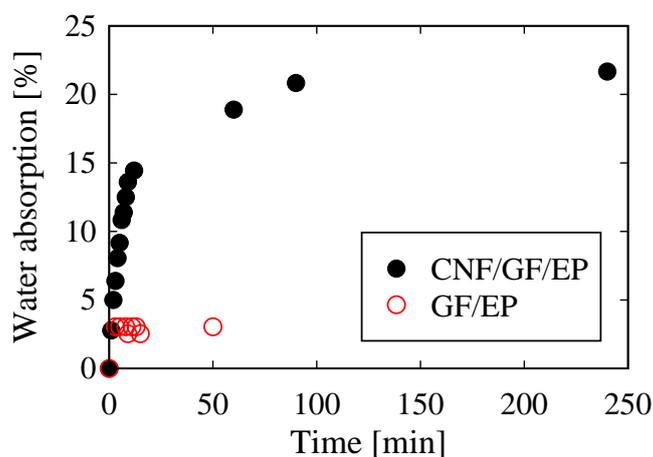


図 62 時間変化における吸水率

引張試験時の試験片の吸水方法としては、試験片中央部に純水を含ませたティッシュペーパーを巻いて飽和吸水させた。また試験中にも乾燥が生じないように純水で濡らしたまま試験した。その様子を図 63 に示す。

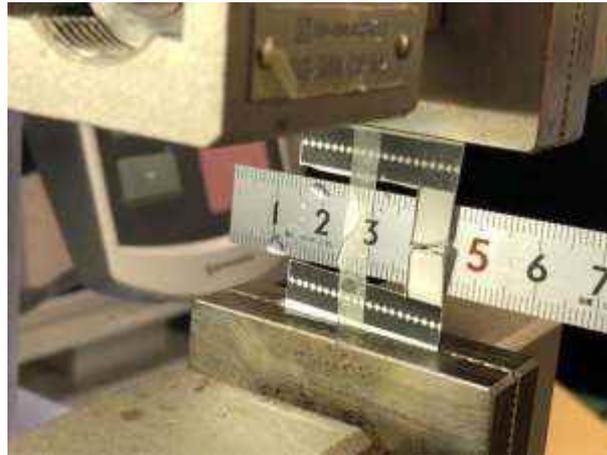


図 63 引張試験時の乾燥防止の様子

引張試験結果は GF/EP 複合材、CNF/GF/EP ハイブリッド複合材の飽和吸水後のヤング率を図 64、引張強度を図 65 に示す。飽和吸水により CNF/GF/EP ハイブリッド複合材のヤング率、引張強度は低下したが、飽和吸水のような極端な例であっても、GF/EP 複合材の値を下回ることはなく、構造としての基本的な物性は担保されていることを明らかとした。なお実際には、住設向けの GFRP 構造で一般に行なわれる表面コーティングにより吸湿自体を大幅に低減させることが可能である。

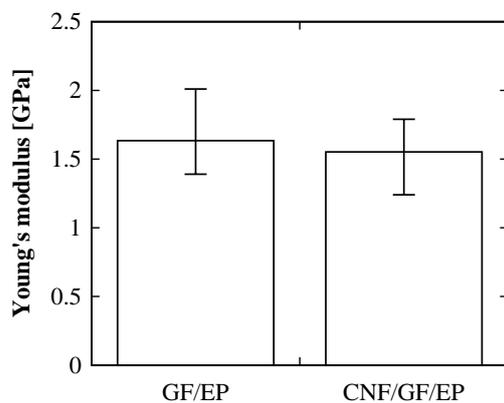


図 64 飽和吸水後のヤング率比較

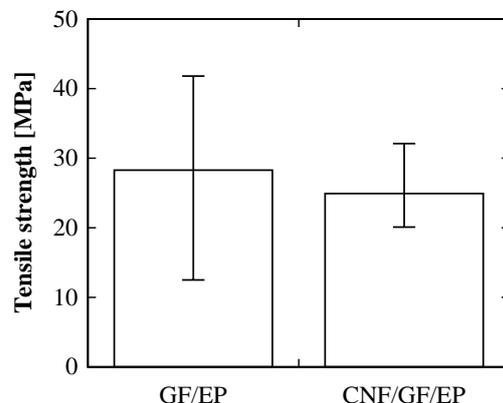


図 65 飽和吸水後の引張強度比較

C 経済性の評価

表 15 には、本量産試作をもとに施工費まで含め算出した開発品コストと既存品コストの比較表を示す。既存の化粧合板に対し、住宅 1 戸当たり 3,390 円の

コストアップとなる。本経済性での評価では、補強棧の効果は見込んでいないが、剛性が高くなっている点から、下地施工における効果は大きいと予想できる。また、ガラス不織布には、様々なデザインがあり、住宅デザイン多様化には、既存の化粧合板よりも対応力が高いと判断できる。これらメリットを除いても、後述するライフサイクルコストで評価すると、使用者にてコスト回収は可能である。

表 15 開発品と既存品のコスト比較

項目	使用量	単価	原価	備考			
開発品	変動費	ガラス不織布	1.8 kg/戸	9,916 円/kg	18,047 円/戸	市販ガラス不織布相場より	
		エポキシ樹脂	2.9 kg/戸	500 円/kg	1,430 円/戸	市販エポキシ樹脂相場より	
		CNF	0.5 kg/戸	1,000 円/kg	520 円/戸	中期的CNF価格を想定	
		合板	93.3 kg/戸	100 円/kg	9,330 円/戸	モ/タロウ価格より	
		副資材	5.2 kg/戸	20 円/kg	104 円/戸	梱包資材等	
		電力	28.6 kW/戸	16 円/kwh	458 円/戸	使用電力=5.5kW/kg	
		計			29,889 円/戸		
		固定費	償却費	5.2 kg/戸	49 円/kg	255 円/戸	投資額(含履機、プレス成型機、乾燥機他=300百万円)
		人件費	5.2 kg/戸	24 円/kg	125 円/戸	2名×600万円/名	
		管理費等	5.2 kg/戸	30 円/kg	156 円/戸		
		計			536 円/戸	生産量500kg/日	
		製造原価				30,424 円/戸	変動費+固定費
		販管費				4,564 円/戸	製造原価×15%
施工費	職人的人件費	2.0 日/戸	10,000 円/人/日	20,000 円/戸	軽量化による施工効率改善+クロスレス		
計				54,988 円/戸			
既存品	化粧合板	124.4 kg/戸	254 円/kg	31,598 円/戸	モ/タロウ価格+化粧合板		
	施工費	職人的人件費	2.0 日/戸	10,000 円/人/日	20,000 円/戸		
	計			51,598 円/戸			
コスト比較(開発品-既存品)				3,390 円/戸			

2) 高断熱グラスウール

A 概要

量産 (実用化) に則した条件で、CNF 添加高断熱グラスウールの量産試作を実施した。この量産試作品の熱伝導率は、 0.038W/mK で、目標値 (0.045W/mK) を確保した。さらに、経済性を確保できる仕様 (使用材料、配合、生産設備および生産能力) を確立した。以下には、その詳細を示す。

B 量産試作および量産試作品の評価

a 原材料

グラスウールとは、リサイクルガラスを主原料に高温で溶解し綿状に繊維化した、細い繊維の集まりを指す。この細い繊維が絡み合ってグラスウール中に連続空気室を作り出す。連続空気室の中では空気が静止して動かないため熱が移動しにくく、高い断熱性能を発揮するとされる。今回は、図 66 に示す、市販のグラスウール断熱材 (マットエース 16、旭ファイバーグラス株式会社) を用いた。1枚あたりの寸法は、厚さ 100mm、幅 430mm、長さ 2740mm であり、密度は 0.016g/cm^3 である。なお、製品の熱伝導率は 0.045W/mK (公称値) である。CNF として、実用化を想定し、市販されている CNF (BiNFi-s、Wma-10010、スギノマシン) を用いた。水で希釈し、 $0.25\text{wt}\%$ に調整した。



図 66 使用したグラスウール断熱材

b 量産試作

CNF 添加高断熱グラスウールは、グラスウール上部から CNF 懸濁液を散布浸透し、乾燥するだけの極めて簡単な工程により生産可能である。グラスウールは軽量であるため、量産装置は既存の汎用装置・部品を組み合わせる比較的安価に製造可能である。今回の量産試作に用いた装置は(1)-①-ア-1) 高断熱セルローズ系断熱材の量産試作に用いたものと同じものである。図 67 に CNF が散布されたグラスウール断熱材を示す。



図 67 CNF が散布されたグラスウール断熱材

コンベアのインバーター(送り速度)および圧送タンクの圧力調整により、CNF スラリーの塗布量を 6l/m^2 とし、量産試験を行った結果、今回使用した寸法(厚さ 100mm、幅 430mm、長さ 2740mm)のグラスウールでは 40 枚/時間の CNF 塗布が可能であった。付帯作業を含め、本装置を用いて 180 枚程度のグラスウールへの CNF 添加が 1 日(7 時間)で可能と考えられる。その後、24 時間の乾燥工程を経るため、1 日あたりの生産能力は実験段階で 90 枚(1 ライン)である。

C 経済性の評価

表 16 には、本量産試作をもとに施工費まで含め算出した開発品コストと既存品コストの比較表を示す。既存のグラスウールに対し、住宅 1 戸当たり 7、778 円のコストアップとなる。これは、セルローズ系断熱材同様、CNF 塗布工程が追加されたことが要因である。しかしながら、後述するライフサイクルコスト

で評価すると、使用者にてコスト回収は可能である。また、前項の高剛性化粧合板の結果から、この部位にあえてCNF利用のグラスウールを使用しなくても、高剛性化の効果を活かし、コストアップの少ない断熱材使用量増加による対応も可能となる。

表 16 開発品と既存品のコスト比較

項目	使用量	単価	原価	備考	
					開発品
変動費	グラスウール	111.1 kg/戸	1,726 円/kg	191,759 円/戸	モ/タロウ価格より
	CNF	2.8 kg/戸	1,000 円/kg	2,778 円/戸	中期約CNF価格を想定
	計			194,536 円/戸	
現場施工のため発生せず					
固定費	職人人件費	2.5 日/戸	10,000 円/人/日	25,000 円/戸	CNF塗布工程を含む
	計			219,536 円/戸	
既存品	グラスウール	111.1 kg/戸	1,726 円/kg	191,759 円/戸	モ/タロウ価格より
	施工費	20 日/戸	10,000 円/人/日	20,000 円/戸	
	計			211,759 円/戸	
コスト比較(開発品-既存品)				7,778 円/戸	

イ 天井部品としての評価

1) 天井部品の試作

A 概要

量産スペックの天井構成素材を用い、モデルルーム評価用の天井部品の試作を実施した。この部品の熱貫流率は $0.18\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 以下で目標値 ($0.22\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) を確保した。以下にはその詳細を示す。

B 天井部品の試作および性能評価

天井部品の製作は、各種天井構成素材とスギ枠材を用いて厚さ $100\text{mm}\times$ 幅 $900\text{mm}\times$ 高さ $1,800\text{mm}$ のパネル化することにより作製し、テストハウス室内天井下面に取り付け固定した (図 68)。

実証区 (西部屋) に高断熱グラスウール (24K 相当) を用いた天井部品を、対照区に既存標準製品 (10K 相当) を用いた外壁部品を取り付けた。実証区、対照区における天井部品の断面構成を表 17 に示す。



図 68 天井部品 (パネル) 作成と取り付けの様子

表 17 天井部品の断面構成

		室内側 ←	→ 天井側
実証区 (西部屋)	天井壁(5mm)	断熱層 (10mm)	
	CNF補強高剛性化粧合板	CNF添加高断熱 グラスウール (24K相当)	
対照区 (東部屋)	天井壁(5mm)	断熱層 (10mm)	
	既存化粧合板	既存標準グラスウール (10K相当)	

2) モデルルーム評価

A 概要

試作部品を用いモデルルームに施工し、実測評価を実施した。なお、既存部品との比較においては、外皮部品および(2)①の内壁部品を施工した状態で実測評価を実施した。また、モデルルーム設置に関しては、住宅メーカーに依頼し、施工における課題点、改善点のヒアリングを実施した。部品の構成が同じである点から既存部品とハンドリング面で同等である回答を得た。以下には、その詳細を示す。

B モデルルームでの評価

a 施工方法

(1) -②-イ-1) -B で説明した方法により、実証区、対照区両室の天井全面にそれぞれ天井部品 (パネル) をビス止めした。

b 既存品との施工性の比較

実際には天井板の裏側 (小屋裏) からの敷設となるが、いずれにせよ既存品と施工性はなんら変わらないと考えられた。

c 省エネ効果の検証

天井部品取り付け後のテストハウス両室 (西部屋：実証区、東部屋：対照区) の気温 (TA) 変化推移の一例 (72 時間) を図 69 に示す。図に示すように両室の TA は屋外 TA の変動に準じてほぼ同様に変動しており、明確な差は見られない。また、両室中央部で測定したグローブ温度 (TG) についても同様に両室 TG の変動に明確な差は見られなかった (図 70)。

図 71 には実証区と対照区における天井部品表面で測定した熱流変動を、図 72 に天井部品表面温度変動を示す。図に示すように部品表面上の熱流、温度とも TA、TG 同様実証区と対照区に大きな違いは見られず、天井裏の断熱材性能の違いが表面温度特性に反映されていない。これは、今回施工した天井部品の上部に既存の断熱天井構造が存在し、小屋裏環境との熱伝達がほとんど生じていないことが原因と考えられる。つまり、今回の施工・測定条件では室内側の気温変動と部品表面の熱伝達状況が測定されており、天井部品については実証区と対照区で差がないことを示している。これは天井部品の表面材がいずれも同じ合板であることに起因していると考えられた。

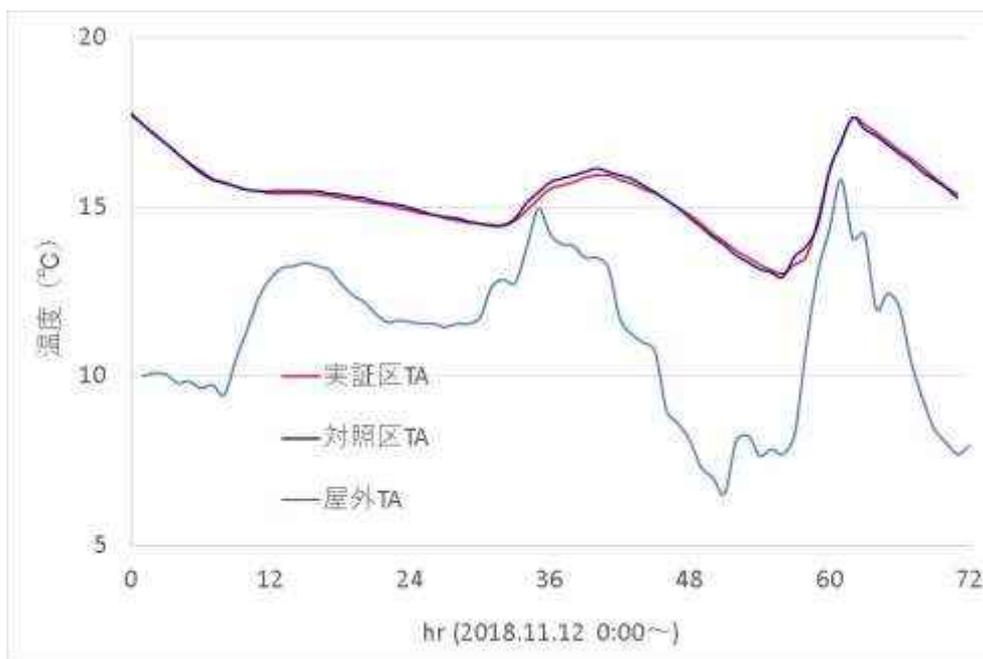


図 69 テストハウス両室および室外気温 (TA) 変化

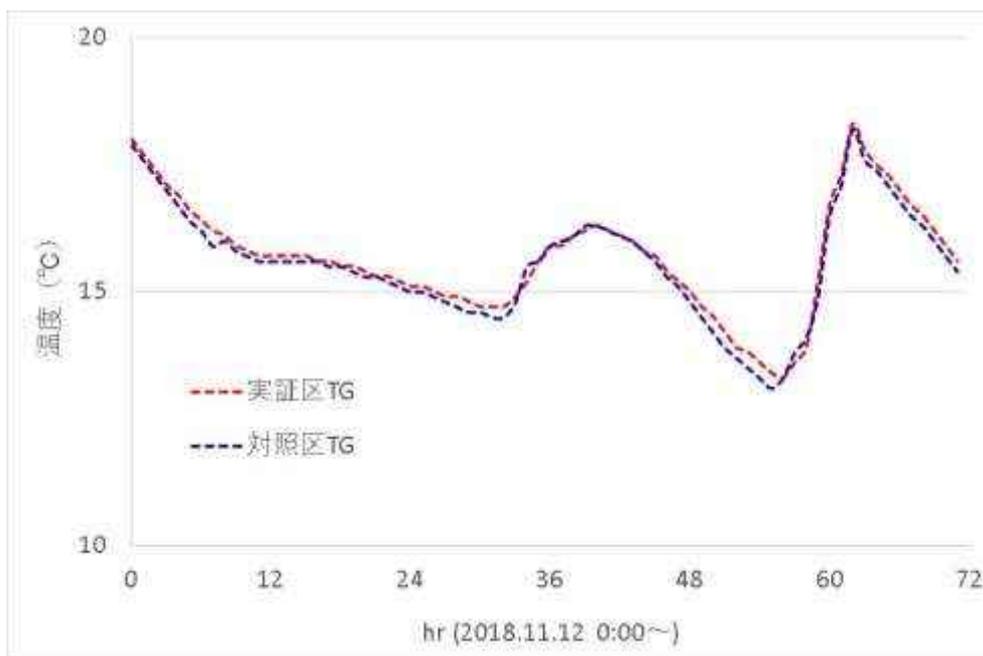


図 70 テストハウス両室のグローブ温度 (TG) 変化

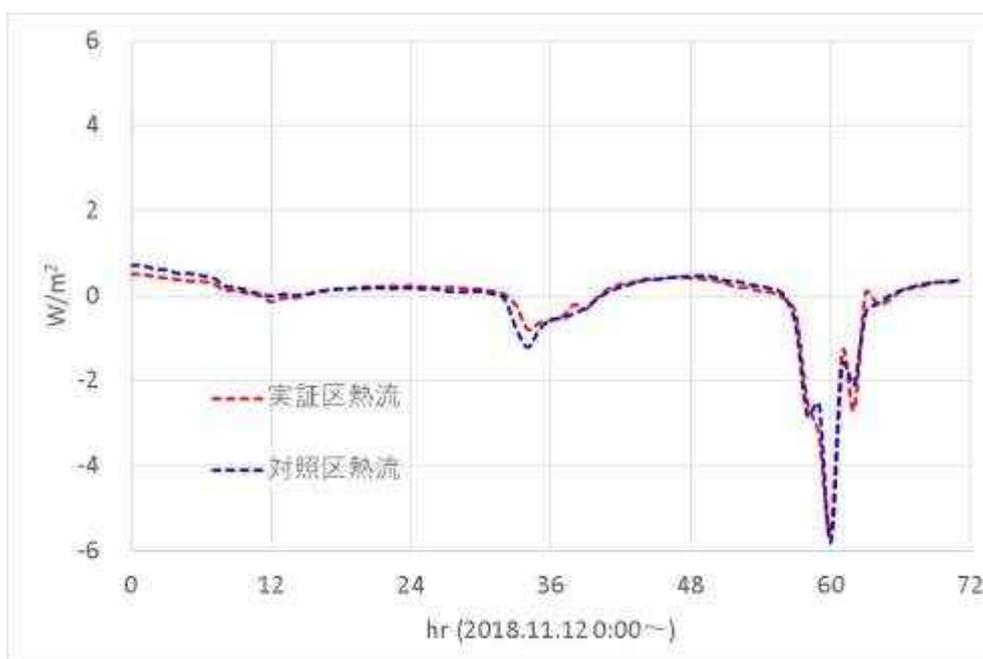


図 71 テストハウス両室における天井部品表面の熱流変化

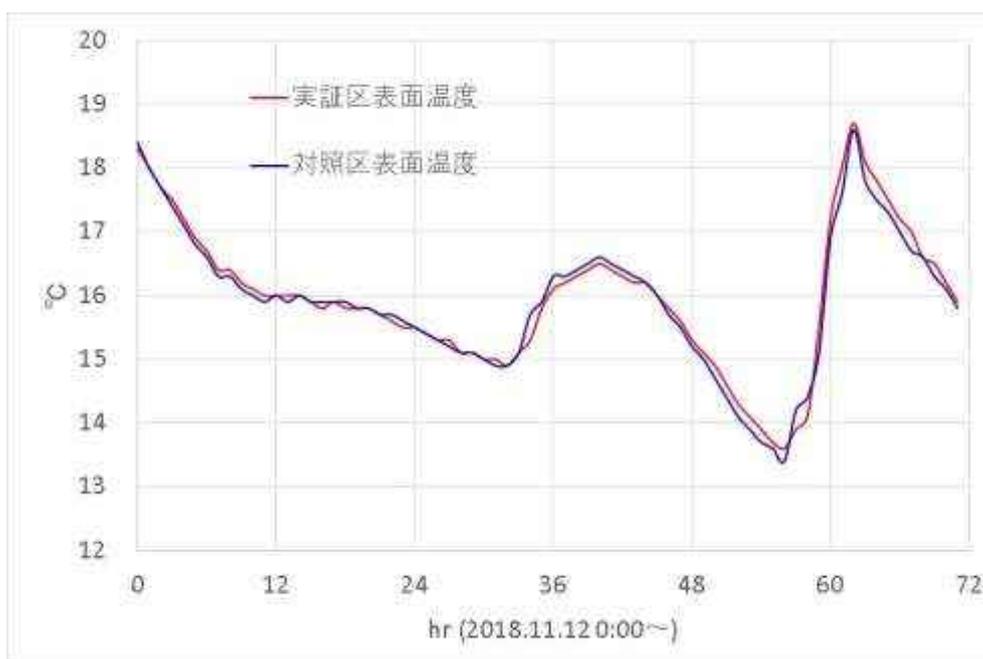


図 72 テストハウス両室における天井部品表面の面温度変化

電力削減効果については(1)-①-イ-2) を参照のこと。

d 住宅メーカーのヒアリング結果

今回施工を担当した真庭市内工務店へのヒアリングの結果、天井板、グラスウールともに既存品と比較して施工時の扱いやすさは変わらないと思われる旨の回答を得た。

③床部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 床構成素材の試作

1) 高断熱 WPC フロア

A 概要

量産 (実用化) に則した条件で、CNF 添加高断熱 WPC フロアの量産試作を実施した。この量産試作品の熱伝導率は、 0.085W/mK で、目標値 (0.120W/mK) を確保した。さらに、経済性を確保できる仕様 (使用材料、配合、生産設備および生産能力) を確立した。以下には、その詳細を示す。

B WPC フロアに用いる発泡剤特性の基礎調査

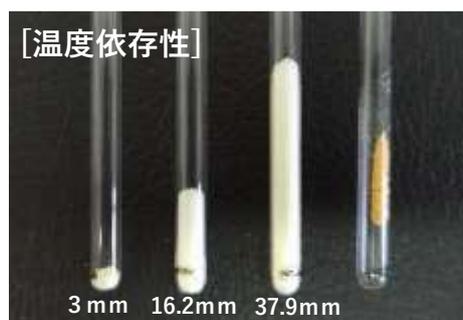
WPC フロアに用いる発泡剤は温度に依存して自己膨張する。つまり、WPC を発泡させる上で、成形プロセス中の温度制御を注意深く行う必要があると想定される。そのため、発泡剤の発泡状態の温度依存性を把握しておくことは、成

形条件を決定する上で重要である。そこで、以下の簡易的な実験によって、発泡剤の発泡特性の調査を行った。

本プロジェクトでは WPC フロアに断熱性を付与するために、WPC を発泡させることに着目した。本プロジェクトにて使用した発泡剤は自己膨張性マイクロカプセルの発泡剤マスターバッチ（積水化学工業株式会社製、アドバンセル P501E1）である。本発泡剤は温度に依存してカプセル内のガスが膨張することで発泡する特性を持ち、均一発泡が可能である。PE ベースの未発泡ペレットでカプセル含有量は約 50wt%、平均粒径は 21~31 μm 、膨張開始温度は 160~180 $^{\circ}\text{C}$ 、最大膨張温度は 210~230 $^{\circ}\text{C}$ である。

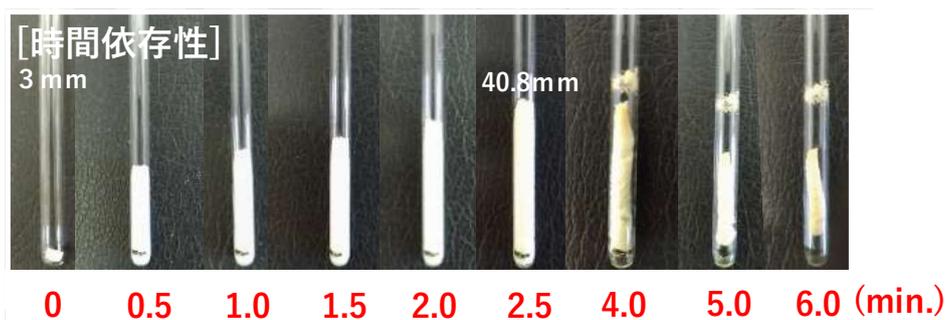
発泡剤ペレットの直径と同等の試験管を準備し、室温下にて未発泡ペレット 1 粒を試験管の中に投入した。温度調整が可能なオープン内に、未発泡ペレットが入った試験管を投入した。実験は (i) 温度依存性（時間を 5 分に固定）、(ii) 時間依存性（温度を 210 $^{\circ}\text{C}$ に固定、 Δt 秒後に試験管を取りだして再度オープンへ投入する動作を繰り返す）の二つの条件下にて行い、それぞれの発泡度合を試験管の長さから簡易的に評価を行った。

図 73 の (a) に発泡剤の温度依存性の結果及び、(b) に 210 $^{\circ}\text{C}$ 下における発泡剤の時間依存性の結果を示す。なお、図中の試験管に記した黒のラインは発泡前の位置を示している。温度依存性については、160 $^{\circ}\text{C}$ ではほぼ発泡しておらず、180 $^{\circ}\text{C}$ 付近から発泡が開始し、200 $^{\circ}\text{C}$ 付近で最大の発泡状態を示し、220 $^{\circ}\text{C}$ では黄変し収縮する結果が得られた。これは、発泡剤のシェルが過度に膨張すると、破裂若しくはガスの抜けが生じることを示している。さらに、210 $^{\circ}\text{C}$ 下における時間依存性については、比較的高温にも関わらず、2.5 分までは膨張し続け、4 分以降から収縮の開始が確認された。以上の結果から、180 $^{\circ}\text{C}$ 以上の成形が望ましいと考えられるが、200 $^{\circ}\text{C}$ を超えると発泡剤の膨張速度が上昇し、収縮するまでの時間が短くなるということが判明した。また、200 $^{\circ}\text{C}$ を超えると WPC 中の CNF・木粉の熱分解が進行し、WPC の機械的物性の低下にもつながる。これは、WPC の発泡において、成形機内の温度制御が非常に重要であると共に、滞留時間も重要な因子となることが判明した。



160°C 180°C 200°C 220°C

(a)



(b)

図 73 発泡剤の発泡特性； (a) 温度依存性、 (b) 時間依存性

C WPC フロア材の射出発泡成形最適化のためのパラメータ因子の抽出

a 射出成形を用いた WPC フロアの試作

本プロジェクトでは、WPC フロアの生産方法として射出発泡成形と押出発泡成形について検討を行った。ここでは、主に射出発泡成形について取り扱う。射出発泡成形では、金型内に熔融樹脂を流し込んだ後に、金型容積を拡大させることで、材料内部の気泡が成長し、発泡成形体を得られる成形方法（コアバック法）であり、複雑な形状の WPC 成形品を得ることができる。また、成形を実施するためには、用途に合わせて WPC の木粉濃度を調整する必要がある。濃度調整には同方向回転二軸押出機が有効であり、WPC マスターバッチに希釈用 PP を加えて混練操作を行う。二軸押出機は連続生産が可能であり、混練性能に優れた成形機である。二軸押出により木粉の濃度調整を行った WPC ペレットと発泡剤をドライブレンドし、射出成形機及び単軸押出機のホッパー部に投入することで、WPC 発泡成形品の成形が可能となる。これらの成形方法の概要図を図 74 に示す。

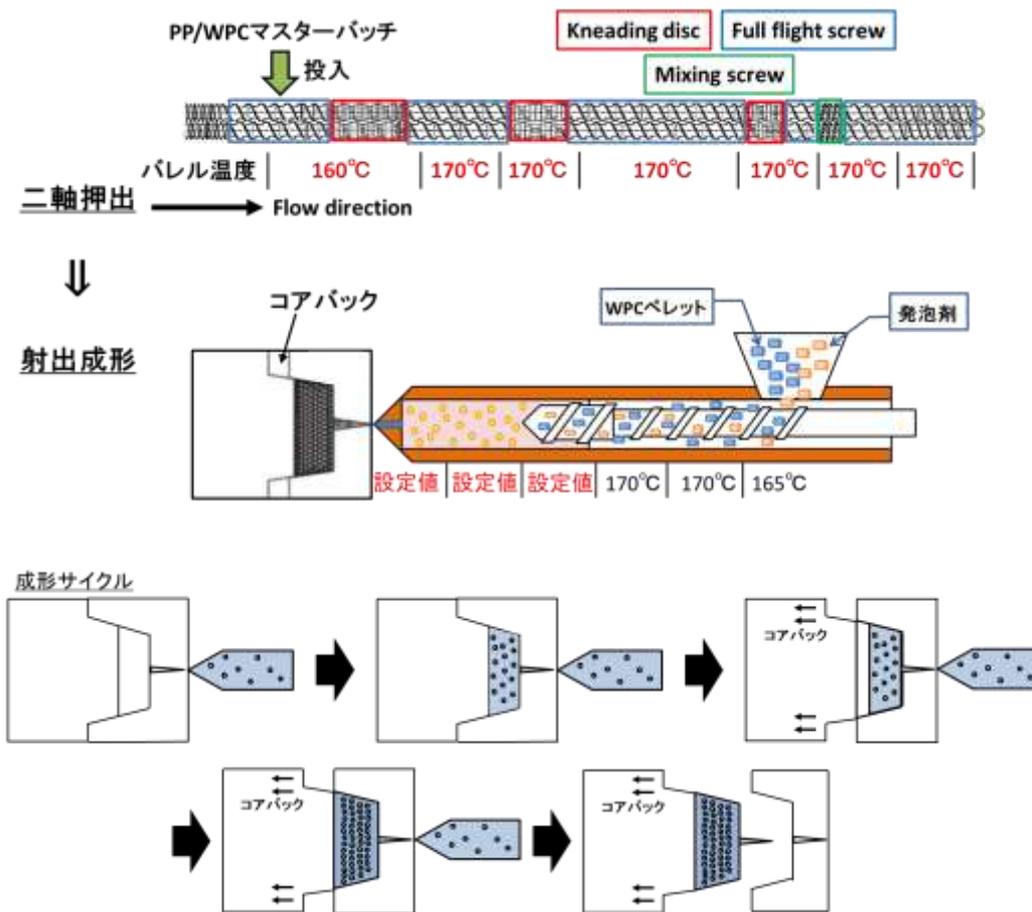


図 74 マスターバッチ希釈方法と射出発泡成形方法の概要図

WPCの射出発泡成形において、生産スペックの最適化のために、発泡特性に大きく影響を与える成形パラメータを明らかにすることを目的とした。前述した様に、本プロジェクトで使用する発泡剤は成形中の温度と滞留時間に依存する。そのため、射出成形射出発泡成形技術を中心に生産スペックの最適化を目的とし、発泡特性に対する成形パラメータの影響及びWF含有率、発泡剤の添加量の影響を調査した。ここでは実験計画法を用いて、発泡特性に影響を及ぼすと考えた成形パラメータ4因子(コアバック量、スクリュ回転数、シリンダ温度、金型温度)及び2因子(発泡剤添加量、木粉含有率)の合計6因子を選出し、各要因の割り付けを行った。その要因割り付けを行ったL18直行表を表18に示す。発泡後の材料評価として、密度(発泡倍率)・断熱特性・機械的強度(曲げ)・振動特性を中心に評価を行った。実験計画法より、発泡特性に最も影響を与える因子の抽出を行った。

表 18 実験計画法を用いた要因の割り付け

	発泡剤 (phr)	木粉含有率 (wt%)	CB 量 (mm)	回転数 (rpm)	シリンダー温度 (°C)	金型温度 (°C)
Case 1	5	0	1.5	60	170	40
Case 2	5	0	2.0	100	190	60
Case 3	5	0	2.5	140	210	80
Case 4	5	25	1.5	60	190	60
Case 5	5	25	2.0	100	210	80
Case 6	5	25	2.5	140	170	40
Case 7	5	35	1.5	100	170	80
Case 8	5	35	2.0	140	190	40
Case 9	5	35	2.5	60	210	60
Case 10	10	0	1.5	140	210	60
Case 11	10	0	2.0	60	170	80
Case 12	10	0	2.5	100	190	40
Case 13	10	25	1.5	100	210	40
Case 14	10	25	2.0	140	170	60
Case 15	10	25	2.5	60	190	80
Case 16	10	35	1.5	140	190	80
Case 17	10	35	2.0	60	210	40
Case 18	10	35	2.5	100	170	60

WPC 製作素材として、CNF 入り木粉 (以下 WF) マスターバッチを使用し、マスターバッチ中の組成配合率は、WF : 68.1 wt%、PP : 29.2 wt%、MAPP : 2.7 wt%である。また、マスターバッチ希釈樹脂として、汎用樹脂の PP (株式会社プライムポリマー製、J107G) を使用した。使用した PP はホモポリマーであり、粘度は MFR=30 g/10 min である。発泡剤には発泡剤マスターバッチ (積水化学工業株式会社製、アドバンセル P501E1) を使用した。

初めに、同方向回転二軸押出機 (Coperion GmbH 製、ZSK18MEGALab、スクリュ径 18mm、長さ 720mm) を用いてマスターバッチと希釈用 PP を混練し、WF 濃度 25wt%、35wt% のペレットを作製した。表 18 の条件に合わせて、所定の量の発泡剤と希釈ペレットをドライブレンドし、材料の調製を行った。射出発泡成形には射出成形機 (東洋機械金属株式会社製、Si-180-6) を用いた。金型内のキャビティは直径 150mm、初期厚み 2mm の形状を有しており、コアバックが可能な金型を用いた。シリンダー温度は、図 74 に示す様に、6 ゾーンに分け

て制御が可能であり、ホッパー部では発泡温度以下の 170℃に設定し、先端 3 ゾーンを所定の温度に設定した。コアバック開始時間は金型内に樹脂流入後直ちに開始し、コアバック速度は装置の最大速度に設定した。コアバックの開き量は金型の開き量が 1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm になるように設定し、コアバック終了時間はそれぞれ 0.15 秒、0.17 秒、0.17 秒とした。また、各条件 1~18 に対して、コアバックさせずに成形したサンプルを「未発泡サンプル」として作成を行った。参考に、計量⇒射出⇒コアバック⇒冷却⇒離型に要した時間 (サイクルタイム) は全て 39 秒程度であり、未発泡サンプルのサイクルタイムは 47 秒程度であった。

発泡倍率の算出については、以下の手順にて測定を行った。アルキメデス法により、後述する熱伝導率の測定に使用した 50 mm×50 mm の試験片の密度を、未発泡材料と発泡後材料の各試料につき 3 枚測定した。これらの測定した密度値を用いて、発泡前と発泡後の密度の比である、 $(\text{発泡前密度}/\text{発泡後密度}) \times 100$ として発泡倍率を算出した。

断熱性の評価には、図 75 に示すサーモラボ (カトーテック株式会社製、KES F-7) を用いて熱伝導率測定を行った。測定用の試験片は直径 150 mm の円盤形状のサンプルの中央部スプル部分を避け、電動のこぎりを用いて 50 mm×50 mm に切り出し、各試料につき 3 枚作製した。熱伝導率測定用試験片の切り出し位置を図 76 に示す。測定方法としては、水冷ボックスを室温 (20℃) にセットし、試験片をその上に載せ、さらにその上に熱板 (40℃) を試料に合わせて重ねた。その後、熱流損失および温度が安定するまでその状態を維持し、その時の試料面の温度差、熱流損失から熱伝導率を算出した。

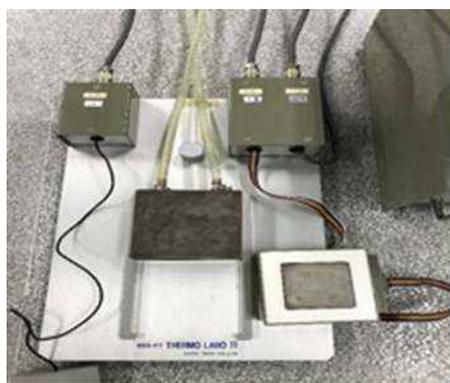
曲げ特性を評価には、精密万能試験機 (株式会社島津製作所製、AG-1) を用いて 3 点曲げ試験を行った。測定用の試験片は、円盤形状の試験片を 80 mm×10 mm の形状に切り出し、各試料につき 5 枚作製した。また切り出し位置を図 77 に示す。ここで支点間距離を 64 mm、試験速度を 5 mm/min として、曲げ強度および曲げ弾性率を測定した。

振動特性については床材の振動特性の一つである減衰特性に着目し、減衰特性の評価指標の一つである損失係数を用いて床材の振動特性を評価した。本報告では、動的粘弾性測定装置 (UBM 社製 Rheogel-400) を使用し、作成した床材の損失係数を計測する。木材の疲労現象として損失係数の変化が見られることが報告されており、損失係数を評価することで振動特性だけでなく耐久性能も評価できると考えられる。実験試料には、実験計画法を用いて作成した様々な仕様の試料 (全 18 条件、表 18 参照) を用いた。試作した各試料から測定用のサンプルを切出し、試料の寸法はノギスを用いて計測し、試料内 3 箇所計測した厚みと幅の平均値を損失係数の算出に用いた。代表的な試験片の寸法を図 78

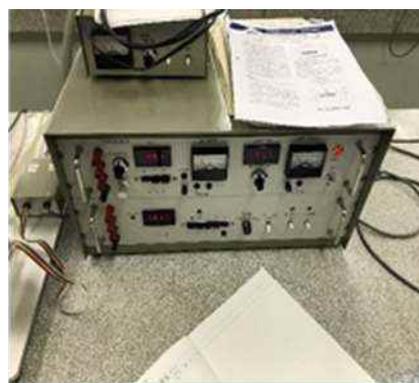
に示す。表 18 に示した各条件について、3 本の試料を用意し、試験を実施した。試験実施時の測定条件を表 19 に示す。歪振幅の大きさは床材に加わる衝撃を想定して決定した。衝撃曲げ試験に関する報告を参考に、歩行時の衝撃歪を約 $2\mu\text{m}$ と試算し、飛び跳ね時は衝撃が約 4 倍となることから、 $8\mu\text{m}$ までの歪振幅を計測区間とした。 $2\sim 8\mu\text{m}$ の区間において、 $1\mu\text{m}$ ごとに、各歪振幅における損失係数を計測した。

表 19 動的粘弾性試験条件

測定モード	基本周波数	測定治具	制御方式	測定区間
歪み依存性	10Hz	引っ張り	初期歪制御 (設定値 0.001mm)	$2\sim 8\mu\text{m}$



(a)



(b)

図 75 熱伝導率測定装置

(a) 熱板および水冷ボックス (b) インディケータ

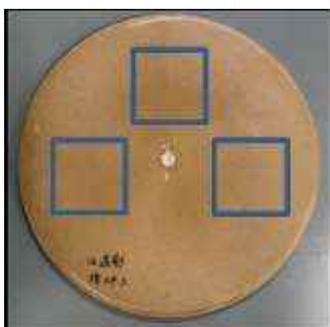


図 76 熱伝導率測定用試験片の切り出し位置

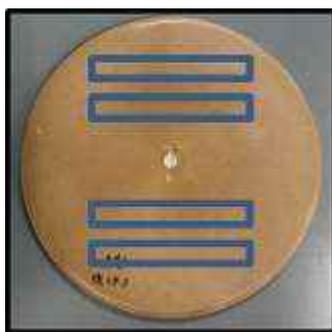


図 77 曲げ試験片の切り出し位置

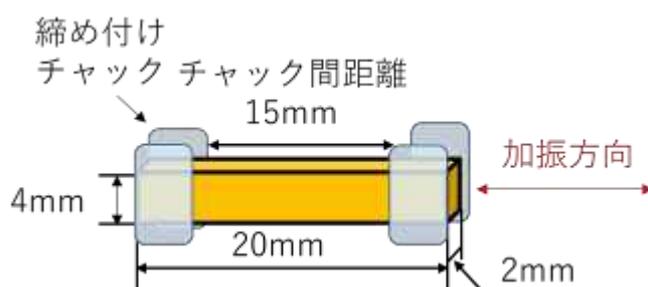


図 78 本報告の動的粘弾性試験における試験片寸法の代表例

b 実験計画法により作成した射出発泡 WPC の性能評価

実験計画法に基づき行った射出発泡成形において、断熱特性・曲げ特性・発泡性に関する各要因効果の結果のまとめを図 79 に示す。各結果については各以下の項目にて述べる。

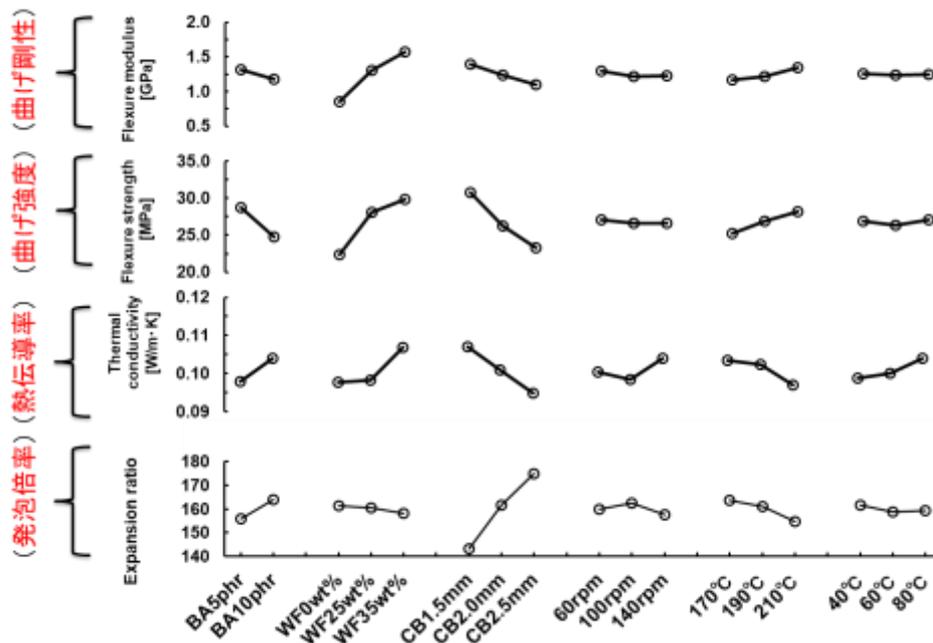


図 79 断熱性・曲げ特性・発泡性に関する要因効果

・発泡性 (発泡倍率)

泡剤添加率、木粉添加率の影響について、実際の発泡倍率の結果について示した結果を図 80 に示す。発泡剤添加量の増加に伴い、発泡倍率は大きく増加し、木粉添加率の増加に伴い、僅かながら発泡倍率が減少する (若しくはほぼ変化しない) 傾向を示した。射出発泡成形では、限られた金型容積空間にて PP 樹脂部に存在する発泡剤が膨張して発泡すると考えられるため、発泡剤の添加量の増加に伴い発泡部分が増え、木粉量増加に伴い、発泡可能な領域が減少し、木粉の存在により発泡倍率が減少したと考えられる。

また、成形パラメータの影響については、コアバック量が最も顕著に出ており、次にシリンダー温度の影響が大きい結果となった。これは、コアバック量が増加することで発泡可能な容積が増加することに起因し、シリンダー温度の影響は前述したように発泡剤の温度依存性に起因すると考えられる。射出成形は高速で樹脂を流動させるため、ノズル部分で大きなせん断発熱が発生し、射出時の樹脂温度はシリンダー温度よりも高温になっていることが考えられる。そのため、高倍率の発泡には WPC の融点を少し超える程度の低温成形が望ましいことが判明した。

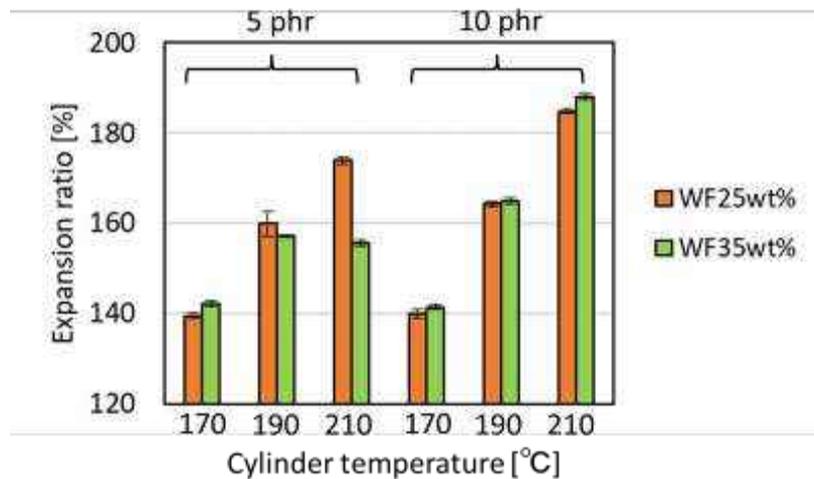


図 80 木粉添加率が発泡倍率に及ぼす影響 (実験計画法を用いた実験において)

・熱伝導率

前項の結果を踏まえ、熱伝導率についての結果を述べる。いずれの条件においても目標値の 0.120W/mK は達成している。まず、WPC の木粉添加率の影響については、木粉添加率の増加に伴い、断熱特性は低下傾向にあった。本項には記載しないが、未発泡サンプルにおいて、木粉添加率の増加に伴い熱伝導率は上昇した。これは、木粉の熱伝導率が PP よりも高いことに起因する。そのため、木粉添加率の増加に伴う断熱特性の低下は、発泡倍率の低下及び、木粉含有率増加に伴う熱伝導率の上昇が影響していると考えられる。また、成形パラメータの影響では、コアバック量の増加に伴い、発泡倍率が上昇したため、断熱特性も向上している結果となった。

しかしながら、シリンダー温度の影響については、シリンダー温度の増加に伴って発泡倍率が大きく低下しているにも関わらず、断熱特性は向上する逆の傾向を示した。この結果について考察するために、表 18 中の Case6、7 (170°Cにて成形) のサンプル及び、Case5、9 (210°Cにて成形) のサンプルを曲げ試験後の破断面の SEM 観察を行った。コアバック方向に垂直な断面のセル構造を倍率 30 倍にて観察した SEM 画像を図 81、図 82 に示す。シリンダー温度 170°C の条件ではスキン層は薄く形成され、コア層では比較的均一で独立気泡が形成されていることが確認できる。対して、シリンダー温度 210°C の条件では構造が大きく異なり、分厚いスキン層が形成され、コア層では空隙が多い連続気泡の構造になっていることが分かる。また Case7 と Case9 の SEM 画像より、170°C と 210°C のスキン層の厚さを測定し比較すると、それぞれ約 $210\ \mu\text{m}$ 、 $520\ \mu\text{m}$ で二倍以上の差異があった。

さらに、倍率 250 倍にて観察した画像を図 83、図 84 に示す。170°C では低倍

率の際にも確認できた均一なセルが形成されていた。対して、210℃では発泡剤の破泡などにより空隙が多く、セルを形成していても形状やサイズのばらつきが大きかった。また、セルの表面やセル周辺の樹脂部分において、小さい気泡のようなものが点々と存在しているのが確認できた。このような気泡は、シリンダー温度 170℃や 190℃の試験片には存在していない。この気泡は、シリンダー温度 210℃という高温下で熔融混練されることにより、木粉が熱分解を起し生じたものであると考えた。この熱分解によって試験片内で、水蒸気が微細な気泡構造となり、断熱性の向上に影響したと考えられる。

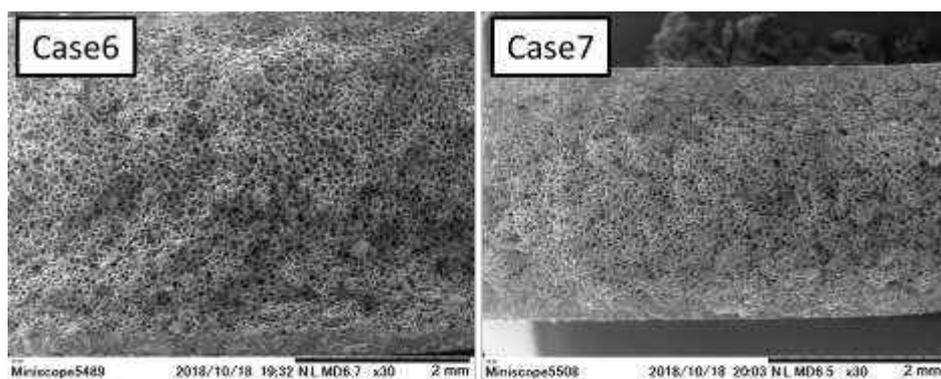


図 81 シリンダー温度 170℃時の曲げ破断面 (30 倍)

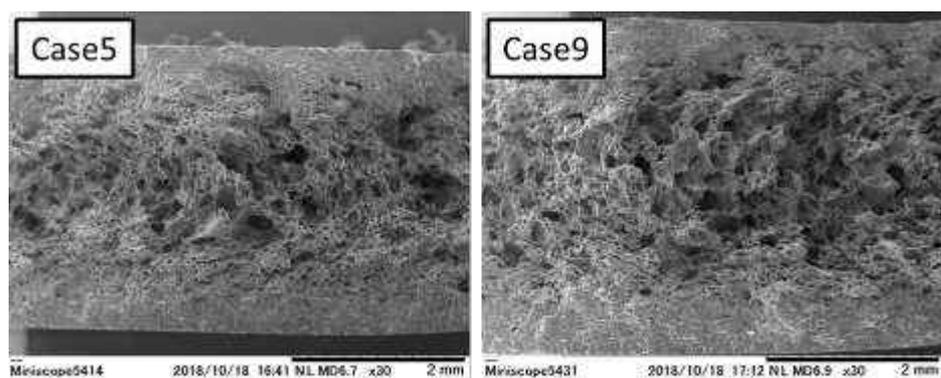


図 82 シリンダー温度 210℃時の曲げ破断面 (30 倍)

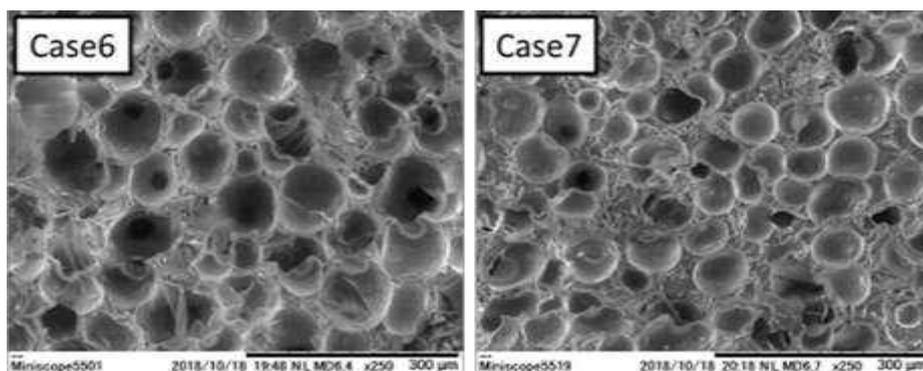


図 83 シリンダー温度 170°C時の曲げ破断面 (250 倍)

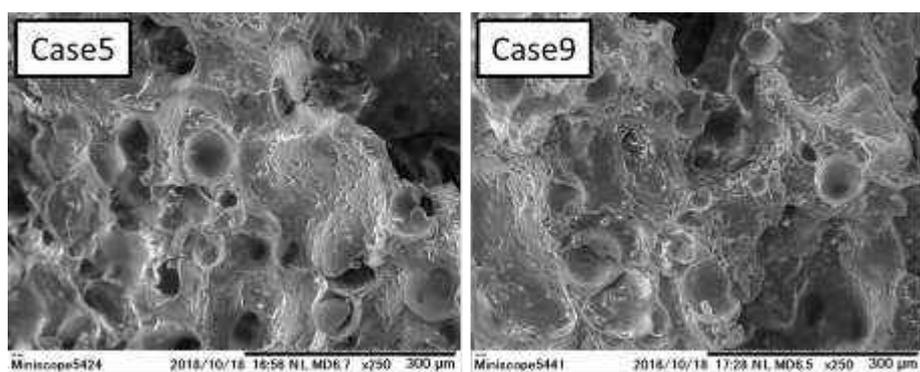


図 84 シリンダー温度 210°C時の曲げ破断面 (250 倍)

・機械的特性

曲げ試験を行った結果について報告する。図 79 より、シリンダ回転数および金型温度に及ぼす成形条件の影響は見られなかった。一方で、発泡剤の添加量およびコアバック変位が増加したとき、曲げ特性が低下することが分かった。これは、発泡倍率の増加と曲げ特性は相反関係にあることを示している。しかし、木粉含有率およびシリンダー温度が増加したとき、曲げ特性が増加することが分かった。図 81～84 の SEM 画像に示すように、射出発泡成形体はソリッドスキン層と発泡コア層からなり、スキン層の厚みが大きく異なることから、曲げ特性に大きな影響を及ぼしていることが考えられた。

発泡剤の添加の影響については、発泡剤の添加量が増加したとき発泡コア層のセルの数が増加したため、スキン層厚さが低下し曲げ特性が低下したと考えられた。また、コアバック変位が増加することで発泡コア層のセルのサイズが増加しスキン層が低下したため、曲げ特性が低下したと考えられた。曲げ試験では引張側で破壊することが確認された。図 85 に各コアバック量における試験片厚さに対する引張側のスキン層厚さの割合を示す。この結果からコアバック変位が増加するに伴い、スキン層厚さが低下していることが分かった。

また、図 86 にそれぞれのシリンダ温度における試験片厚さに対する引張側のスキン層厚さの割合を示す。この図からシリンダ温度を 210℃としたときスキン層厚さの割合が大きく増加していることが分かった。しかし、シリンダ温度に関するスキン層の増加に対して、曲げ特性の増加は小さいことがわかった。この理由については、図 82、84 に示すシリンダ温度を 210℃とした場合の曲げ試験後の破面状態から、発泡コア層のセルが破裂したことが原因であると考察される。また、図 87 に引張側のスキン層の割合と曲げ強度との関係を示す。この図からも曲げ強度に及ぼすスキン層厚さの影響が見られた。以上の理由により、射出発泡成形では、独立気泡を達成し、スキン層の厚みを制御することで、断熱特性を維持しながら、曲げ特性の維持・改善ができると考えられる。

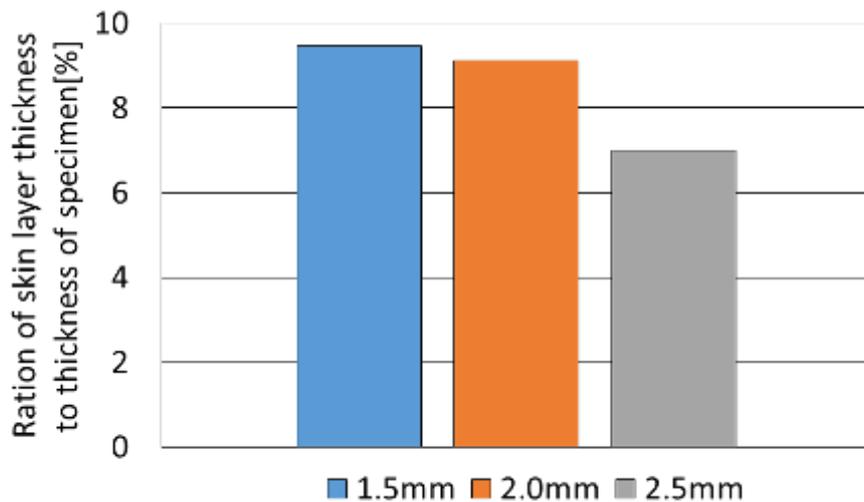


図 85 コアバック量とスキン層の厚みの関係

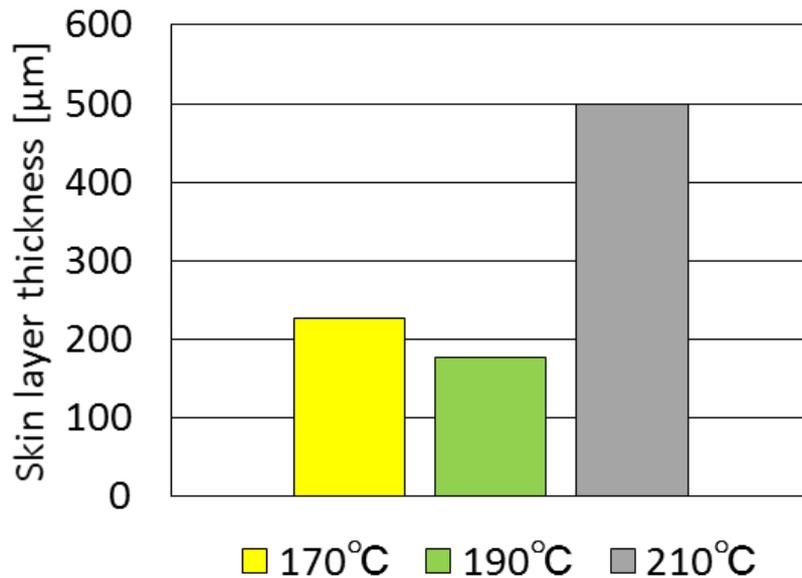


図 86 シリンダー温度とスキン層の厚みの関係 (case7 及び case9)

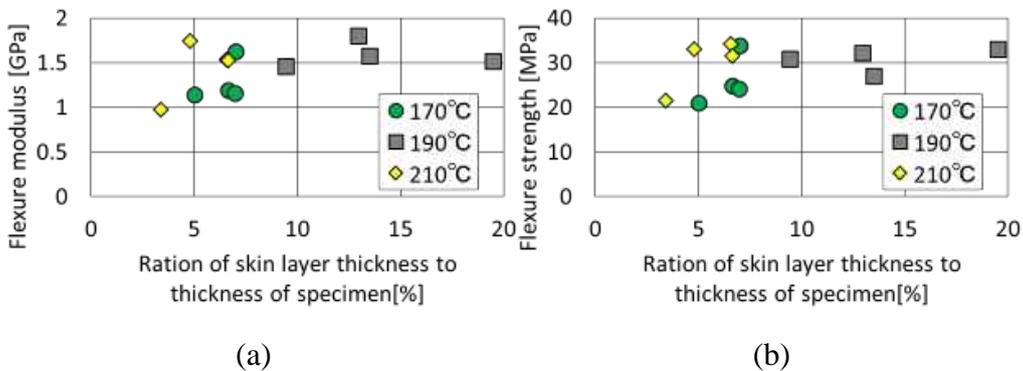


図 87 サンプル中のスキン層割合と(a) 曲げ剛性
(b)曲げ強度 の関係

・ 耐久性・振動特性

振動特性について調査した結果について報告する。本節では機械的特性の一つである振動特性に着目し、材料試作時の仕様と振動特性との関係および、試作した床材の振動特性に関する耐久性を調査した。以下、その詳細を示す。

動的粘弾性試験に得られた損失係数について、歪振幅と損失係数との関係を図 88 に示す。尚、各条件の損失係数は同一条件における 3 本の試料の中央値を示している。材料の仕様の一つである木粉含有量と損失係数との関係を明らかにするため、木粉含有量 0、25、35 wt% の試料を、それぞれ、赤、緑、青の線で示した。加えて、発泡剤添加量と損失係数との関係を明らかにするため、発泡

材添加量が 5、10 phr の条件を各々実線、点線で示した。図 88 より、木粉含有量と損失係数との関係を見ると、歪振幅が低いとき ($4 \mu\text{m}$ 以下) には、木粉含有量が 0 のときに損失係数が高くなり、歪振幅が上昇するに伴い、木粉含有量が 35wt% の条件で、損失係数が高くなる傾向があることがわかった。次に、発泡剤の添加量と損失係数との関係を見ると、添加量に応じた損失係数の差は見られない。以上より、材料仕様と損失係数との関係は、木粉含有量に依存することが示唆された。この木粉含有量に依存した損失係数の違いを明らかにするため、各条件の歪振幅と貯蔵弾性率、損失弾性率との関係を図 89 に示す。貯蔵弾性率は材料の弾性的性質を示し、貯蔵弾性率が低いほど材料は弾性変形しやすいと言える。また、粘性弾性率は材料の粘性的性質を示し、損失弾性率が高いほど減衰性能が高いと言える。図 89 に示した (a) 貯蔵弾性率より、歪振幅が低いときには、木粉含有量が多い条件では、木粉含有量が 0wt% の条件に比べ貯蔵弾性率が大きく、材料の貯蔵弾性率の違いによって、木粉含有量による損失係数の違いが生じていることがわかった。次に図 89 に示した (b) 損失弾性率より、歪振幅が上昇すると、木粉含有量が多いほど、木粉含有量が少ない条件よりも損失弾性率が増加する傾向を示し、損失弾性率が増加することによって木粉含有量による損失係数の違いが生じていることがわかった。

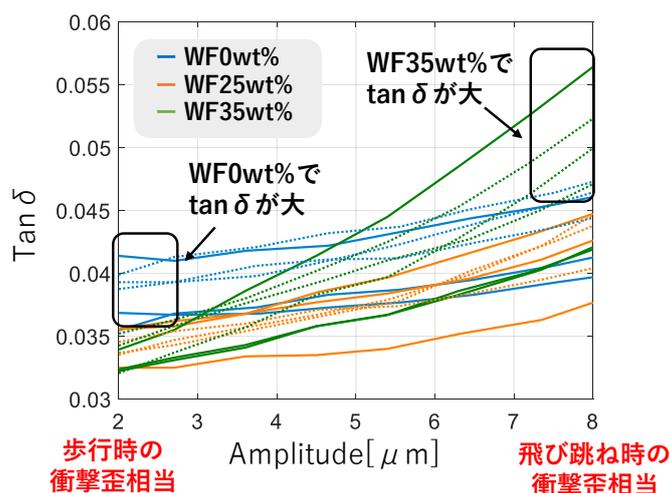


図 88 各条件における歪振幅と損失係数との関係
 実線 (-) は発泡剤添加量 5phr、
 点線 (··) は発泡剤添加量 10phr

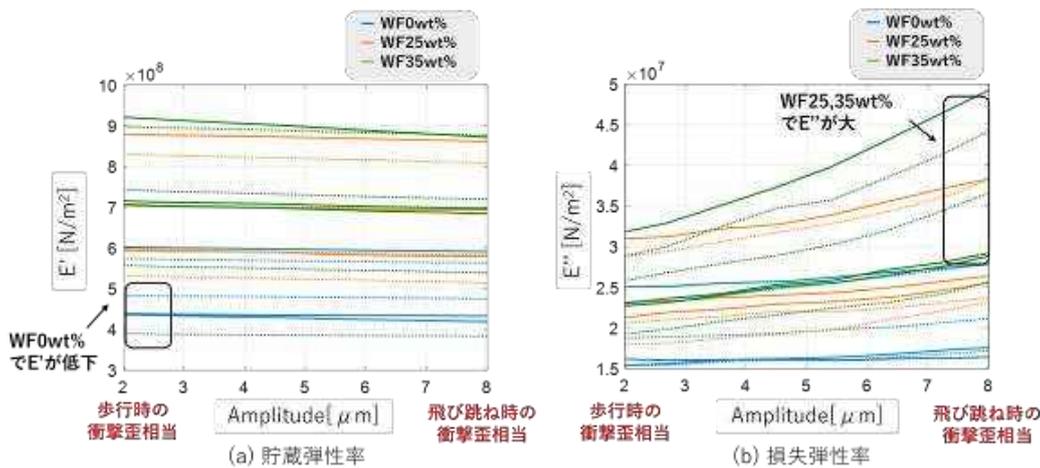


図 89 各条件における(a) 貯蔵弾性率 (b) 損失弾性率

実線 (-) は発泡剤添加量 5phr、
点線 (··) は発泡剤添加量 10phr

続いて、減衰特性の耐久性能を明らかにするために、疲労試験後の材料と試験前の材料の損失係数の差を比較していく。曲げモードにて応力比 0.5、振動数 6Hz、で疲労試験を実施し、試験時間を 3 時間と 6 時間の 2 条件とした。疲労試験を行う試料は、歪振幅に応じた損失係数の上昇を確認できた木粉含有量 35wt%の条件の試料のうち、シリンダー温度を 170°Cと 210°Cの 2 条件の試料を用いた。シリンダー温度の異なる 2 条件に対し、試験時間が異なる 2 条件の試験を実施し、計 4 条件の試料を作成した。作成した各条件の試料について、それぞれ動的粘弾性試験を実施した。試験条件は表 18 と同様であり、各条件について 3 本の試料を用意し、それらの中央値を損失係数の評価対象とした。取得した各条件の損失係数について図 90 に示す。図 90 に示した (a) は表 18 の表内 case7 の結果、(b) は case9 の結果を示す。また、(a)、(b) とともに、図中の黒色の線は疲労試験前の試料の歪振幅に対する損失係数を示し、赤線は 3 時間の疲労試験、青線は 6 時間の試験後の結果を示す。図 90 (a) より、6 時間の疲労試験を実施した損失係数の値が、疲労試験前の結果よりも高くなっていることがわかる。また図 90 (b) より、3 時間、6 時間疲労試験した損失係数の値がともに、疲労試験前の損失係数の値よりも大きくなっていることがわかる。疲労試験後に損失係数の値が大きくなる要因を明らかにするために、貯蔵弾性率および損失弾性率の結果を見ていく。各弾性率の結果について、シリンダー温度 170°Cの条件の結果を図 91 に、210°Cの結果を図 92 に示す。図 91 より、6 時間の疲労試験後の貯蔵弾性率をみると、疲労試験前より低下していることがわかる。また 6 時間の疲労試験後の損失弾性率をみると、歪振幅に依存して損失弾性率が高くなる傾向を示している。次に、図 92 より、3、6 時間の疲労試験後の

貯蔵弾性率をみると、疲労試験前より低下していることがわかる。また 6 時間の疲労試験後の損失弾性率をみると、歪振幅に依存して損失弾性率が高くなる傾向を示している。以上の結果より、疲労試験を行うことにより、材料特性として貯蔵弾性率の低下は見られるが、損失弾性率に関しては、疲労試験前の結果よりも歪振幅に対する損失弾性率の増加の割合が高くなると明らかとなった。これらのことから、木粉含有量を増加することにより、減衰特性が向上し、加えて経年使用により強度の低下は見られる一方で、振動特性は向上することがわかった。

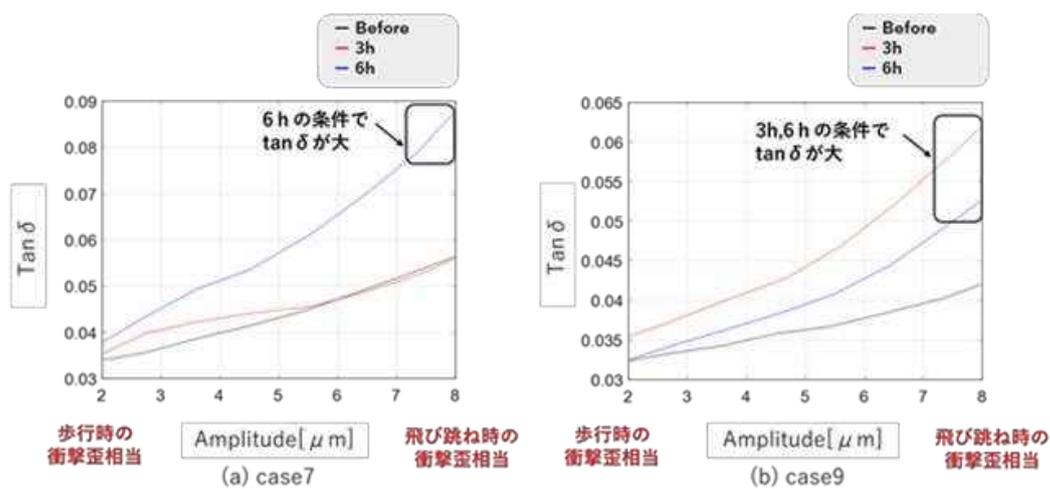


図 90 疲労試験前と疲労試験後の損失係数の比較
(a) case 7 (b) case 9

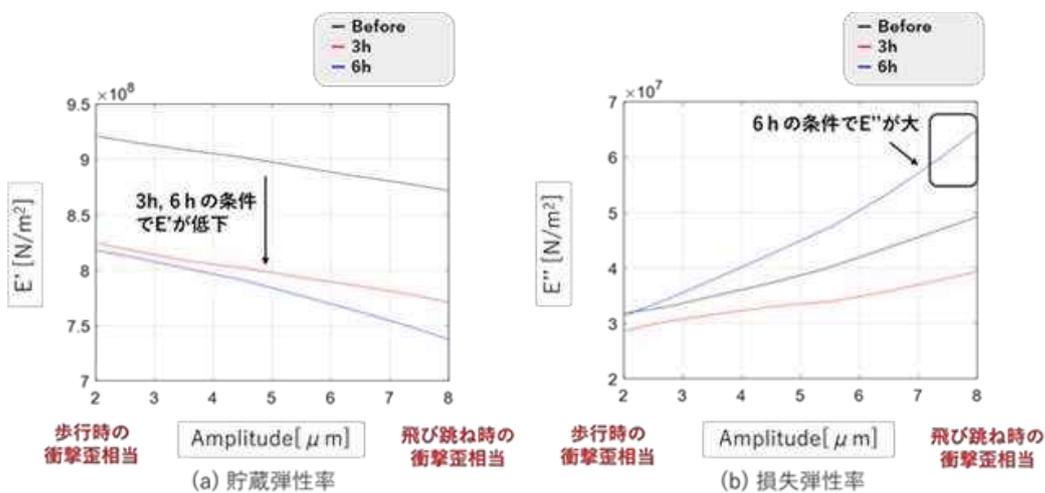


図 91 case7 (170°C) の条件での (a) 貯蔵弾性率と (b) 損失弾性率

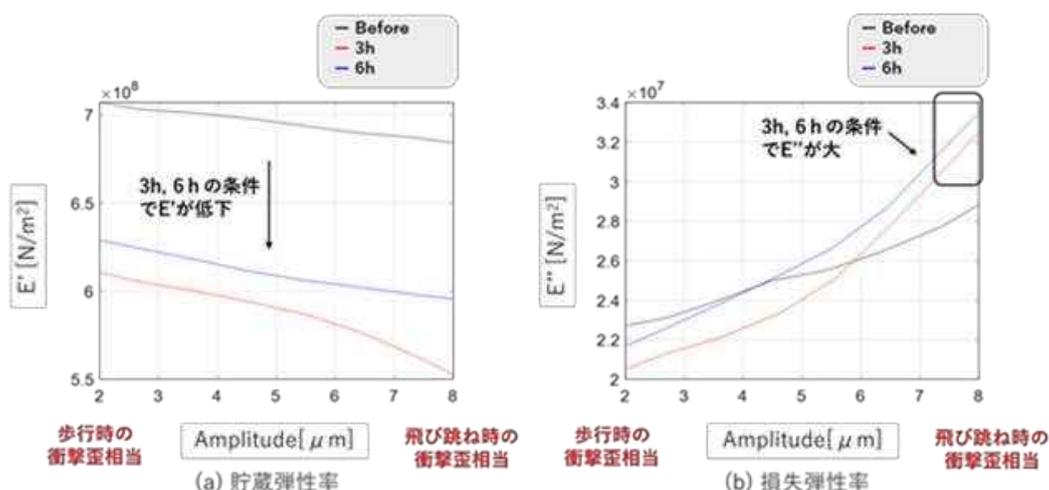


図 92 case9 (210°C) の条件での (a) 貯蔵弾性率と (b) 損失弾性率

・まとめ

本実験では、射出発泡成形におけるコアバック法を用いて、発泡化した WPC フロアの試作を行った。射出発泡成形の最適化を行うために、実験計画法を用いて、発泡特性に影響を与えると考えられる因子を 6 つ (材料側の因子 2 つ、成形パラメータの因子を 4 つ) 選定し、発泡特性・熱伝導率・機械的特性・振動特性について調査した。その結果、以下の点が判明した。

- ・成形パラメータのうち、コアバック量とシリンダー温度が発泡特性に最も影響を与える。
- ・熱伝導率はいかなる条件においても達成しており、コアバック量を増やすことで断熱特性は向上する。
- ・発泡 WPC 成形体の曲げ特性は、成形品のスキン層の厚みとコア層の発泡状態に大きく依存し、これらを制御することで高強度の成形品が得られる。
- ・振動特性については、木粉含有量を増加することにより、減衰特性が向上し、加えて経年使用により強度の低下は見られる一方で、振動特性は向上することが判明した。

D WPC フロア材の射出発泡成形におけるシリンダー温度の影響

a 射出成形を用いた WPC フロアの試作

前項では、実験計画法にて WPC フロアの発泡特性に影響を与える因子の抽出を行った。しかしながら、実験計画法はあくまでも傾向を確認するものであって、純粋な因子の影響を考慮出来ているかは明らかではない。そのため、前項にて発泡状態や各種物性の制御に重要な「シリンダー温度」のみを変化させる検討を行った。そのため、成形パラメータの金型温度、スクリュ回転数、コア

バック量は固定して、成形温度の最適値を求めることを目的とした。

材料は(1)-③-ア-1)-Cにて使用したものと同様のものを用いた。また、実験計画法にて使用した希釈した WPC ペレット (木粉含有率 25wt%、35wt%) を用いた。

射出発泡成形には同じ射出成形機 (東洋機械金属株式会社製、Si-180-6) を用いた。また、金型形状も同様のものを用いた。成形条件は、成形条件は、スクリュ回転数を 100rpm、金型温度を 40°C に固定した。また、最も発泡倍率が高くなるコアバック量 2.5mm にて成形を行った。また、発泡剤は 5phr に固定し、シリンダー温度及び木粉の含有率のみ変化させた。その実験条件を表 20 に示す。また、発泡倍率 (発泡セルサイズ) ・熱伝導率・曲げ特性・振動特性についても測定を行い、各種データの測定方法は(1)-③-ア-1)-Cと同じ測定方法を用いた。また、サンプルの採取位置についても(1)-③-ア-1)-Cと同じ位置から切り出した。

表 20 シリンダー温度の影響調査における成形条件

	木粉含有率 (wt%)	シリンダー温 度 (°C)	発泡剤 (phr)	CB 量 (mm)	回転数 (rpm)	金型温度 (°C)
Case 1	0	170	5	2.5	100	40
Case 2	0	190	5	2.5	100	40
Case 3	0	210	5	2.5	100	40
Case 4	25	170	5	2.5	100	40
Case 5	25	190	5	2.5	100	40
Case 6	25	210	5	2.5	100	40
Case 7	35	170	5	2.5	100	40
Case 8	35	190	5	2.5	100	40
Case 9	35	210	5	2.5	100	40

b シリンダー温度のみ変化させて作成した射出発泡 WPC の性能評価
 ・発泡性 (発泡倍率)

図 93 に発泡倍率とシリンダー温度の関係を示す。これより、木粉末添加 (WF0wt%) の場合、シリンダー温度の上昇に伴い、発泡倍率が増加しているこ

とが分かる。対して、木粉添加の場合、シリンダー温度 190°C で最も発泡しており、210°C では発泡倍率が大幅に低下する傾向を示した。これは実験計画法にて検討した傾向と異なるが、図 73 に示した発泡剤特性の傾向と一致しており、最適値は 190°C にあることが示された。また、木粉添加率増加の影響についても、実験計画法と異なる傾向を示した。前項での実験計画法による検討では、コアバック量を 1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm とし、コアバック量は発泡倍率に最も依存することが分かっており、それに対して木粉添加率増加による発泡倍率の影響は約 1% の減少と僅かな傾向であった。ここで、実験計画法を用いた実験において得られた、木粉添加率が発泡倍率に及ぼす影響についてまとめた図 80 より、各シリンダー温度において、木粉添加率増加に伴い発泡倍率が増加している条件が存在することが分かる。よって、実験計画法で得られた結果はコアバック量が最も支配的であったのに対し、コアバック量を固定した本実験では、木粉添加率増加が発泡倍率を減少させると一概には言えず、むしろ増加傾向にある可能性が示唆された。この考察については、「押出发泡成形」の項にて後述する。

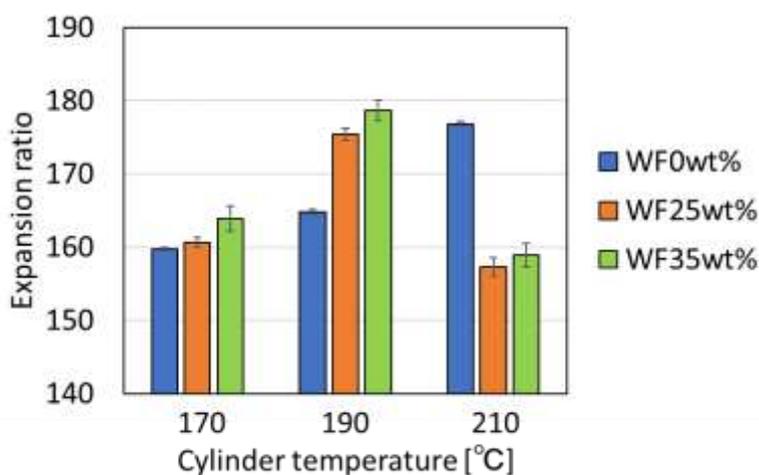


図 93 シリンダー温度と発泡倍率の関係

・発泡倍率と熱伝導率

図 94 に熱伝導率と発泡倍率の関係を示す。図 94 より、シリンダー温度 190°C 以上で目標熱伝導率の 0.12 W/mK 以下を達成した。目標値を達成したシリンダー温度に注目すると 210°C の場合、目標値を達成しているが発泡倍率は低いことが分かる。この原因は、1) -C 項でも示したとおり、シリンダー内もしくは金型内で発泡・破裂を起こしてしまい、発泡効果が得られず、発泡倍率が低下したと考えられる。また、発泡倍率と熱伝導率のばらつきが大きいため、成形品の品質安定性が悪いと考えられる。

図 95 には WF35wt% において、シリンダー温度を変化させた場合の SEM 写真

を示す。倍率は30倍(上段)、250倍(下段)で観察した。図95より170°C、190°Cではコア層において比較的均一なセルの形成が確認できた。対して、210°Cでは、前述した通り、高温下での成形によりコア層において発泡・破裂が生じたため、連続気泡のセル構造になっており、セルサイズのばらつきが大きいことが分かる。そこで、各シリンダー温度に対して発泡セルのサイズを測定した結果を図96に示す。図96より170°C、190°Cではセルサイズにあまり変化はなく、210°Cでは約20%セルサイズが減少していることが分かる。これより、210°Cでは過熱によってセルの収縮が起きていると考えられ、セルサイズのばらつきも大きいことから発泡の安定性が悪いと考えられる。

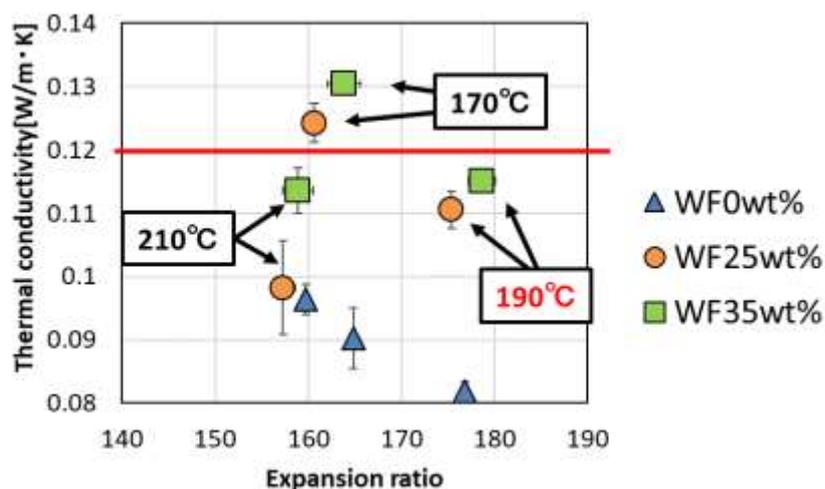


図94 熱伝導率と発泡倍率の関係 (シリンダー温度の影響)

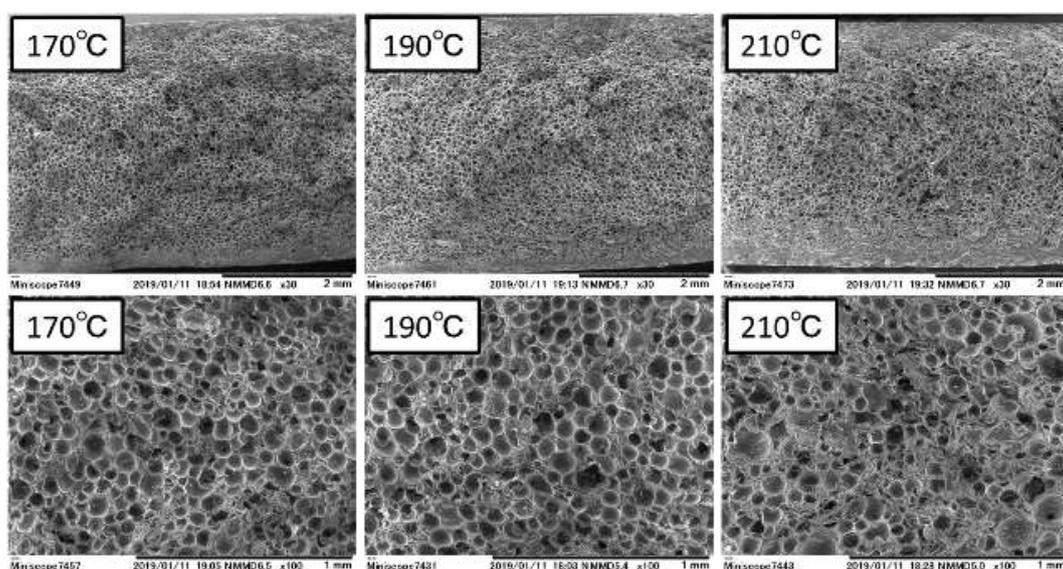


図95 WF35wt%における各シリンダー温度の曲げ破断面

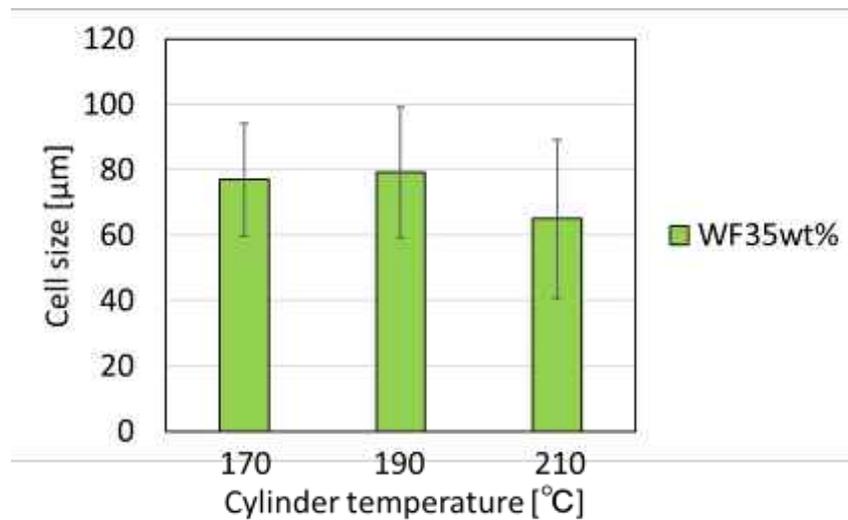


図 96 WF35wt%における発泡セルサイズのシリンダー温度の影響

・発泡倍率と機械的特性

図 97 に熱伝導率と曲げ強度及び曲げ剛性の関係を示す。図 97 より、熱伝導率の減少に伴い、曲げ特性も低下する傾向を示した。また木粉を添加することで断熱特性を維持しながら曲げ特性を改善することが可能であると考えられる。図 98 に破断側のスキン層厚み (得られた試料の厚みに対するスキン層の割合) と曲げ強度の関係を示す。この結果より、スキン層割合が増加するに伴って、機械的特性は改善される傾向を示すが、170°Cと 190°Cでは大きな差が見られていない。よって、木粉の熱分解温度・発泡安定性の観点からシリンダー温度は 190°C程度が望ましいと考えられる。

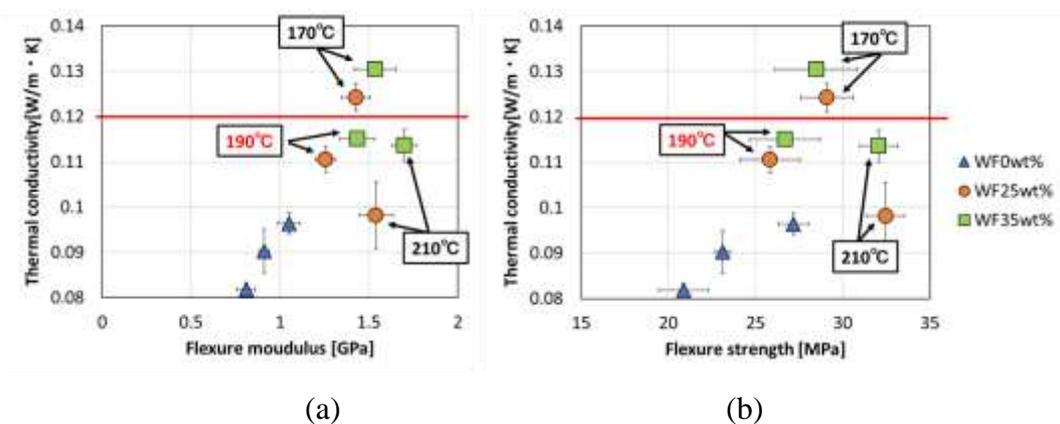


図 97 熱伝導率と(a) 曲げ剛性 (b) 曲げ強度の関係 (シリンダー温度の影響)

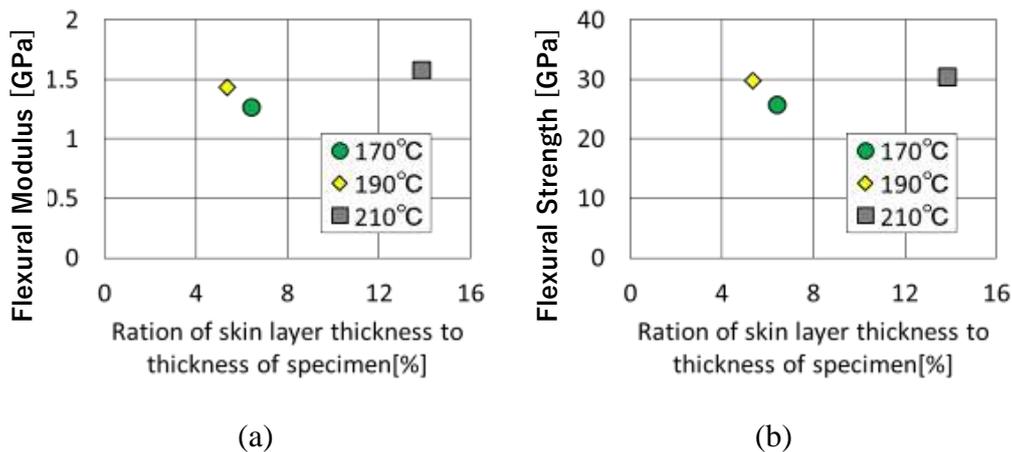


図 98 WF25wt%でのスキン層厚みと(a) 曲げ剛性 (b) 曲げ強度の関係
(シリンダー温度の影響)

・発泡倍率と振動特性

図 99 に振動特性を示す。動的粘弾性試験の実施条件は 1) -C 項、表 20 に示した条件と同様である。表 21 に示した材料仕様の試料を各条件 3 本用意し、各試料の損失係数を取得した。図 99 には、各条件について 3 本の試料の中央値を示した。図 99 より、歪振幅が 2 μ m 付近を見ると、温度によらず木粉含有量が 0wt% の条件で損失係数が高くなっている。一方で、8 μ m 付近の損失係数を見ると、シリンダー温度 210 $^{\circ}$ C の条件で損失係数が高くなる傾向が見られた。また、各条件での貯蔵弾性率および損失弾性率の結果を図 100 に示す。図 100 に示した (a) 貯蔵弾性率を見ると、1) -C 項と同様に木粉含有量 0wt% の条件で、貯蔵弾性率が低下しており、温度に依存した傾向は確認できない。次に、図 100 に示した (b) 損失弾性率を見ると、8 μ m の歪振幅において、シリンダー温度 210 $^{\circ}$ C の条件で、木粉含有量を 25、35wt% とした場合に、損失弾性率が増加していることが確認できた。また、木粉含有量が 25、35wt% の条件では、その他のシリンダー温度の条件でも、木粉含有量 0wt% の条件よりも、損失弾性率が増加していることが確認できる。以上より、木粉含有量の増加に応じた損失弾性率の増加の傾向はシリンダー温度によらず発現するが、シリンダー温度 210 $^{\circ}$ C の条件では、減衰性能がより向上することが本項の結果で示された。減衰性能の向上によって、歩行時の衝撃による床騒音の低減や人体への衝撃による負荷の軽減などの付加価値の高い床材料の製作が可能になると考えられる。

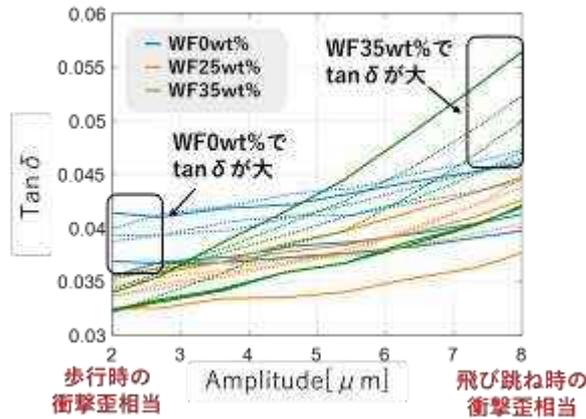


図 99 シリンダー温度依存条件における歪振幅と損失係数との関係

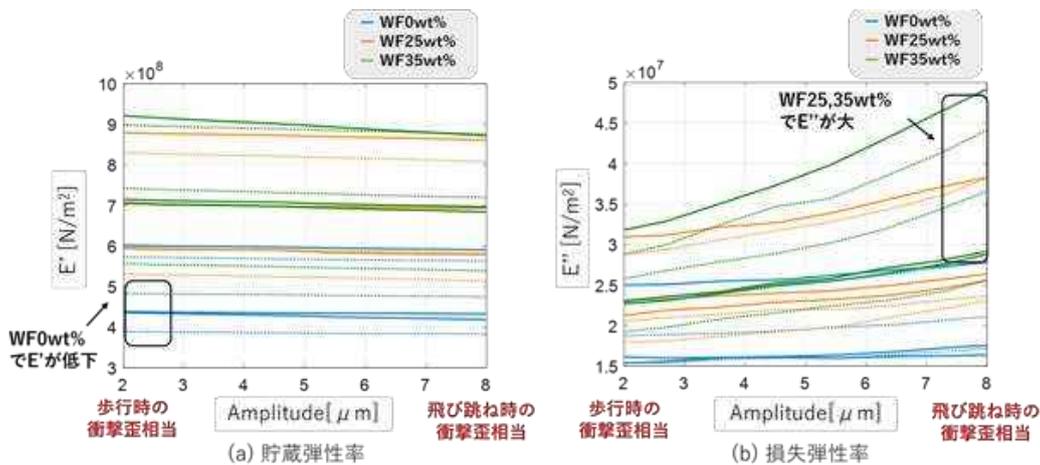


図 100 シリンダー温度依存条件における (a) 貯蔵弾性率 (b) 損失弾性率

・まとめ

本項では、最も発泡倍率が高くなるコアバック量 2.5mm に条件を固定して、シリンダー温度の最適化を目的に、発泡特性に対する木粉含有率とシリンダー温度の影響を再調査した。以下に本項の結果をまとめる。

- ・シリンダー温度 190℃で最大の発泡倍率が得られ、発泡セル 80μm 程度、発泡倍率 1.8 倍程度の独立気泡構造を取ることによって目標値の熱伝導率 0.120 W/mK 以下を達成することができることが判明した。
- ・曲げ特性については、発泡倍率と曲げ特性は反比例の関係にあった。210℃で最大となったが、これは発泡倍率が低下し、スキン層厚みが増加することが影響していることが判明した。
- ・振動特性については、木粉含有量の増加に応じた損失弾性率の増加の傾向はシリンダー温度によらず発現するが、シリンダー温度 210℃の条件では、減衰

性能がより向上することが判明した。

E 押出発泡による WPC フロア材の製作

a 押出成形を用いた WPC フロアの試作

ここでは、押出発泡成形について検討した。押出発泡成形は、押出ダイが取り付けられた単軸押出機を用い、樹脂を自由発泡させた後にサイジングを行う成形方法であり、長手方向に均一な断面を有する WPC の成形品を得ることができる。射出発泡成形の様に、スキン層形成後に発泡するプロセスと異なり、ダイからの材料流出後発泡されるため、形成されるセル構造も大きく異なると想定される。押出成形方法の概要図を図 101 に示す。

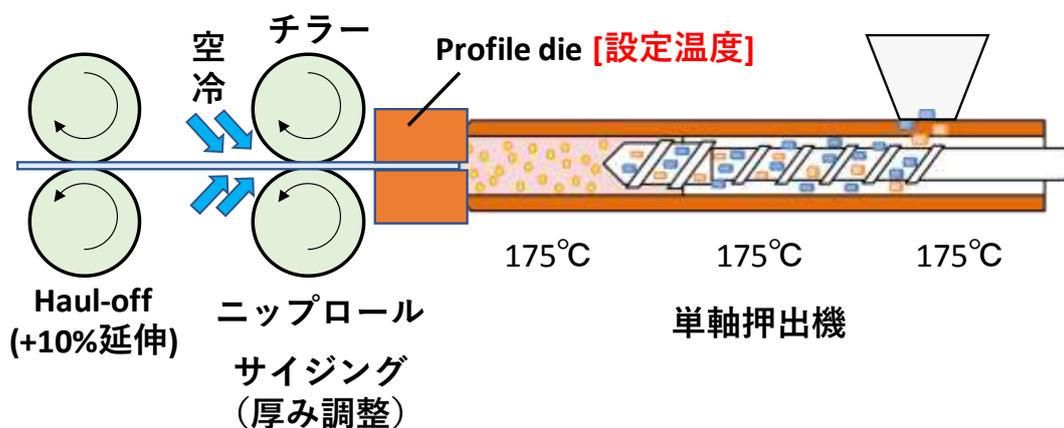


図 101 単軸押出発泡成形方法の概要

射出発泡成形の様に、押出実験においても、成形温度のコントロールと滞留時間が重要になると想定される。そのため、シリンダー温度を未発泡領域にあたる 175°C に設定し、先端のダイ温度のみを変化させて WPC を発泡させるプロセス方法を採用した。ここでは、ダイ温度と発泡特性の影響を調査することを目的とした。さらに、WPC に LCNF を添加し、リグノセルロースナノファイバー (LCNF) の添加率を変化させ、WPC の諸特性に与える影響についても明らかにすることをこの実験の目的とした。

材料は (1) -③-ア-1) -C、D と同様である。また、WPC に LCNF を追加添加し、LCNF が発泡特性に与える影響を調査するために、セルフイム (モリマシナリー製) を使用した。

事前に二軸押出機を用いて、木粉含有率が 25、35 wt% になるように混練を実施した。木粉の劣化を考慮し、混練時のバレル温度 180°C、押出量 2.0kg/h、回転数 150rpm でペレットを作製した。また、木粉に含まれている水分を取り除く

ために、混練中に脱揮作業を行った。単軸押出機（三機製作所製、スクリュ径 24mm）に自作した押出ダイ（出口寸法：厚み 4mm×幅 50mm）を取付け、得られた乾燥済み（80℃、24 時間以上）のペレットと発泡剤をホッパー部に投入して押出を行った。押出後のサンプルはフィルム巻き取り装置（ThermoFisher Scientific 社製）を用いて引き取りを行い、吐出後のサンプルは冷却水を循環させたニップロールを用いて、厚み 3mm にサイジングを行い、その後エアーナイフにてエアーによるサンプルの急冷を実施した。実験条件を表 21 に、実際に用いた実験装置を図 102 に示す。また、LCNF 添加 WPC の作製方法については、LCNF とマトリックスの PP を二軸押出機にて事前分散させた。さらにセルブリッド（WF70%）とその作製した LCNF 添加 PP を再度混練し、WF35wt% に対して LCNF の含有率が異なるペレットを作製した。

表 21 単軸押出發泡成形における実験条件

	木粉含有率 (wt%)	LCNF 含有率 (wt%)	先端ダイ温度 (°C)	発泡剤 (phr)	回転数 (rpm)
Case 1			190		
Case 2	0	0	210	5	20
Case 3			230		
Case 4			190		
Case 5	25	0	210	5	20
Case 6			230		
Case 7			190		
Case 8	35	0	210	5	20
Case 9			230		
Case 10		0.5			
Case 11	0	1.0	210	5	20
Case 12		3.0			
Case 13		0.25			
Case 14	35	0.5	210	5	20
Case 15		1.5			

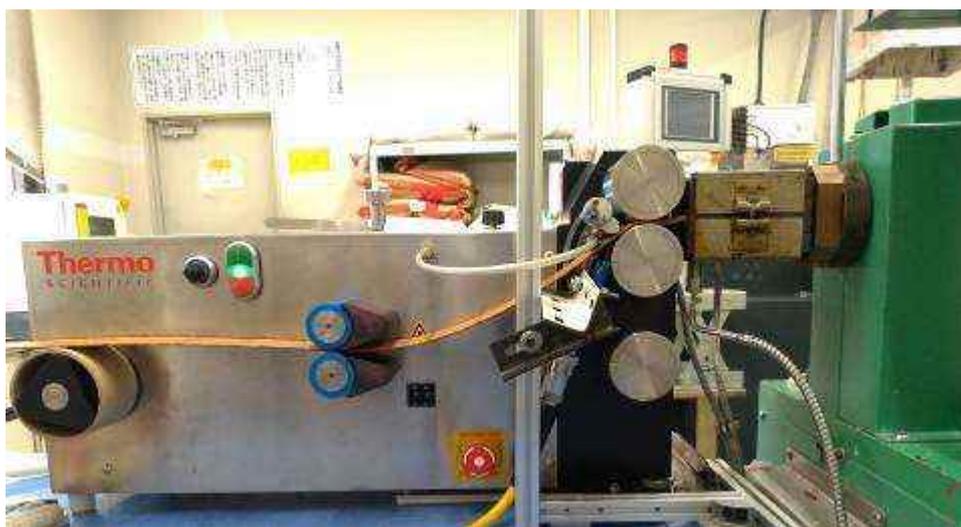


図 102 実験で用いた押出発泡成形の製造ライン

b 押出発泡 WPC の性能評価

・発泡性 (発泡倍率)

図 103 に押出後の樹脂温度と発泡倍率の関係を示す。いずれも樹脂温度の増加に伴い、発泡倍率は上昇する傾向を示した。押出後の樹脂温度は、ダイの設定温度と+5°C以内と差が無く、ダイの設定温度と等しい状態であった。用いた発泡剤は高温であっても時間によって発泡度合いが異なることが判明していた。今回の押出実験では、シリンダー温度を 175°C に固定し、ダイ部での温度を変化させているため、ダイを通過する時間によって、発泡度合いは異なると思われる。

そのため、設計した押出ダイ部の流動解析を検討した。実験から得られた流量 (約 1.5kg/h) を入り口流入条件として、ダイ内の滞留時間分布を算出した。その結果を図 104 に示す。この結果より、約 70 秒から 150 秒程度の幅広い滞留時間分布を示すが、100 秒以内にダイを通過する割合が高いことが判明した。発泡剤の基礎実験結果では 210°C において 150 秒まで発泡する結果が得られていたことから、最も高いダイ温度 (230°C) でも十分に発泡可能な領域にあり、温度増加に伴って発泡倍率が上昇する結果となったと考えられる。

また、木粉含有率の増加に伴って PP マトリックスの体積割合が減少するにも関わらず、発泡倍率が増加する傾向となった。この結果を考察するために、発泡前及び発泡後のサンプルを対象に、各木粉濃度におけるサンプルの理論密度 (WF:1.4 g/cm³, PP : 0.91 g/cm³) と実験で得られた密度の相対差 (気泡含有率) を算出した。その結果を図 105 に示す。発泡前のサンプルの結果 (図 105 (a)) においては、発泡剤未添加にも関わらず、木粉含有率の増加に伴い、気泡含有率の増加が見られた。これは、木粉に含まれている水分が影響していると考え

られ、木粉含有率の増加に伴い、水分が発泡剤の役割を行っていると推察される。さらに、図 106 に各木粉割合とバレル温度における発泡前の引張試験後の破断面 SEM 画像 (倍率 40 倍) を示す。この破断面からもわかるように、木粉含有率増加に伴い、200 μm 程度の大きな気泡が増加していることがわかる。また、発泡後のサンプルにおける気泡含有率 (図 105 (b)) においても、木粉量の増加に伴って気泡含有率の増加傾向がみられる。つまり、押出發泡においては、化学発泡剤と木粉由来の水分の相互作用に起因して、発泡倍率に変動することが判明した。

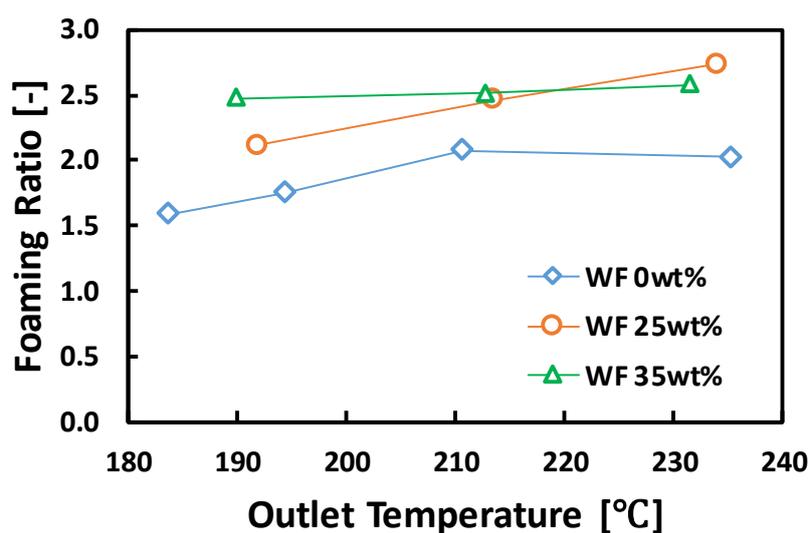


図 103 ダイ出口温度 (樹脂温度) と発泡倍率の関係

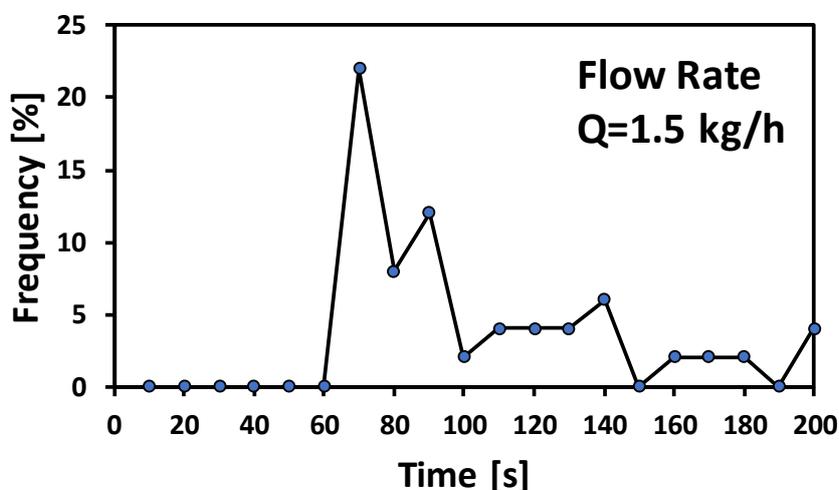


図 104 押出ダイ内における樹脂の滞留時間分布

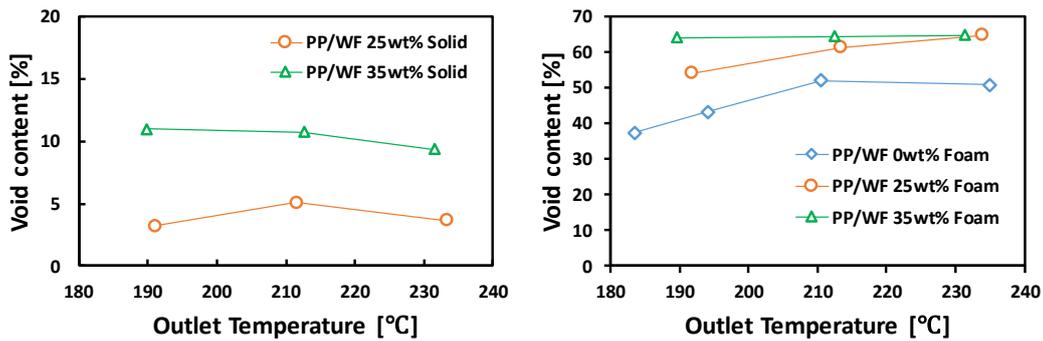


図 105 ダイ出口温度・木粉含有率と発泡前・後サンプル中の気泡率の関係;
 (a) 発泡前サンプルにおける気泡率、(b) 発泡後サンプルの気泡率
 (Foam は発泡後を示し、Solid は発泡前を示す)

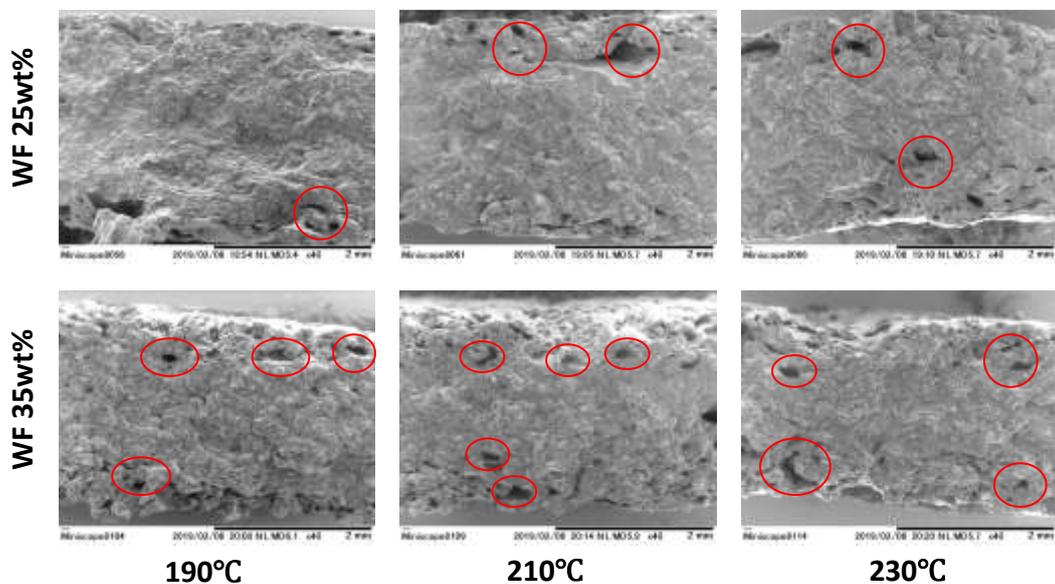


図 106 発泡前におけるサンプル破断面の SEM 像 (40 倍)

・機械的特性

表 22 に各ダイ温度・各木粉含有率における引張試験結果を示す。発泡前と発泡後サンプルの引張強さ、弾性率、破断伸びの結果をまとめたものを記載した。発泡前においては、木粉含有率の増加に伴い、引張強さと破断伸びが極端に低下し、弾性率については増加傾向を示し、一般的な傾向を示していることがわかる。また、ダイ温度の増加に伴い、引張強さ、破断伸びは低下傾向を示しており、木粉成分に含まれるリグニンやセルロース等が熱分解を引き起こしたこと由来する強度低下であると推察される。この傾向については、発泡後のサ

ンプルでも同様にみられている。

さらに、発泡前後で比較すると、引張強さは約 1/8~1/6 にまで低下し、弾性率についても大きく低下し、発泡後の機械的特性は大幅に低下している。図 107 に発泡後の引張試験後の破断面を示す。いずれの条件においても独立気泡が達成されていることが分かった。しかしながら、射出発泡成形と異なり押出发泡成形におけるプロセスはほぼスキン層を形成せず、表面層まで発泡しているために強度が低下したと推察される。図 108 にサンプル中の気泡率と引張強度の関係を示す。この結果からもわかるように、サンプル中の気泡率と引張強度には相関性があり、単純に気泡率の増加に伴って引張強度が低下していることが明らかとなった。

異形押出成形では、押出後にゆっくりと冷却させることで、スキン層の形成を行っている。本実験で用いた成形方法では、ニップロールとエアナイフによる急冷を行ったためにスキン層の形成がされなかったと考えられる。そのため、本実験では、気泡含有率と機械的強度は相反関係にある結果となったが、押出過程の冷却条件を最適化することによって、スキン層の厚みを持たせ、強度の改善が可能であると考えられる。

表 22 押出发泡成形によって作製したサンプルの引張特性

条件		発泡前			発泡後		
WF 割合 [%]	ダイ 温度 [°C]	引張強さ [Mpa]	弾性率 [Mpa]	破断伸び [%]	引張強さ [Mpa]	弾性率 [Mpa]	破断伸び [%]
0	180				12.6 ± 0.7	603 ± 36	12.2 ± 2.8
	190				9.2 ± 0.3	346 ± 70	17.4 ± 5.1
	210				8.1 ± 0.7	194 ± 19	26.3 ± 4.1
	230				8.3 ± 0.9	230 ± 24	31.2 ± 12.4
25	190	33.3 ± 2.2	1333 ± 196	3.1 ± 1.0	6.9 ± 0.1	286 ± 26	5.6 ± 1.1
	210	30.8 ± 0.7	1490 ± 714	3.8 ± 0.7	5.5 ± 0.0	292 ± 69	6.2 ± 1.3
	230	28.4 ± 2.0	1515 ± 259	2.8 ± 0.2	5.0 ± 0.3	245 ± 51	3.7 ± 1.0
35	190	28.4 ± 0.8	1370 ± 280	3.3 ± 0.2	4.5 ± 0.4	326 ± 86	3.2 ± 0.5
	210	27.4 ± 2.0	1868 ± 344	2.5 ± 0.6	4.1 ± 0.4	266 ± 62	2.6 ± 0.6
	230	27.3 ± 1.9	3092 ± 678	2.2 ± 0.3	4.2 ± 0.2	201 ± 78	2.9 ± 0.0

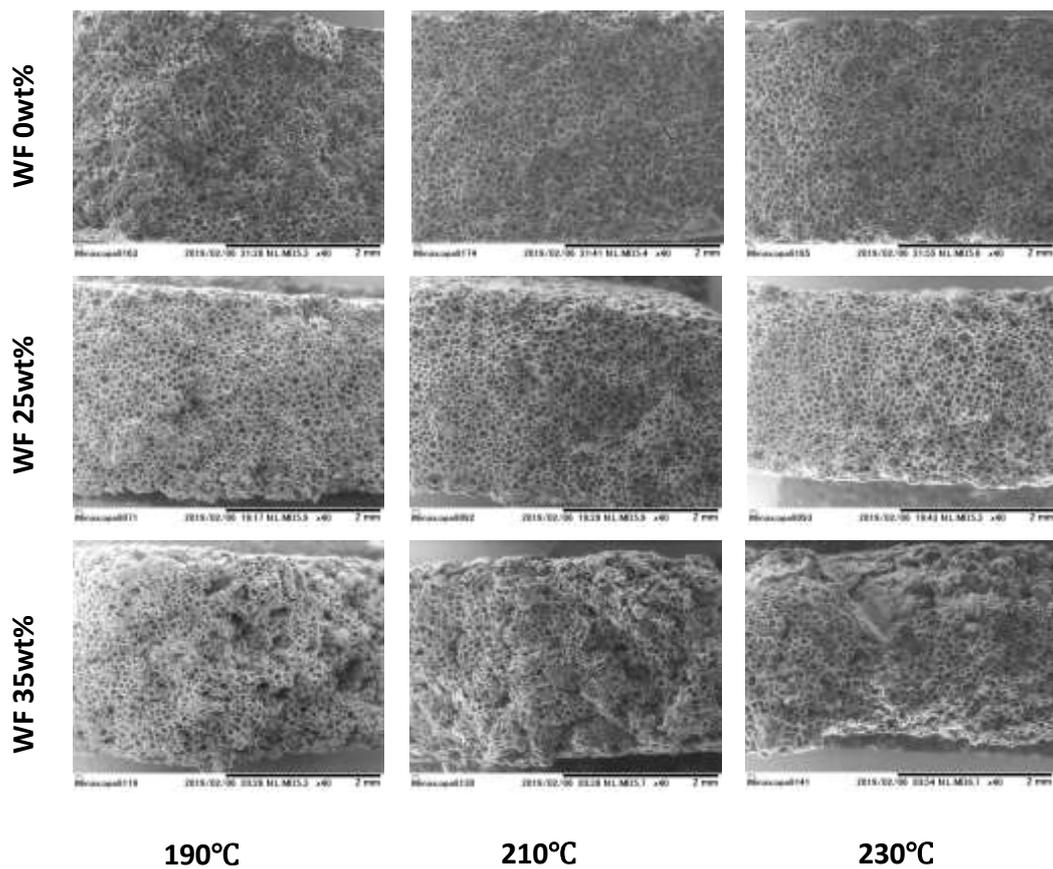


図 107 発泡後におけるサンプル破断面の SEM 画像 (40 倍)

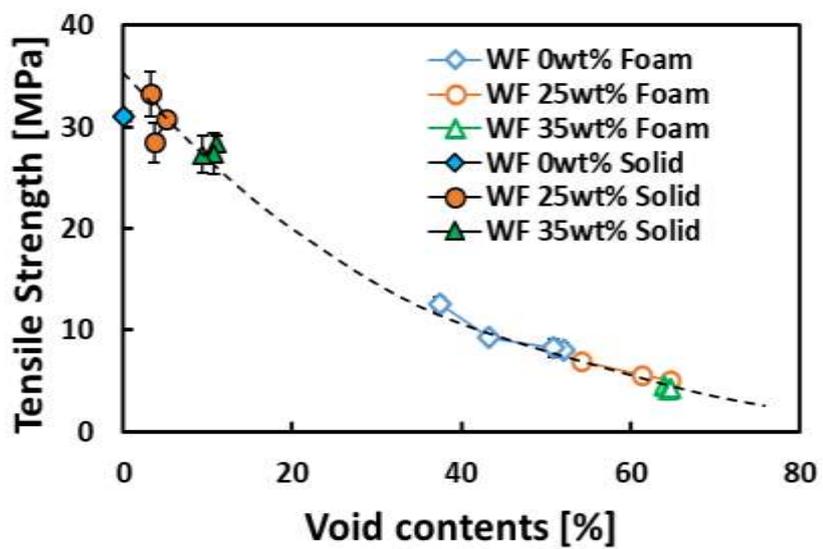


図 108 気泡含有率と引張強さの関係

・ LCNF の添加率と発泡特性

図 109 に LCNF の含有率と発泡倍率の関係を示す。これまでの結果と同様に、木粉含有率の増加に伴って発泡倍率が増加しているが、LCNF 添加により発泡倍率はほぼ変化しなかった。今回の実験系では物理発泡を用いていないために LCNF は発泡核とはならず、発泡を阻害し発泡倍率を低下させる可能性がある。本結果においては、発泡倍率が大きく変化していないことから、化学発泡においては悪影響を及ぼすことはほぼないことが判明した。しかしながら、木粉と同様に、LCNF に含まれる水分が発泡剤として働き、発泡倍率を増加させる可能性もある。そのため、さらなる水分率の管理が重要となると考えられる。

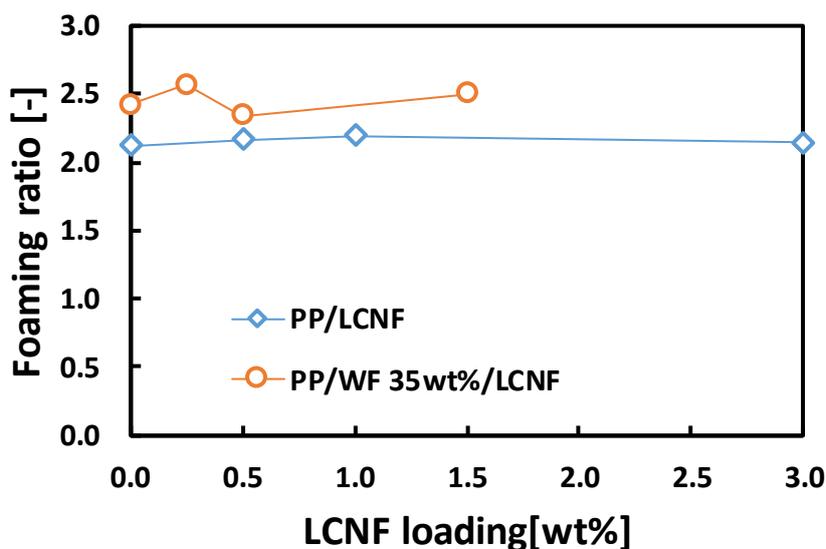


図 109 LCNF の含有率と発泡倍率の関係

また、図 110 に LCNF の含有率と機械的特性の関係を示す。木粉末添加においては、LCNF の添加量の増加に伴って、引張強度も低下しているが、木粉添加系においては、LCNF の添加量の増加に伴い、引張強さが向上した。この傾向は発泡前後の材料において同様の傾向を示した。一般に、木粉添加量の増加に伴い溶融張力は低下するため、シート引取り性が悪くなり、成形不安定性を引き起こす。ナノフィラーの添加により、溶融張力が改善される事例についてはすでに報告されており、今回においても、LCNF の補強効果による成形安定性もたらした結果と推察される。また、発泡後のサンプルにおいて、LCNF は発泡セルの間に存在していると推察される。そのため、効率よく樹脂部を補強することが可能であることが判明した。これは、LCNF 添加系 WPC の発泡サンプルにおいて、引張強度のみならず、剛性・伸びもわずかながら改善されており、LCNF

の添加によって靱性の改善が可能であることが判明した。

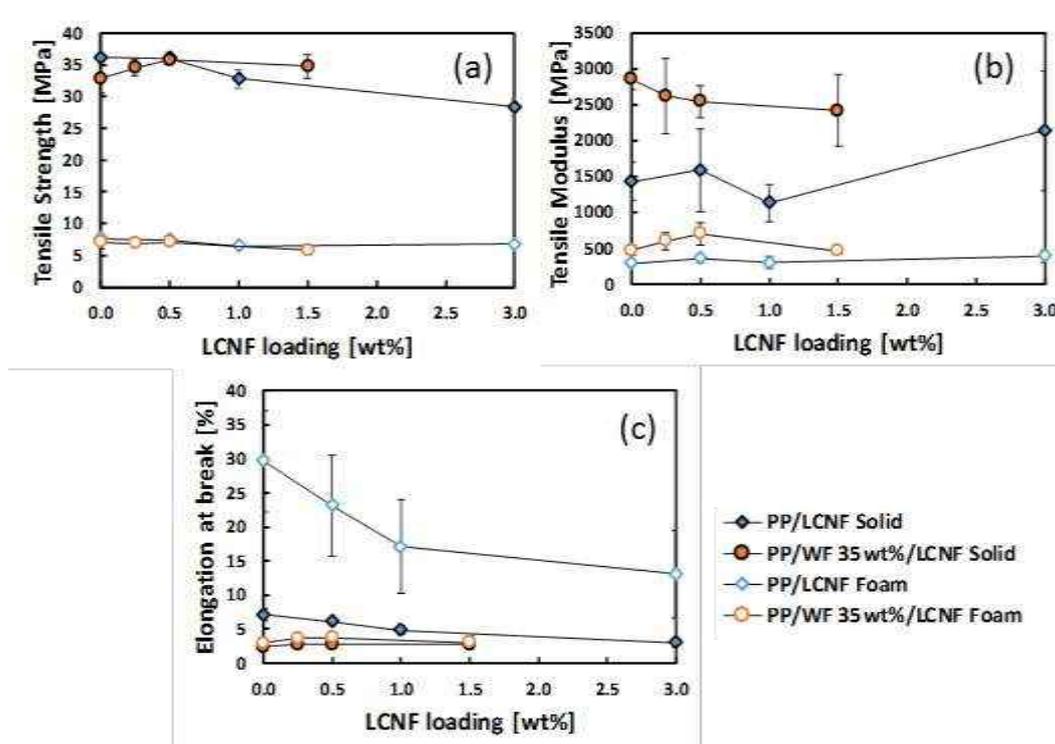


図 110 LCNF の添加率と (a) 引張強さ (b) 引張剛性 (c) 破断伸び

・まとめ

本項では単軸押出機を持ちいて押出發泡成形の検討を行い、厚み 3mm×幅 50mm のサンプルの作製を行った。成形条件のベストスペックを明らかにすべく、木粉割合と先端ダイ温度を変化させ、以下のことが判明した。

- ・先端ダイ温度 210°C～230°C の範囲で最大発泡倍率 (約 2.5 倍) が得られた (射出成形では最大約 1.8 倍)。また、木粉含有率の増加に伴い発泡倍率が増加したが、これは木粉に含まれる水分量に依存することが判明した。そのため、押出發泡時は木粉の水分量に注意しながら発泡剤の添加割合を決定することが重要であると思われる。
- ・機械的特性については、木粉の熱分解により、ダイ温度が高温になるにつれて低下することが明らかとなった。また、木粉含有率の増加に伴い、引張強度が低下する結果となった。サンプル中の気泡率と引張強度はトレードオフの関係にあることが示された。また、射出発泡に比べ押出發泡成形ではスキン層を形成しないため、冷却状態の最適化が必要である。
- ・LCNF 添加による影響では、発泡倍率には大きな影響を与えないことが判明した。しかしながら、木粉と LCNF のハイブリッド化では 10% 程度発泡後の成

形サンプルの引張強度・剛性・伸びの改善が可能であることが分かった。

F 量産試作および量産試作品の評価

これまでの射出成形並びに押出成形での試験結果を踏まえ、強度と断熱特性から射出成形（コアバック法）による量産試作を実施した。本量産で得られた成形されたサンプルを図 111 に示す。量産数量はテストハウスでの実証試験用として約 500 枚の製品サンプルの作成を行った。以下にその詳細を示す。



図 111 高断熱 WPC フロア (塗装品)

a 原材料

CNF 入り木粉の配合量はこれまでの結果より、強度と断熱特性を加味して、CNF 入り木粉を 30%配合したポリプロピレン (株式会社プライムポリマー製、J107G) を使用した。発泡剤は自己膨張性マイクロカプセルの発泡剤マスターバッチ (積水化学工業株式会社製、アドバンセル P501E1) を用いた。配合比率は CNF 入り木粉配合樹脂 100 に対して、5 部添加とした。

b 量産試作

射出成形機は Si-230V-H370C (東洋機械金属製：図 112) を用い、金型は表面に木目のシボが施された幅 150mm×長さ 300mm の金型 (図 113) を用いた。厚みについては 6mm～15mm まで可変できる構造の金型を用いて、射出時厚み 6mm、コアバック後の厚み 12mm となるようにし、2 倍発泡となる設定とした。



図 112 量産試作に用いた射出成形機 (Si-230V-H370C、東洋機械金属製)

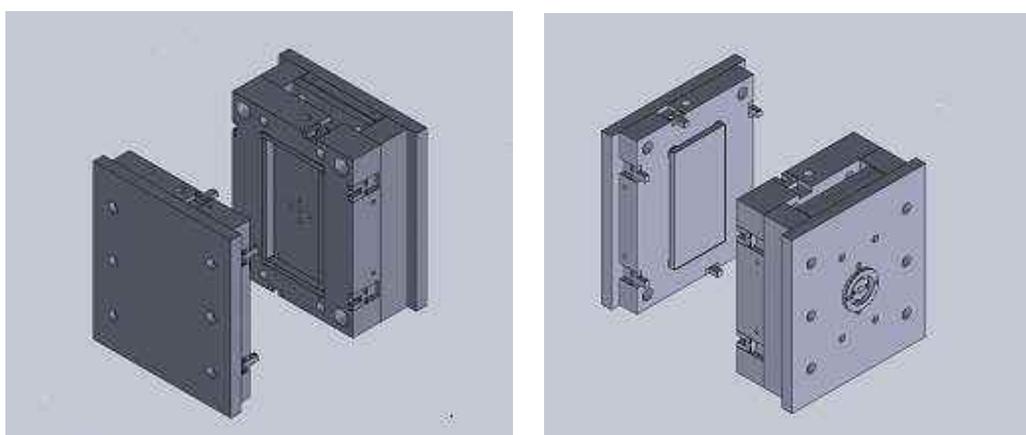


図 113 量産試作に用いた高断熱 WPC フロア射出金型

コアバック側の意匠面を凸部、裏面を凹部としランナーは裏面側になる設計とした、また製品意匠面に影響が出ないよう離型に使うイジェクターピンも製品裏面 (射出側) からとなる特殊な型構造を採用した。

量産時の生産条件を図 114 に示す。

No. 12 条件一覧		Si-230V H370C φ60		2018-11-13 (火) 16:42:55									
製品名 コアバック成形金型		金型名 専用		樹脂名 ADVANCELL									
射出位置	7 6 5 4 3 2 1	100.00 130.00 mm		V-P切換	可塑化 1								
速度		200 50 mm/s		ストローク切換	ノズルバック 0 200.0 mm								
1次圧		120.0 R MPa		タイマ 2.00 s	シャットオフ 0								
保圧		60.0 R MPa		ストローク 6.00 mm	折線 速度 OFF 圧力 OFF								
タイマ		0.00 s			冷却タイマ 120.00 s								
速度		50 mm/s											
射出完了リッパック	可塑化	1 2 3	SRC-II	1 2	SRC-III								
幅 0.00 mm	位置 0 115.00 mm		位置 mm		可塑化遅延時間 60.00 s								
速度 10 mm/s	回転速度 50 min ⁻¹		タイマ s		リッパック幅 15.00 mm								
	背圧 10.0 R MPa		圧力 R MPa		リッパック速度 5 mm/s								
温度 型1 55 型2 55	ヒータ1 180	ヒータ2 180	ヒータ3 175	ヒータ4 170	ヒータ5 170	ホッパー 50 °C							
型開位置	4 3 2 1	293 270 250 100.00 0 mm		型閉	1 2 3 4 5	低圧型締							
速度		7 3 10 7 %			293 100 100 40 1.43 0 mm	5.0 s							
					10 10 7 5 5 %	25 %							
EJ1位置	1 2 3	0 0 0 mm		VE-ト IJ トド ² DC トド ² EJ トド ² 保圧 トド ²		中間タイマ 0.00 s							
速度		0 0 %		EJ1回教 0 回		型締力 1500 kN							
				遅延時間 0.00 s		金型厚み 279.8 mm							
				前進停止 0.00 s		サイクル 149.41 s							
射出グラフ		可塑化グラフ		1例グラフ		可塑化補助		射出圧縮		射出小グラフ		EJ後退限	
半自動		MENU 1		生産管理		モニタ		交換		EZが完了		NZが完了	

図 114 高断熱 WPC フロア量産時の生産条件表

シリンダー温度については、前述の試験結果より 170°C~190°Cの間で、外観・意匠から 180°Cを選択した。また射出速度については最大の 200mm/s にて量産条件とした。

- c 量産品の性能評価
- ・ 比重および熱伝導率

実際作成した量産サンプルを用いて、比重と熱伝導率の測定を行った。その結果を表 23 に示す。各製品厚みは、射出金型キャビティのコアバック時の厚みより若干大きい 12.5mm となった。比重は平均 0.48 となっており、ソリッドの比重が 1.02 であることを考えれば約 2.1 倍の発泡倍率となった。また熱伝導率については平均 0.085W/mK の結果となり、目標値 (0.120W/mK) を大きく下回ることができた。

表 23 高断熱 WPC フロア量産品の熱伝導率測定結果

試験体				結果
No.	重量 (g)	厚さ (mm)	密度 (g/cm ³)	Result (W/mK)
CNF-WPC-1	135.0	12.8	0.47	0.080
CNF-WPC-2	135.5	12.3	0.49	0.085
CNF-WPC-3	136.1	12.3	0.49	0.089
CNF-WPC-4	136.2	12.4	0.49	0.088
平均	135.7	12.5	0.48	0.085

・曲げ強度

量産サンプルから、ランダムに 5 枚のサンプルを抽出し、曲げ試験用サンプルとして表裏のスキン層を残したまま、裏面のランナー位置を避けて、短冊状(幅 30mm×長さ 240mm×厚み 12mm)にしたものを曲げ試験片に用いた。その試験結果を図 115 に示す。

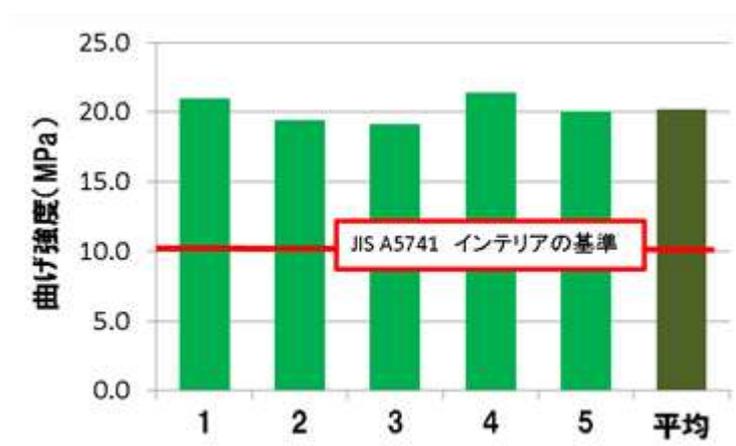


図 115 高断熱 WPC フロア量産サンプルの曲げ試験結果

JIS A 5741-2012「木材・プラスチック再生複合材」にある性能項目のうちインテリアに用いる基準 (IN-I:住宅等床用フローリング) の曲げ強度基準 10 MPa 以上を十分確保する結果となった。

G 経済性の評価

表 24 には、本量産試作をもとに施工費まで含め算出した開発品コストと既存品コストの比較表を示す。既存のフロア合板に対し、住宅 1 戸当たり 3,503 円のコストアップとなる。しかしながら、モデルルームの施工図からも明らかなように、高い意匠性と発泡による肌触りは、既存フロアに対し大きな差別化とな

っている。したがって、この点だけでも、コストアップは十分回収できると考えられる。さらに、WPCフロアは耐水性が高いだけでなく、再研磨することで、新品同様にリニューアルできることから、メンテナンス性も高く、後述するライフサイクルコストで評価すると、使用者にてコスト回収は可能である。

表 24 開発品と既存品のコスト比較

項目	使用量	単価	原価	備考			
開発品	変動費	WPCコンパウンド	133.6 kg/戸	350 円/kg	46,743 円/戸	トクラスCNF入りコンパウンド	
		PP樹脂	164.6 kg/戸	175 円/kg	28,805 円/戸	PP市販価格相場より	
		副資材	465.8 kg/戸	10 円/kg	4,658 円/戸	梱包資材等	
		電力	302.8 kW/戸	16 円/kwh	4,845 円/戸	使用電力=0.65kW/kg	
		計			85,050 円/戸		
		固定費	償却費	465.8 kg/戸	43 円/kg	20,030 円/戸	投資額(混練機、成型機他=100百万円)
		人件費	465.8 kg/戸	63 円/kg	29,347 円/戸	3名×600万円/名	
		管理費等	465.8 kg/戸	30 円/kg	13,975 円/戸		
		計			63,352 円/戸	生産量50kg/日	
		製造原価			148,403 円/戸	変動費+固定費	
販売費			22,260 円/戸	製造原価×15%			
施工費	職人人件費	2.0 日/戸	10,000 円/人/日	20,000 円/戸	軽量化による施工効率改善+クロスレス		
計			190,663 円/戸				
既存品	クロス	208.7 kg/戸	777 円/kg	162,160 円/戸	価格.comより		
	施工費	職人人件費	2.5 日/戸	10,000 円/人/日	25,000 円/戸	石膏ボード施工4日+クロス施工4日	
	計			187,160 円/戸			
コスト比較(開発品-既存品)				3,503 円/戸			

2) 高断熱ウレタンボード

A 概要

量産 (実用化) に則した条件で、CNF 添加高断熱ウレタンボードの量産試作を実施した。この量産試作品の熱伝導率は、 0.019W/mK で、目標値 (0.038W/mK) を確保した。さらに、経済性を確保できる仕様 (使用材料、配合、生産設備および生産能力) を確立した。以下には、その詳細を示す。

B 量産試作および量産試作品の評価

a 原材料及び処方

表 25 にポリウレタン発泡体の基本原料処方を示す。各原料にはいずれも市販品を用いたが、発泡剤には低 GDP (地球温暖化係数) タイプのノンフロン発泡剤 HFO (ハイドロフルオロオレフィン) を用いた。

表 25 発泡体基本処方

原料区分		品番	メーカー名	組成概要	部数
R液	ポリオール	EL-450ED	AGC	アミン系ポリエーテルポリオール	50.0
		HS-209	三洋化成	シュークロス系ポリエーテルポリオール	50.0
	難燃剤	TMCPP	大八化学	トリス (クロロプロピル) ホスフェート	20.0
	触媒	カオライザー No.10	花王	N、N-ジメチルシクロヘキシルアミン	1.0
	整泡剤	SH193	東レ・ダウコーニング	シリコーンオイル	1.5
	発泡剤	水	—	—	2.4
LBA		ハネウエル	HFO-1233zd	26.5	
I液	イソシアネート	MR-200	東ソー	ポリメチレンポリフィルポリイソシアネート	216.8
合計					338.6

本実験に用いた CNF を表 26 に示す。実用化を想定し、市販の第一工業製薬社製水分散 CNF (I-2SX、製法 ; TEMPO 酸化法) を利用した。

表 26 使用した CNF の性状 (第一工業製薬社カタログより)

品番	濃度 (%)	繊維長	繊維幅 (nm)
I-2SX	2	非公開	4~10

但し量産時における CNF の均一分散性を考慮し、水分散 CNF はロールミルを使用し、事前にポリオール中に分散、同時に分散水を揮発させる事とした。ロールミルにはアイメックス社製 3 本ロールミルを用いた。図 116 に CNF のポリオールの分散工程を、図 117 に 3 本ロール利用のイメージ図を示す。

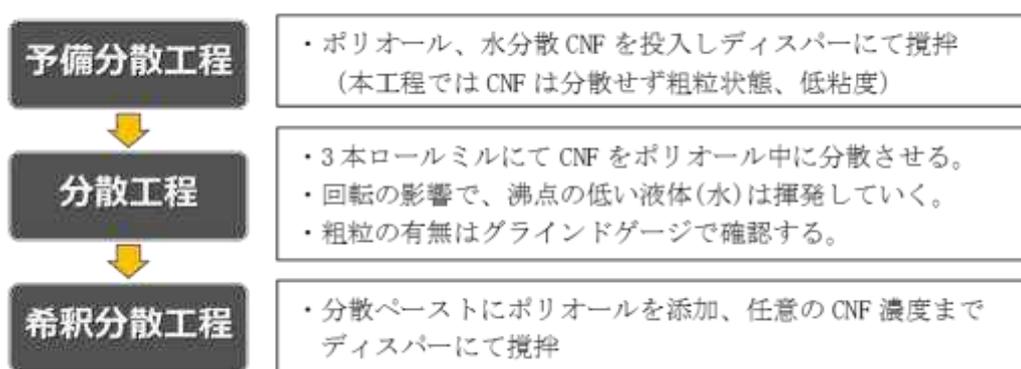


図 116 CNF のポリオールへの分散工程

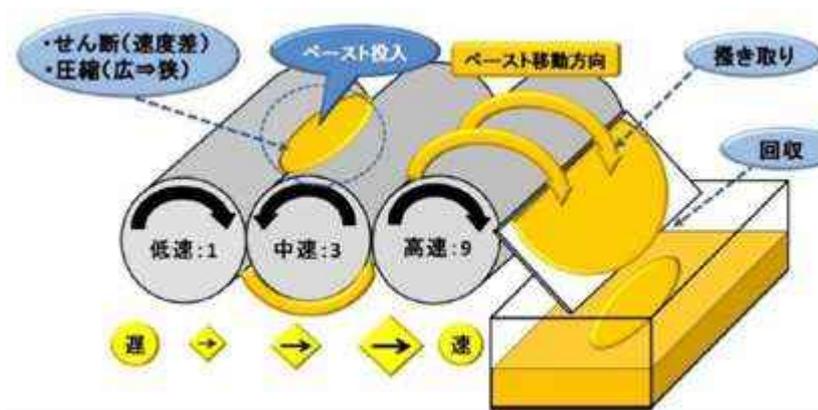


図 117 3 本ロールミル (アイメックス社 HP から引用)

試作に使用した CNF 添加ポリオールの配合比率を表 27 に示す。CNF 分散水の未揮発分は発泡剤原料としての水量から差し引く事とした。

表 27 CNF 添加ポリオール配合比率

原料	内容	CNF 無し (総重量比 0.00 %)	CNF0.1% (総重量比 0.03 %)	CNF0.2% (総重量比 0.06%)
ポリオール	EL-450ED	50	50	50
	HS-209	50	50	50
CNF	(NET)	0.0	0.1	0.2
	(未揮発水分)	0.0	0.7	1.1

b 量産試作

・ウレタンボードの成形工程

ウレタンボードの成形工程図を図 118 に示す。

硬質ウレタンフォームはポリイソシアネートとポリオールを、触媒 (アミン化合物等)、発泡剤 (水、フルオロカーボン等)、整泡剤 (シリコーンオイル) などと一緒に混合し、泡化反応と樹脂化反応を同時に行わせて得られる。

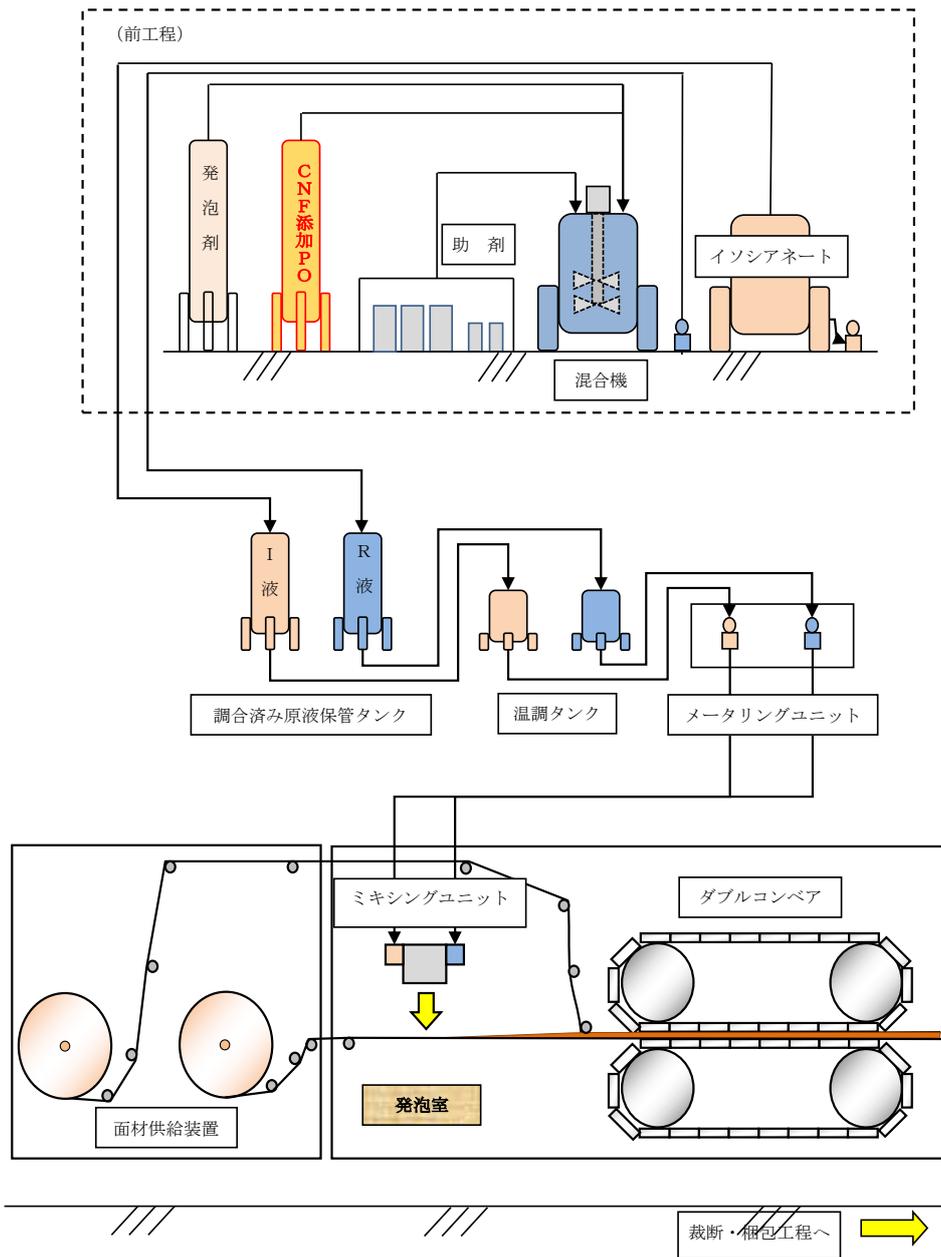


図 118 ウレタンボード・ラミネート成形工程図

7) 調液

ポリオールにあらかじめ触媒、発泡剤、整泡剤等の助剤を添加し、混合機にて混合・調液する。

CNF は水分散体を、前項に示した通り予めポリオール原料に添加・分散、分散水を揮発させる。未揮発の水分は、発泡剤として発泡成形に寄与させる。

イ) 原料投入・温調

ポリオール調合液 (R 液)、イソシアネート (I 液) を温調タンクに投入、安定した反応を得る為に温度調節する。

ロ) 吐出計量

メータリングユニットにてポリオール調合液、イソシアネートを規定比率にて吐出する。

ハ) 連続発泡 (連続ラミネート法)

面材供給装置から繰り出された 2 枚の表面材の間に、ミキシングユニットにて混合した発泡原液を連続的に散布し、発泡させる。その後、ダブルコンベアにより加圧されながら、自己接着性によってこれら三者が一体化した複合材を連続的に製造する。

ニ) 裁断

裁断機にて既定の寸法に裁断する。

ホ) 梱包

パレットに積載後、フィルム梱包する。

※内は CNF 添加時の追加工程。

この様に、ポリオール原料にあらかじめ CNF 水分散体を添加・混合することで、その後の混合～吐出・発泡以降の工程は、特に追加工程の必要は無い。よって、既存の製造ラインを利用して製造できる。

・ウレタンボード試作方法

実際の製造ラインを想定し、発泡機として丸加化工機社製高圧注機 MEG-ACMA を使用、金型への原料投入後に発泡する基材を蓋で上面から加圧する事により、ボード状の成形試作品を得た。試作ウレタン成形体の作製方法 (フロー) を図 119 に示す。

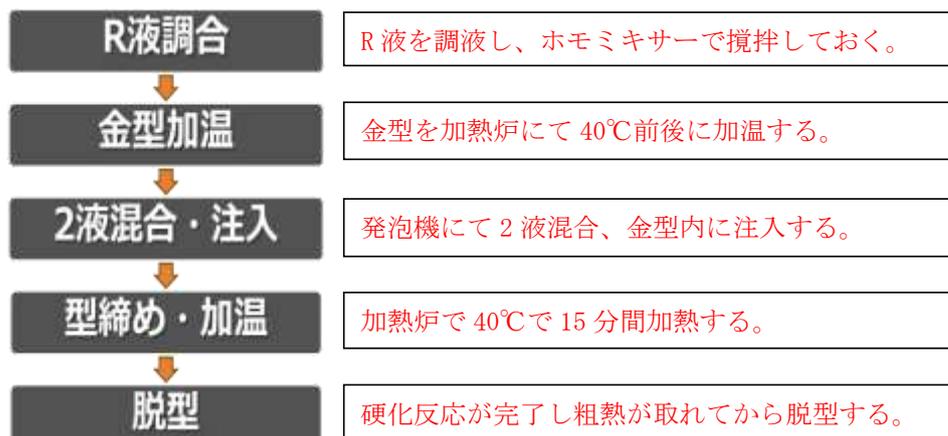


図 119 ウレタンボード試作品の作製方法

成形条件は以下の通り。

- ・ 注入型内寸 ; 800×800×50mm
 - ・ 注入機吐出圧力 (R/I 液) ; 12MPa ・ 吐出量 ; 500g/sec
 - ・ 温度条件 ; タンク内原料 20±1℃ ・ 金型予熱 40±2℃ ・ 養生加熱 40℃×15 分
- 発泡時の吐出量を表 28 に、使用発泡機と発泡工程を図 120 に示す。本試作では、CNF 添加による増粘の影響はなく、CNF 入りポリオールを用いた R 液でも、用いない場合と同様に吐出・成形可能であることを確認した。

表 28 発泡時の原料吐出量

		CNF 添加率 (総重量比)		
		0.00%	0.03%	0.06%
吐出量 (g/sec)	R 液	243.4	242.9	242.8
	I 液	256.1	251.0	251.0



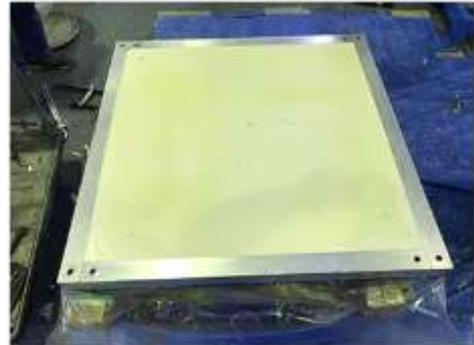
(a)



(b)



(c)



(d)

図 120 発泡工程の概要 (a) 使用発泡機 (b) 発泡原料の投入
(c) 蓋の固定、加熱炉投入 (d) 脱型

c 量産品の性能評価

・試作品の (外観および) 断面の SEM 画像

成形したウレタンフォームを水平方向にカッターナイフにてスライスし、その切片につき、SEM 観察を行った。図 121-123 にウレタン発泡体断面の SEM 画像を示す。CNF 添加により、大きな空隙が減少しセルが微細化・均質化される傾向が確認された。セルの微小化・均質化は、ポリオールを増粘によりセルの成長におけるセル同士の合一が抑制されたことで発現したものと考えられる。

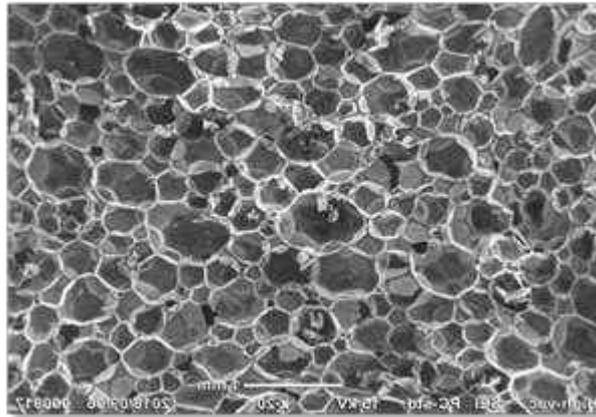


図 121 発泡断面の SEM 画像 (CNF0.00%)

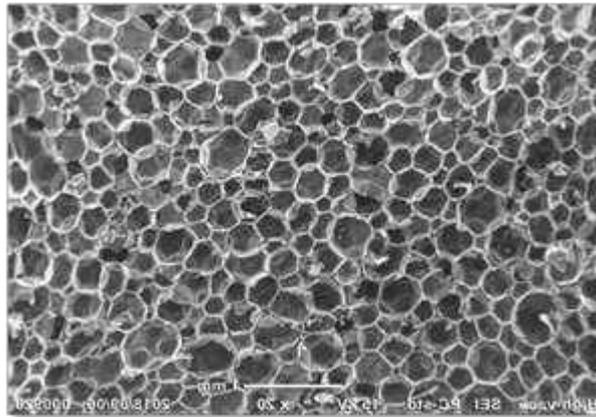


図 122 発泡断面の SEM 画像 (CNF0.03%)

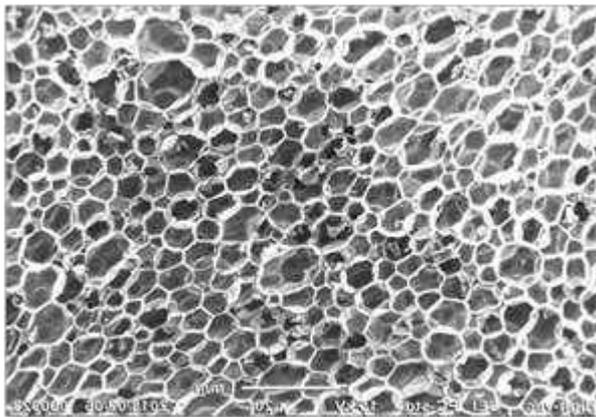


図 123 発泡断面の SEM 画像 (CNF0.06%)

- ・ウレタン成分と CNF における化学的相容性の評価

CNF 補強ポリウレタン発泡体の断熱材を開発する本研究において、CNF の分散状態を把握することが重要である。昨年度は CNF に含まれる結晶領域の複屈折性に着目し、CNF 添加ポリオールの偏光顕微鏡観察をすることで、発泡前の重合溶液における CNF の分散状態を把握した。本手法は分散液の観察には有用であるが、発泡体に対しては分解能の低さから、CNF 成分のみを観察できず、分散性評価に使用できなかった。そこで本研究では、蛍光分子を吸着させた CNF の蛍光顕微鏡観察により CNF の存在を確認する方策を取った。蛍光顕微鏡においては、輝度の高い励起光を用い、暗い視野の中で生じる蛍光発光を観察するため高い検出能力があり、検出したい部位を特異的に識別できる利点がある。一方、可視光を用いるため、空間分解能はおおよサブミクロン程度であることを鑑みると、CNF 一本を蛍光顕微鏡で確認することはできないものの、CNF の凝集塊を識別できる。ゆえに、CNF 凝集塊を指標とすることで、発泡体における CNF の分散性を評価した。

- ・ CNF 添加発泡体の蛍光顕微鏡観察

CNF 添加発泡体を 0.1 wt% Rhodamine-B のメタノール溶液に浸漬し、一昼夜静置することで CNF に蛍光色素を吸着させた。メタノールで 3 回洗浄後、ベンジルアルコールに置換して蛍光顕微鏡観察 (オリンパス社製、IX81、DSU ユニット付属) した。ベンジルアルコールに浸漬することで、発泡体と空隙の屈折率差を減少させ、発泡壁面での散乱の影響を小さくした。

- ・ CNF 無添加発泡体の蛍光顕微鏡観察

図 124 に CNF 無添加発泡体の蛍光顕微鏡像を示す。発泡体の内壁が発光しており、一部の蛍光色素が吸着したものと思われる。また、発泡セル全体が発光している箇所は、屈折率マッチのために用いたベンジルアルコールが浸透しなかったことによる散乱の影響と考えられる。特にコーナー部分は強く発光する傾向だった。一方、過去に検討したセルロース繊維添加発泡体における蛍光顕微鏡観察結果を参考図として示す (図 125)。同じ観察条件において、セルロース部分が高輝度で発光していた。ゆえに、本観察によって発泡体とセルロース部分を区別しうると判断した。

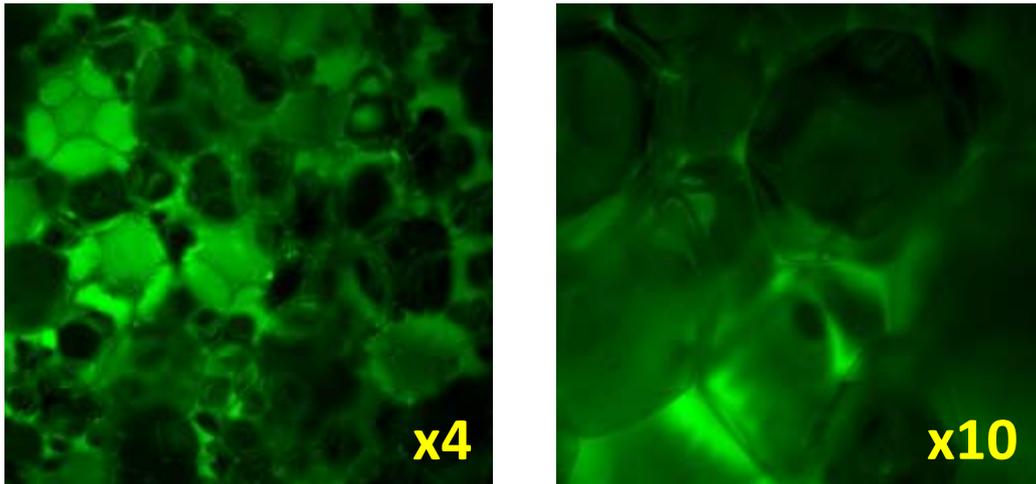


図 124 CNF 無添加発泡体の蛍光顕微鏡観察

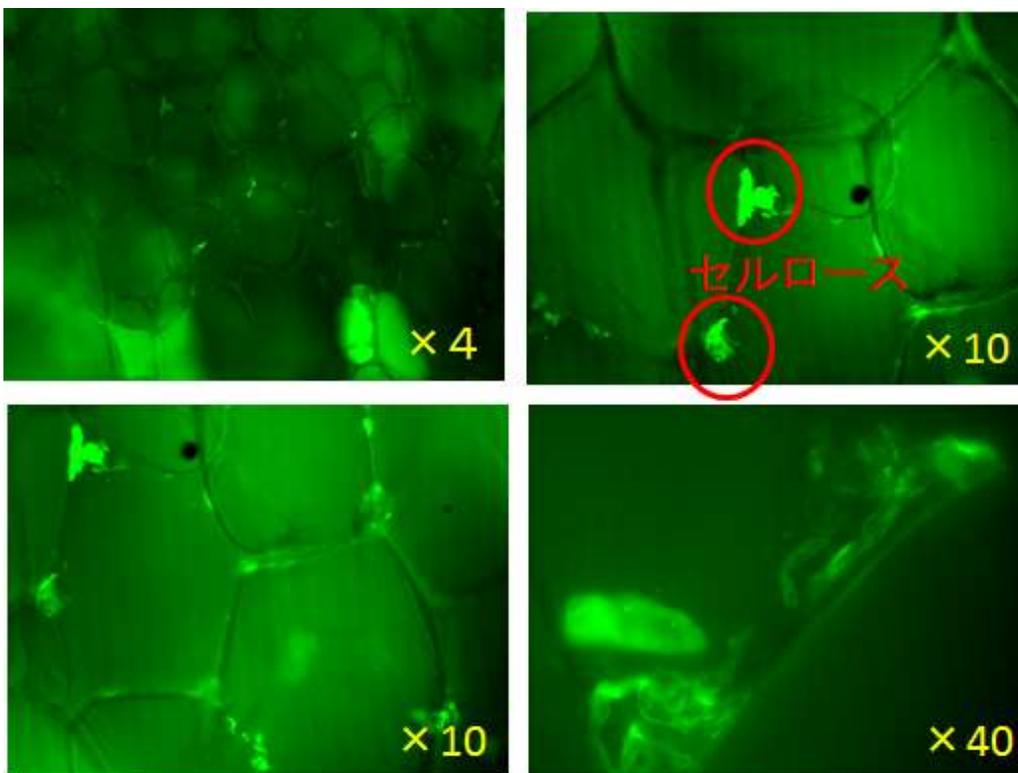


図 125 セルロース繊維添加発泡体の蛍光顕微鏡観察 (参考図)

・ CNF 添加発泡体の蛍光顕微鏡観察

図 126、127 に CNF 添加発泡体の蛍光顕微鏡像を示す。図 125 と同様に、発泡体内壁およびコーナー部分で発光が観察されたものの、図 125 に示したような明確な CNF の凝集塊は観察されなかった。TEMPO 酸化 CNF といった極細

CNF (直径数 nm) が微量 (0.1%未満) 添加されている本発泡体において、CNF 一本の蛍光観察は想定されない。一方、高比表面積により、CNF が凝集すれば、その凝集体はマイクロメートルスケールになることが予想される。本結果はそのような CNF の凝集塊を認めなかったことから、サブミクロンのオーダーにおいて CNF が良好に分散していると判断した。

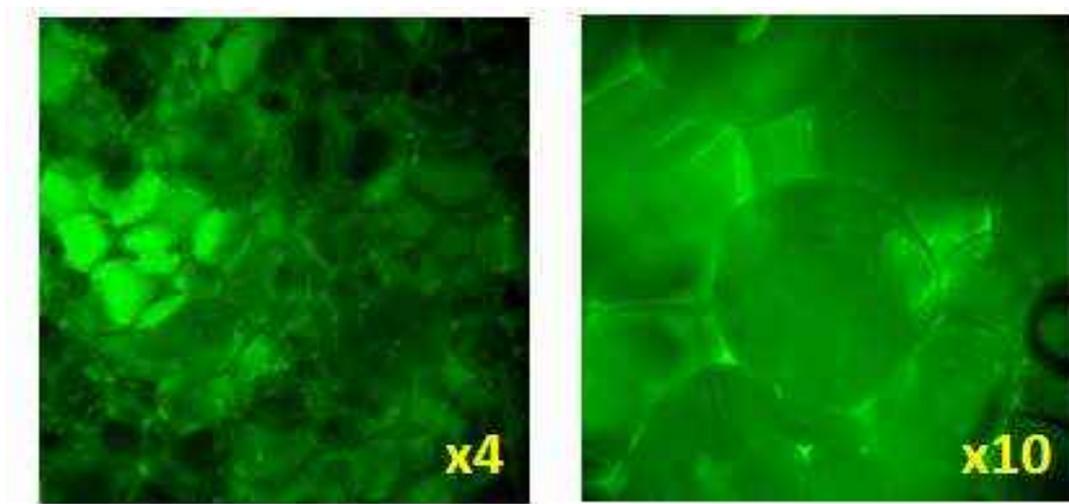


図 126 CNF 添加発泡体の蛍光顕微鏡観察 (CNF0.03%)

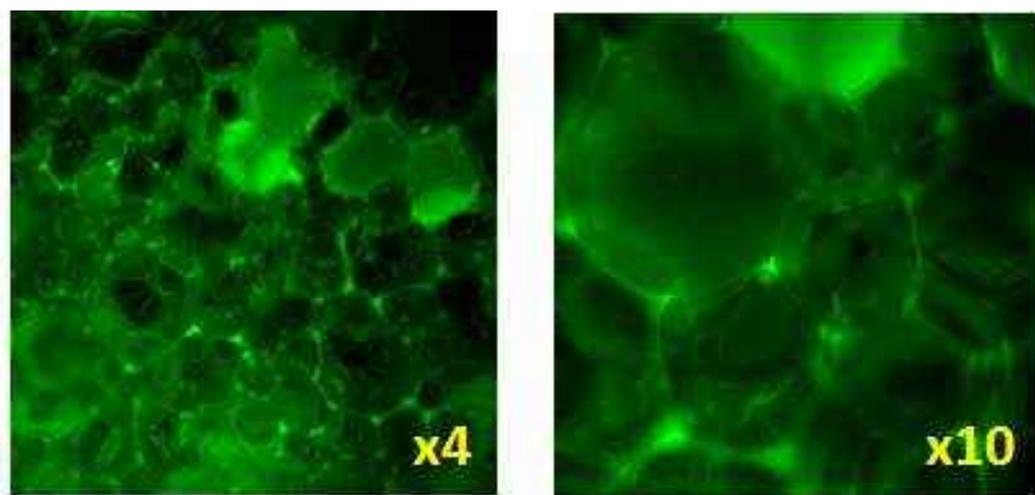


図 127 CNF 添加発泡体の蛍光顕微鏡観察 (CNF0.06%)

・熱伝導率

ウレタンにおける CNF 断熱性向上効果の確認は、熱伝導率測定により行った。
以下に試験条件を示す。

測定方法；熱流計法 (HFM 法、JIS-1412-2 に準拠)

試験片寸法；200L×200W×30T mm

測定方向；⊥ (発泡方向に対して垂直方向)

平均温度；23℃

使用装置；英弘精機社製 オートラムダ HC074 (図 128)



図 128 熱伝導率測定装置

求め方；加熱板と冷却熱板の間に試験体をセット後、温度を一定に保ち定常状態に達した際の、試験体両側の温度差、熱流計で測定した試験体を通過した熱流密度及び試験体の厚さから、熱伝導率 λ (W/mK) は次の式によって算出する。

$$\lambda = q \cdot d / \Delta T$$

q ; 試験体を通過した熱流密度 (W/m²)

d ; 試験体の平均厚さ (m)

ΔT ; 試験体両側の温度差 (K)

発泡フォームの CNF 添加率別熱伝導率試験結果について、表 29、図 129 に示す。

表 29 CNF 添加率別ウレタンボードの密度・熱伝導率

	CNF 添加率		
	0.00%	0.03%	0.06%
密度 (kg/m ³)	40.8	42.5	43.6
熱伝導率 (W/mK)	0.0202	0.0195	0.0193

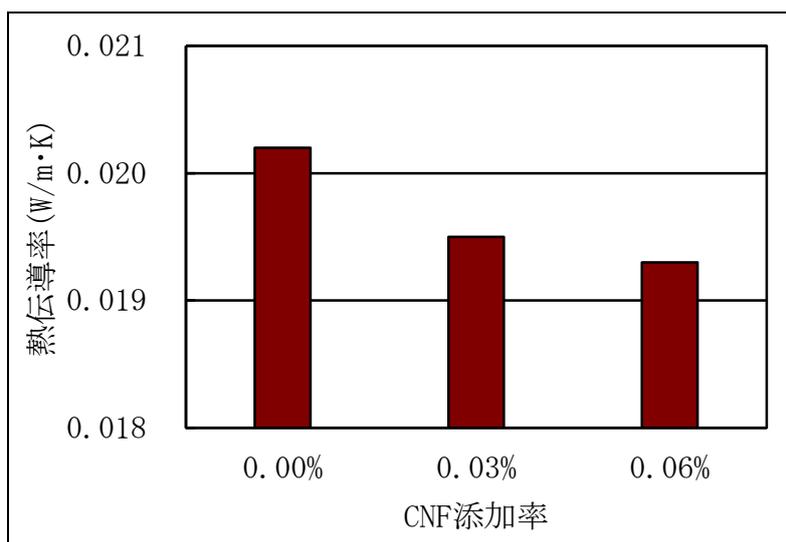


図 129 熱伝導率試験結果

CNF 添加により、密度は上昇したにも関わらず、熱伝導率は約 3.5～4.5% 低減した。これは、セル微小化・均質化による断熱ガス分子の対流伝熱減少が原因だと考えられる。

昨年度の報告と比べ CNF 添加による熱伝導率の低減率は低下した (表 30)。

表 30 熱伝導率低減率

	熱伝導率 (W/mK)		低減率 (%)
	CNF 0.00%	CNF 0.03%	
H29 (水発泡)	0.0288	0.0247	14.2
H30 (HFO 発泡)	0.0202	0.0195	3.5

その原因は、熱伝導率低減が対流伝熱の減少によるためだと推測する。断熱ガスが、分子量の小さい炭酸ガスから分子量の大きい HFO ガスになり元々の対

流伝熱が小さくなることで対流伝熱減少による熱伝導率低減効果が小さくなったものと推測する。したがって、セル微小化・均質化による熱伝導率低減効果は、より分子量の小さい断熱ガスのフォームにおいて顕著になると考えられる。

・機械的特性

ポリウレタン発泡体におけるCNF補強効果の確認については、JIS A 9521に準拠した圧縮強さ試験及び曲げ強さ試験により行い、CNF添加量の違いが強度に及ぼす影響を評価した。以下に各々の試験条件を示す。

(圧縮強さ)

試験体寸法； 50L×50W×30T mm

測定方向； // (発泡方向に対して平行方向)

試験速度； 3 mm/min

求め方； ひずみ10%時の強度、またはひずみ10%以下の降伏点における強度を圧縮強さとする。圧縮強さ σ_m (N/cm²) は次の式によって算出する。

$$\sigma_m = F_m / A_0$$

F_m ：変形率 10%以内に到達した最大の力 (N)

A_0 ：試験片の初めの断面積 (cm²)

(曲げ強さ)

試験体寸法； 200L×50W×25T mm

測定方向； ⊥ (発泡方向に対して垂直方向)

試験速度； 10 mm/min

スパン； 150mm

求め方； 曲げ強さ σ (N/cm²) は次の式によって算出する。

$$\sigma = 3PL / (2bt^2)$$

P ：最大荷重 (N)

L ：スパン (cm)

b ：試験片の幅 (cm)

t ：試験片の厚さ (cm)

発泡フォームのCNF添加率別圧縮強さ及び曲げ強さ試験結果について、表 31、図 130、図 131 に示す。

表 31 CNF 添加率別ウレタンボードの密度・強度

	CNF 添加率		
	0.00%	0.03%	0.06%
密度 (kg/m ³)	40.7	39.4	39.8
圧縮強さ (N/cm ²)	10.8	13.8	13.4
曲げ強さ (N/cm ²)	43.4	47.3	49.0

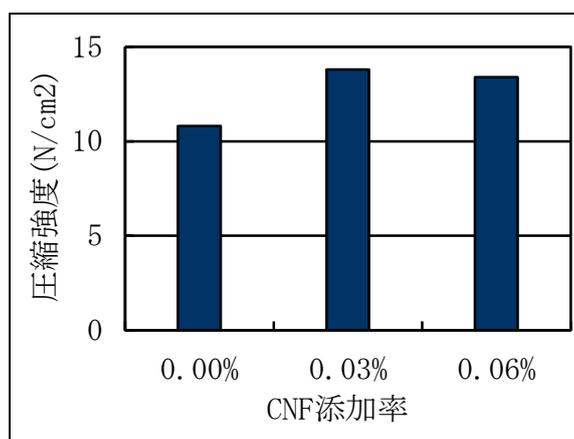


図 130 圧縮強さ試験結果

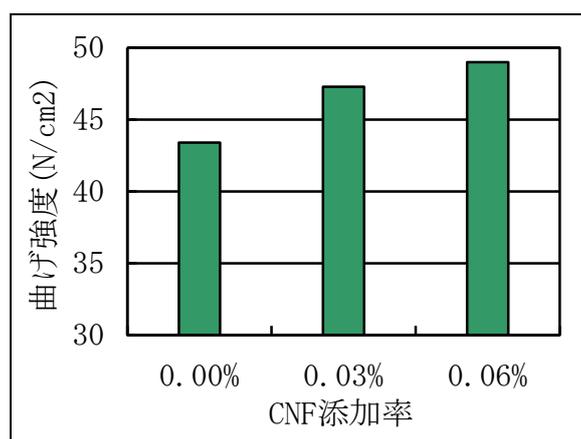


図 131 曲げ強さ試験結果

フォームの圧縮強さが僅か 0.03%の CNF 添加で約 28%、0.06%で約 24%、曲げ強さも CNF0.03%添加で 9%、0.06%で 13%増大している。これは、CNF による樹脂補強とセルの微小化・均質化による破壊の起点の減少が寄与した結果だと推定される。

・耐久特性

ポリウレタンの劣化の主要因に樹脂の加水分解による強度低下が挙げられる。発泡体の吸水性や吸湿性が上昇すると樹脂の加水分解が起りやすくなり、劣化が促進される。また、断熱材の透湿性が高い場合、断熱材内部および断熱材と壁間で起こる壁内結露による断熱材自身の劣化や住宅の壁材の劣化が起りやすくなる。吸湿・吸水性の CNF の添加による劣化への影響を把握するため、吸水量と透湿係数試験を行った (JIS A 9521 に準拠)。以下に試験条件を示す。

(吸水量)

試験体寸法 ; 100L×100W×25T mm

求め方 ; 試験片を23±3℃の清水の入った容器の水面下50mmに完全に没するように浸漬し、10秒間経過後に試験片を取り出し、鉛直から30℃傾斜した網目寸法が約3mmの金網に乗せて30秒間放置 (図132) させた後質量を測定し、これを基準質量とする。次に、再び清水に浸漬し、24時間吸水させた後、基準質量測定の時と同じ方法で質量を測定する。



図132 吸水量試験

表面積100cm当たりの吸水量 W_a (g/100cm²) は次の式によって算出する。

$$W_a = \{ (m_1 - m_0) / A \} \times 100$$

m_0 : 基準質量 (g)

m_1 : 最終吸水後の質量 (g)

A : 全表面積 (cm²)

(透湿係数)

試験体寸法；φ80×25T mm

求め方；JIS K 7225に準拠した透湿試験容器を準備し、塩化カルシウムを高さが20±5mmになるように投入する。試験片を透湿試験容器のくびれの位置まではめ込み、容器と試験片の隙間に蜜蝋を塗る（図133）。23℃×50%RHに設定した恒温恒湿槽に入れ、24時間間隔で試験体を取り出し質量を測定する。



図 133 透湿試験体

連続した2回の秤量における単位時間当たりの質量の変化 G_{12} ($\mu\text{g/h}$) を、次の式によって求める。

$$G_{12} = (m_2 - m_1) / (t_2 - t_1)$$

$m_2 - m_1$ ：連続した2回の秤量値の差 (μg)

$t_2 - t_1$ ：連続した2回の秤量間の経過時間 (h)

G ($\mu\text{g/h}$) は連続した5回の G_{12} の平均値とし、5回の G_{12} のそれぞれの値が $0.980G \sim 1.020G$ の範囲となったとき、試験を完了する。

透湿係数 (水蒸気透過度) ($\text{ng}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$) は次の式によって算出する。

$$W_p = (G/AP) \times 10/36$$

A ：湿気に暴露した側の試験片の面積 (m^2)

P ：水蒸気圧の差 (1,400) (Pa)

発泡ウレタンボードの CNF 添加率別吸水量及び透湿係数測定結果について、表 32 に示す。この結果から CNF 添加による吸水量、透湿係数の上昇はないと確認した。現行の添加率では、CNF 添加による劣化促進はないと言える。

表 32 CNF 添加率別ウレタンボードの吸水量・透湿係数

	CNF 添加率		
	0.00%	0.03%	0.06%
吸水量 (g/100cm ²)	1.12	1.11	1.13
透湿係数 (ng/(m ² ・s・Pa))	2.56	2.49	2.56

以上より、少量の CNF 添加量であることから、吸水性・透湿性への影響懸念はないと確認されたが、温度要因が加わった際にはボードの寸法変化による納まり不良の懸念も想定されるため、ASTM D2126 を参考に乾熱・湿熱 (高温高湿・低温) 処理時の寸法変化を確認した。

但し同試験は通常面材付きでの評価となるため、相対比較による参考評価となる。

試験体寸法；100L×100W×30T mm

求め方；試験体の各辺 (長さ・幅方向、厚み方向4箇所) の中心の長さをノギスで測定する。その後試験体を①乾湿処理 (70℃)、②湿熱処理 (70℃×95%RH)、③低温処理 (-30℃) の各槽に入れ、48時間養生する。養生後、試験体の各辺の長さをノギスで測定し、養生前と養生後の長さの変化率を算出する。

各試験体の乾熱・湿熱・低温処理後の寸法変化率測定結果を、表 33 に示す。この結果からは、総じて CNF 添加率の増加に伴い寸法変化率が抑制される傾向にあり、CNF による樹脂補強が、寸法安定性に寄与したと推察される。

表 33 CNF 添加率別ウレタンボードの各条件下での寸法変化率

		CNF 添加率		
		0.00%	0.03%	0.06%
乾熱処理後	長さ・幅	-0.7	-0.6	-0.6
	厚さ	1.0	0.4	0.2
湿熱処理後	長さ・幅	0.8	1.4	1.0
	厚さ	12.1	7.2	6.3
低温処理後	長さ・幅	-0.5	-0.2	-0.1
	厚さ	-1.4	-0.5	-0.4

吸水・透湿試験で CNF の吸水性・透湿性への影響はないと確認したが、水分吸着による断熱性の変化が想定されるため、経時における熱伝導率の変化を CNF 添加なしのフォームと比較した。

発泡成形した後の各試験体の経過日数による熱伝導率の変化を、表 34、図 134 に示す。時間の経過と共に、発泡フォーム中の断熱ガス (HFO ガス) とフォーム外の空気の置換により、その熱伝導率は上昇していくが、CNF 添加品を添加なし品 (ブランク) と比較すると、その傾向には顕著な差は確認されず、問題ないと判断された。

表 34 成形後経過日数による熱伝導率の変化

		経過日数 (days)				
		2	7	14	21	28
CNF 添加率 (%)	0.00%	0.0202	0.0210	0.0217	0.0225	0.0232
	0.03%	0.0195	0.0204	0.0210	0.0215	0.0220
	0.06%	0.0193	0.0204	0.0210	0.0217	0.0222

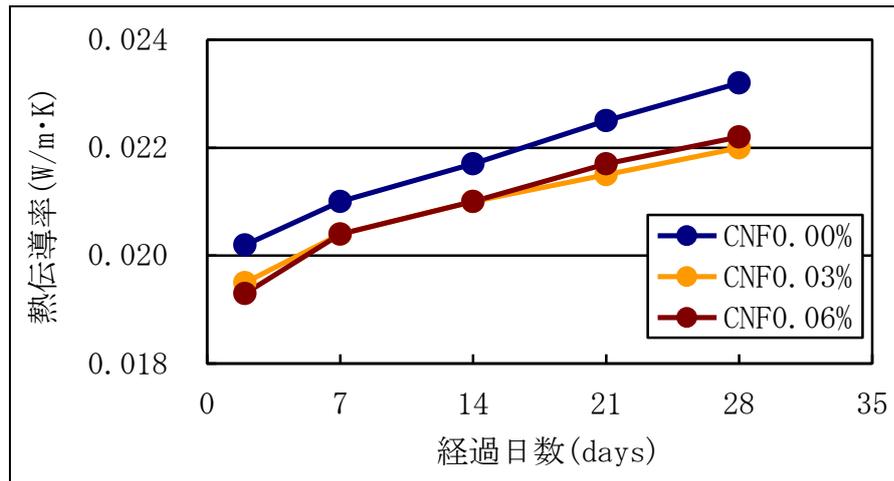


図 134 成形後経過日数による熱伝導率の変化

C 経済性の評価

表 35 には、本量産試作をもとに施工費まで含め算出した開発品コストと既存品コストの比較表を示す。既存の合板に対し、住宅 1 戸当たり 8,669 円のコストアップとなる。ここで、床部品は、既存部品と構成を変えていることから、単純な比較とはならないため、トータルでのコスト比較になる。次項のセルローズ系断熱材も含む部品コストで比較しても、後述するライフサイクルコストでも、他部素材同様、使用者にてコスト回収は可能である。

表 35 開発品と既存品のコスト比較

項目	使用量	単価	原価	備考
変動費				
R液	13.5 kg/戸	753 円/kg	10,166 円/戸	渠天市場価格より
i液	13.5 kg/戸	753 円/kg	10,166 円/戸	PP市販価格相場より
CNF	0.3 kg/戸	2,000 円/kg	540 円/戸	中期的CNF価格を想定
副資材	27.3 kg/戸	30 円/kg	819 円/戸	梱包資材等
電力	2.7 kW/戸	16 円/kwh	44 円/戸	使用電力=0.1kW/kg
計			21,734 円/戸	
固定費				
償却費	27.3 kg/戸	521 円/kg	14,223 円/戸	投資額(混練機、成型機他=100百万円)
人件費	27.3 kg/戸	750 円/kg	20,475 円/戸	3名×800万円/名
管理費等	27.3 kg/戸	30 円/kg	819 円/戸	
計			35,517 円/戸	生産量100kg/日
製造原価			57,251 円/戸	変動費+固定費
販管費			8,588 円/戸	製造原価×15%
施工費	2.0 日/戸	10,000 円/人/日	20,000 円/戸	軽量化による施工効率改善
計			85,839 円/戸	
合板	521.7 kg/戸	100 円/kg	52,170 円/戸	価格.comより
施工費	2.5 日/戸	10,000 円/人/日	25,000 円/戸	石膏ボード施工4日+ウクレ施工4日
計			77,170 円/戸	
コスト比較(開発品-既存品)				8,669 円/戸

3) 高断熱セルローズ系断熱材

(1)-①-ア-1) にて同時に実施

イ 床部品としての評価

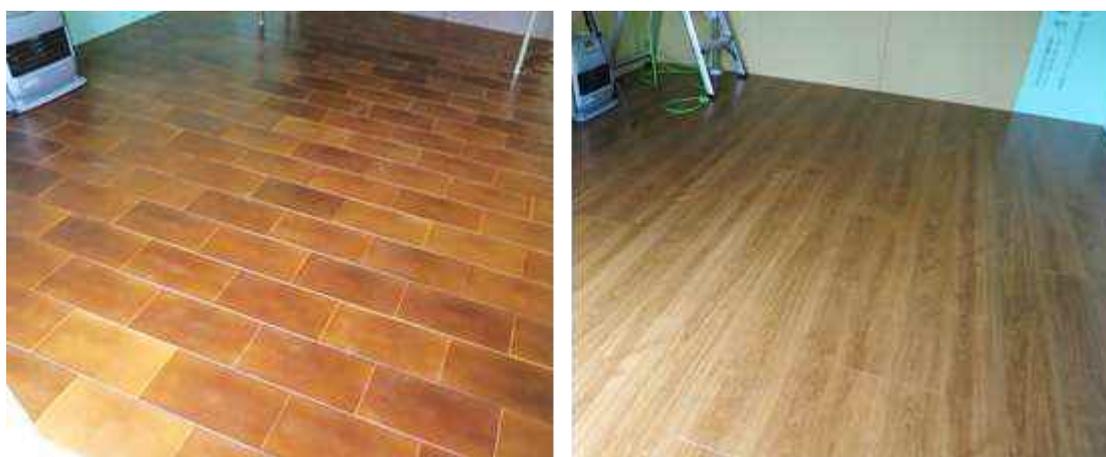
1) 床部品の試作

A 概要

量産スペックの床構成素材を用い、モデルルーム評価用の床部品の試作を実施した。この部品の熱貫流率は、 $0.27\text{W/m}^2\text{K}$ で、目標値 ($0.33\text{W/m}^2\text{K}$ 以下) を確保した。以下には、その詳細を示す。

B 床部品の試作および性能評価

床構成素材である CNF 添加高剛性 WPC フロア (15mm 厚) をテストハウス実証区 (西部屋) に敷設した (図 135)。対照区 (東部屋) には既存の木質ボード (MDF) 化粧フローリングを用いた。



(a)

(b)

図 135 フロア材敷設状況

(a) WPC フローリング (b) 既存 MDF 化粧フローリング

2) モデルルーム評価

A 概要

試作部品を用いモデルルームに施工し、実測評価を実施した。なお、既存部品との比較においては、外皮部品および (2) ①の内壁部品を施工した状態で実測評価を実施し、平均で 7.3% の CO_2 排出量削減となることが示された。また、モデルルーム設置に関しては、住宅メーカーに依頼し、施工における課題点、改善点のヒアリングを実施した。部品の構成が同じである点から既存部品とハ

ンドリング面で同等である回答を得た。以下には、その詳細を示す。

B モデルルームでの評価

a 施工方法

CNF 添加高剛性 WPC フロア (15mm 厚) および木質ボード (MDF) 化粧フローリング (15mm 厚) を実証区、対照区両室の床全面にそれぞれ敷設した。

b 既存品との施工性の比較

既存のフローリング材は材端部に実 (さね) 加工が施されており、雄実をフロアタッカーで固定した後隣接するフローリングの雌実を勘合させていく作業の繰り返しで、効率的な作業を実施するためには熟練を要する。一方、今回の開発品である WPC フロアは射出成形品であり、既存フローリングのような長尺サイズが製造できないため、敷設枚数が大幅に増えるという欠点が生じるが、実加工がないため、粘着テープや接着剤を用いて床面へ敷設する作業となる。この作業は既存フローリングの敷設作業に比較するとはるかに簡便であるため、総合的な施工性は既存品より優れる。

c 省エネ効果の検証

床 (天井・外壁・内層部品はすでに取付済み) 取り付け後のテストハウス両室 (西部屋：実証区、東部屋：対照区) の気温 (TA) 変化推移の一例 (72 時間) を図 136 に示す。

なお本データは、エアコンで両室を十分に加温 (暖房 24°C 設定で 8hr) し、エアコンを切った直後 (1hr 後) からのデータである。図 136 に示すように両室の TA は屋外 TA の変動に準じてほぼ同様に変動しており、明確な差は見られない。

一方、両室中央部で測定したグローブ温度 (TG) についてみると、実証区 TG が対照区に比較して高い状態が続く傾向が認められた (図 137)。

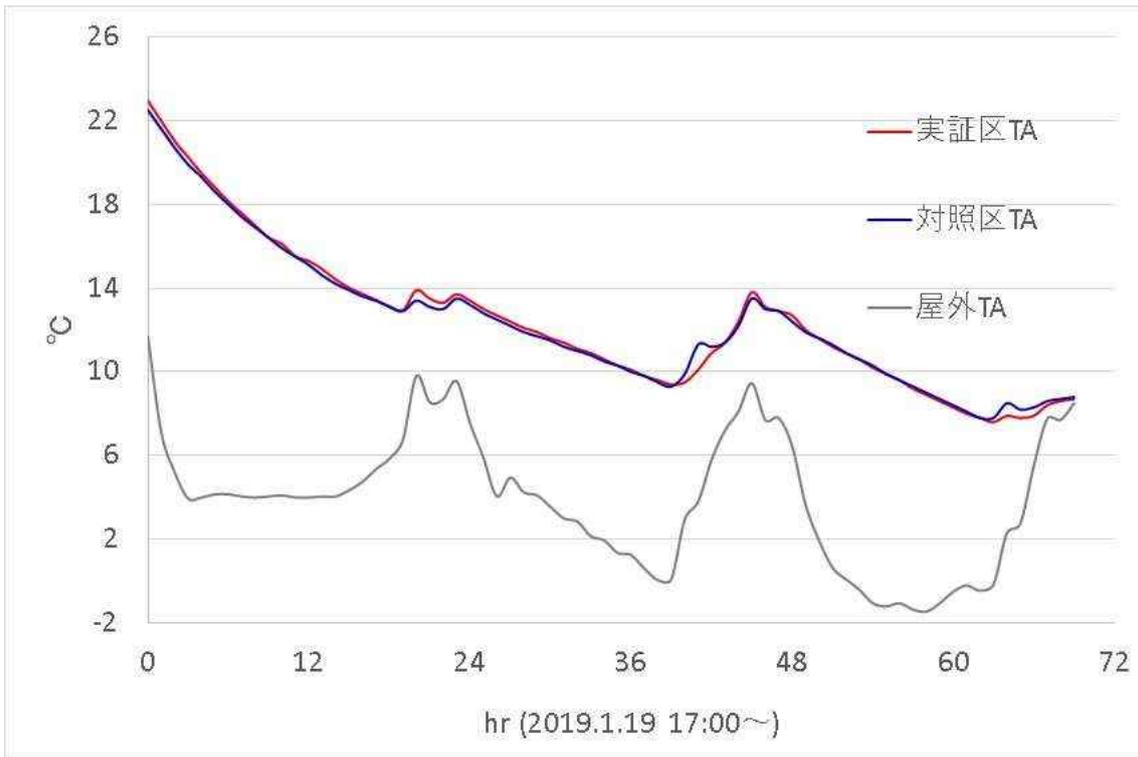


図 136 テストハウス両室および室外気温 (TA) 変化

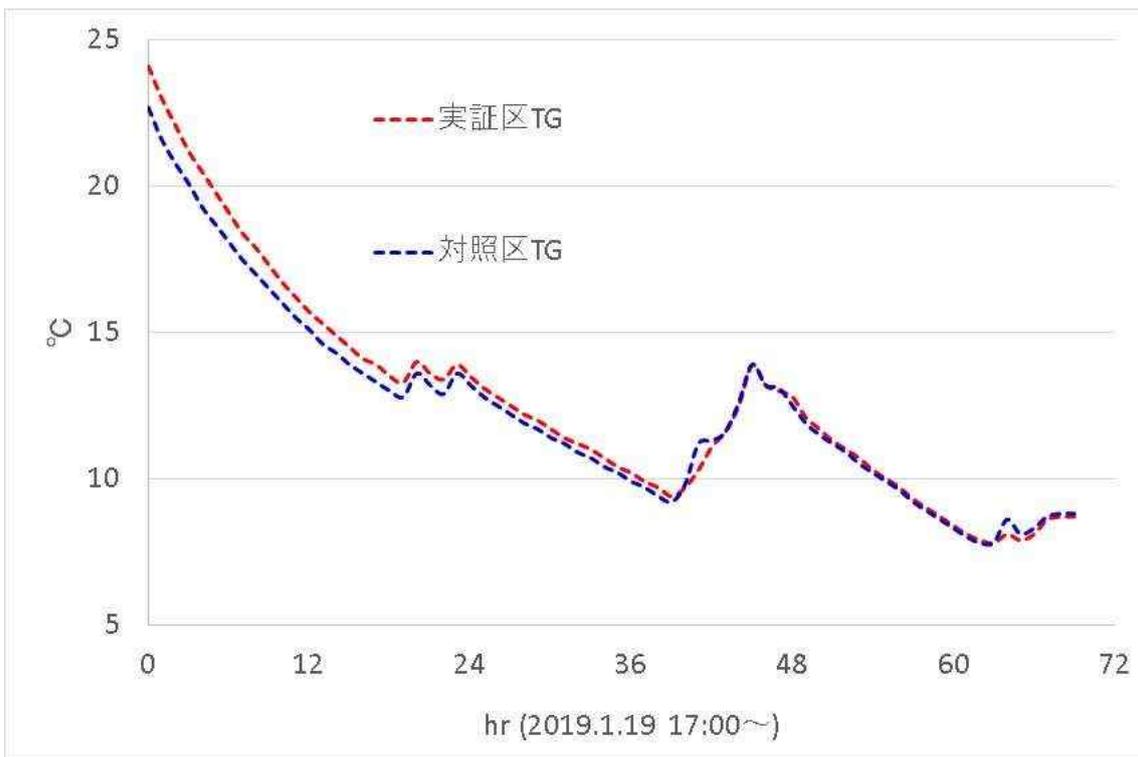


図 137 テストハウス両室のグローブ温度 (TG) 変化

この原因として、実証区と対照区における床部品表面熱流の違いに起因する表面温度の差が考えられる。図 138 に実証区と対照区における床部品表面で測定した熱流変動および温度変動を示す。床表面が周囲気温 (室内 TA) より高い場合、床部品から室内側へ熱が移動 (熱流値は+) し、床表面が周囲気温より低い場合、室内側から床内部へ熱が移動 (熱流値は-) するが、いずれの場合も実証区の床部品表面 (CNF 添加 WPC フロア) における熱流が、対照区の外壁部品表面 (既存 MDF フロア) より小さい。つまり、CNF 添加 WPC フロアの断熱性 (床裏への熱の伝達) および蓄熱性 (表面からの熱放散の抑制) が相対的に高いことが示されている。これにより、表面温度は高い状態を維持している時間が長いと考えられる。なお、この傾向は既に施工済みの内装部品表面および外壁部品表面でも確認された (それぞれ図 139、図 140)。すなわち CNF 添加不燃ボードおよび CNF 添加無機ボードが対照区の既存石膏ボードに比較して断熱性と蓄熱性に優れていると考えられ、これら部品表面材料の影響により、周囲からの熱輻射による影響を受ける室内グローブ温度 (TG) が対照区より高くなったものと考えられる。

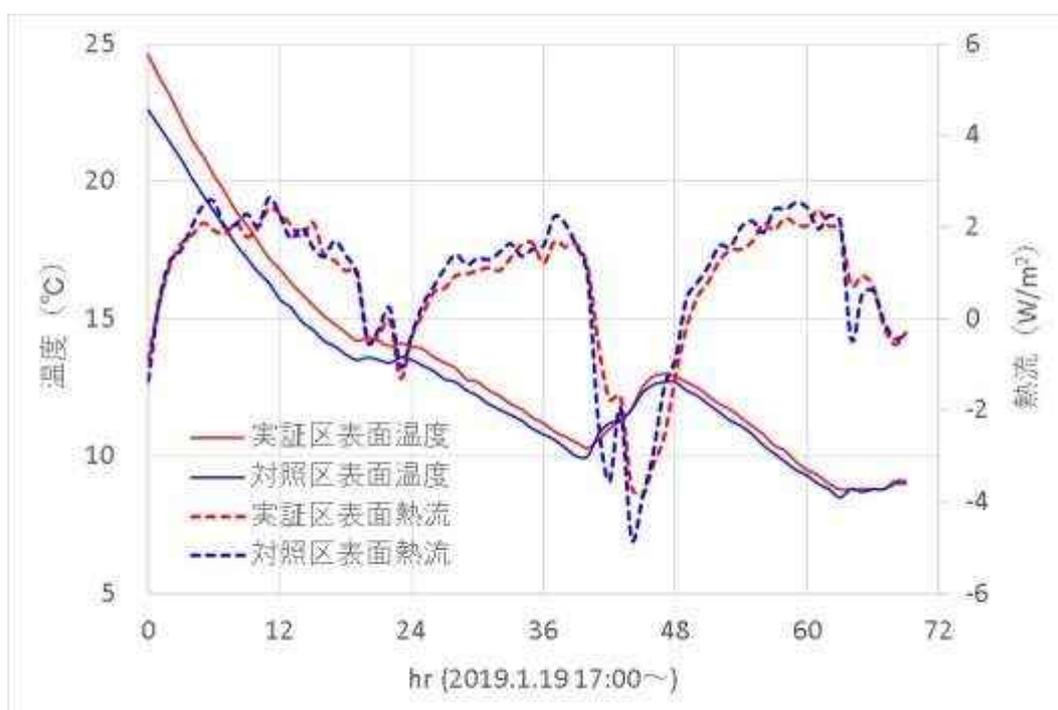


図 138 テストハウス両室における床部品表面の熱流・温度変化

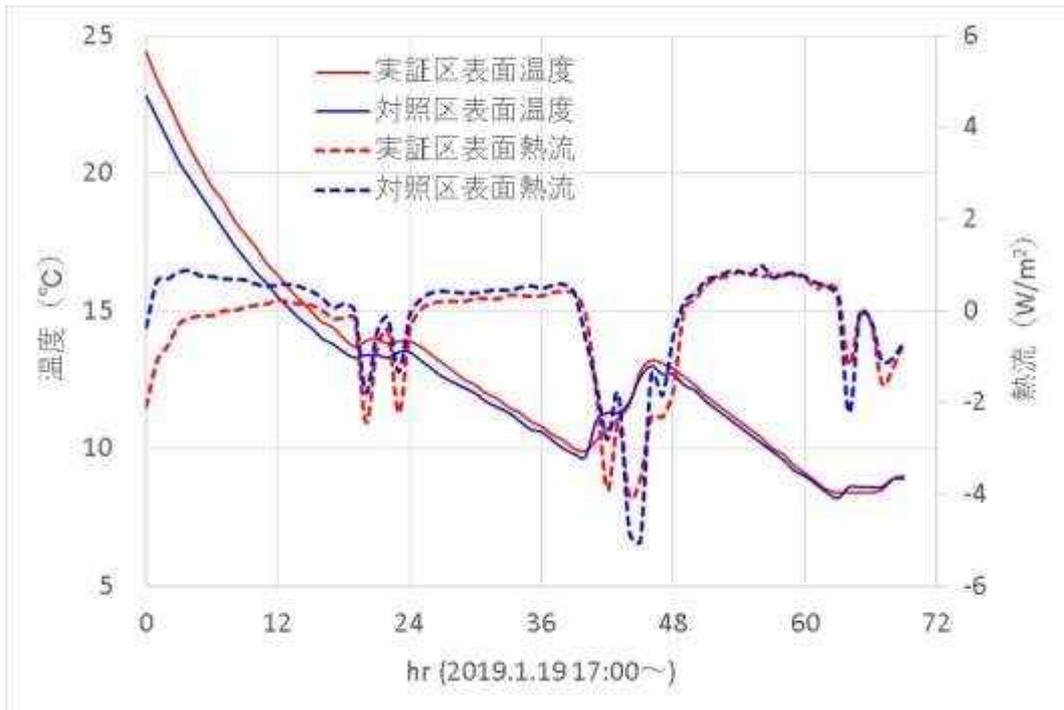


図 139 テストハウス両室における内装部品表面の熱流・温度変化

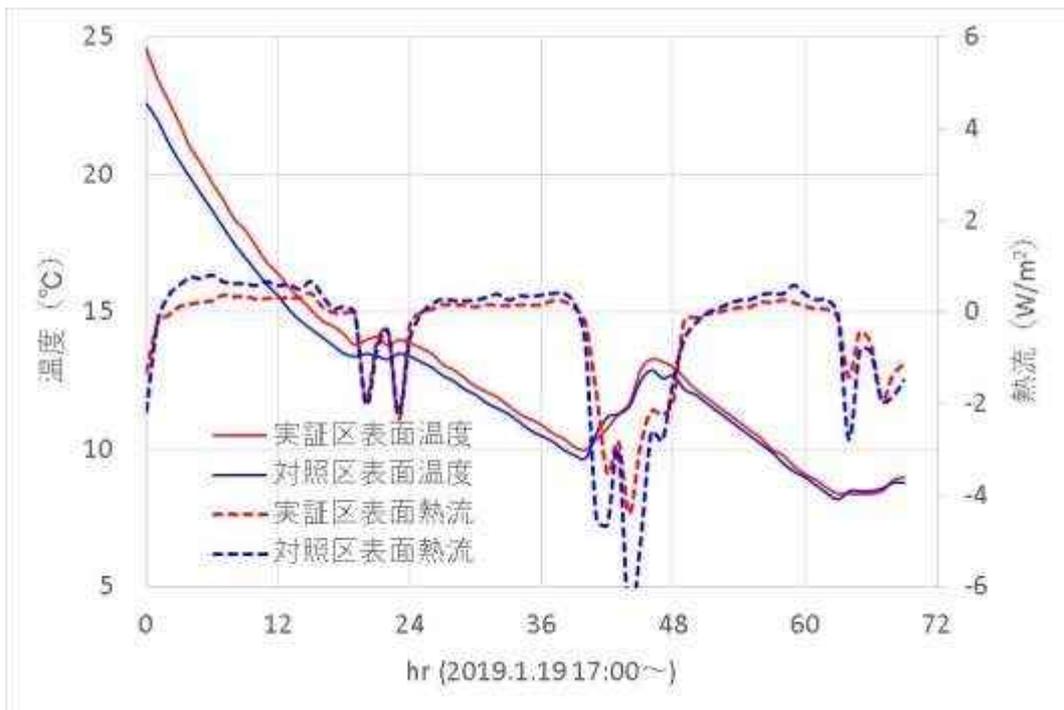


図 140 テストハウス両室における外壁部品表面の熱流・温度変化

電力削減効果は(1)-①-イ-2) 参照のこと。

d 住宅メーカーのヒアリング結果

今回施工を担当した真庭市内工務店へのヒアリングの結果、WPCフローリングの敷設作業が非常に簡便であり、現場における寸法調整の際の切削性も良く、熟練を要さないことから好評を得ており、リフォーム等におけるDIY製品としての可能性も指摘された。

④開口部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 開口断熱に対するCNF利用の検証

合わせガラス中間膜にCNFフィルムの利用を調査し(昨年度、前倒しで実施済み)、耐候性や日射透過率は現行中間膜フィルムと同等、熱膨張や弾性率は優れた結果を得られた。さらに、このフィルムを用い、合わせガラスを試作し、製造も可能であることが確認された。以下には、その詳細を示す。

A 多層ガラスにおける課題

窓の断熱化は近年の住宅高断熱化の中で重要な要素となっている。住宅への熱の出入りは図141に示すように夏場の熱流入は70%以上、冬場の熱流出は50%以上が窓からである。従って住宅の高断熱化には窓の断熱化が必須の課題である。



図141 窓断熱の必要性

高断熱性の窓が開発されており、YKK AP社製APW430シリーズに代表される高断熱性の樹脂窓が販売されている。図142にAPW430シリーズの断面を示し

た。断熱性は面積の大部分を占めるガラスの断熱性能で決定される。そのため高断熱の窓には3層ガラスが用いられる。さらには4層以上の空気層を持つ複層ガラスも販売されている。しかし、これらの多層ガラスは重量が大きく施工上の問題となっている。窓の断熱性が向上したことで、大きな窓を使用しても家の断熱性を損なうことがなく、大きな窓が採用される割合が増えている。ガラスの重量が120kgを超える場合も多く、施工に6人以上が必要となる。さらに、国内の施工職人の人数が減少するとともに高齢化しており、ガラスを軽量化することは喫緊の課題となっている。



図 142 APW430 の構成

B 中間膜への利用に関する調査およびサンプル作製

前記のガラス重量の軽減のため、3層ガラスの中間部のガラスをフィルムへの置き換えが提案されている。空気層の厚みは中の気体の対流限界以内にする必要があり、空気層の厚みが大きくなると対流による熱伝達のために断熱性能が低下する。そのため、高断熱多層ガラスに中間の仕切りは必須であり、そのためにガラスを用いたのでは重量が増加する。例えば、特開昭59-35048号公報では中間膜としてポリエステルフィルムを使用する技術が公開されている。しかし、ポリエステルフィルムは熱膨張が大きく、温度が高温になった場合にたるみが生じる欠点がある。3層ガラスの中間空気層の温度は夏場に80℃近くまで昇温する可能性があり、熱膨張の大きなポリエステルフィルムではこの問題を解決することは不可能である。CNFを用いたフィルム(図143)は透明で、熱膨張率が小さい特徴がある。これを用いた3層ガラスを試作し、性能の評価、窓の試作体を制作した。試作ガラスのサイズはこの時点で入手可能な

CNF フィルムの最大サイズの A4 サイズである。

図 144 に試作した 3 層ガラスを示した。通常の 3 層ガラスと同様に 3 層であることは見た目には分からず、中間にガラス板を使用したものと外観上は差異のないものであった。

ガラスの性能についてシミュレーションによる評価を行った結果を表 36 に示す。3 層ガラスの中間に使用する気体として、空気、アルゴン、クリプトンを想定し、 1m^2 当たりの重量を計算した。実際の製品には熱線反射膜がコーティングされるが、熱線反射膜があると性能が熱線反射膜の性能に左右され、違いが分かりにくいため、計算では熱線反射膜を持たないガラスで評価した。ガラス全体の重量は 2 層ガラスで平米当たり 15kg であったが、3 層ガラスでは 22.5kg となり、1.5 倍となる。一方 CNF フィルムを用いた場合はほとんど重量の増加はなかった。断熱性能では中間ガラスの厚みが気体となるため、若干の向上が見られた。



図 143 試作に使用した CNF フィルム



(a)



(b)

図 144 (a) 試作 3 層ガラス

(b) 試作 3 層ガラスコーナー部拡大

400mm 幅の CNF フィルムが入手可能となった事から、使用可能なサイズの 3 層ガラスを制作し、組み付け性の確認を行った。弊社 APW430 ダブルアクション窓への組み込みを行った。ガラスの飲み込み厚さは公差を吸収できるように設計されているが、中間のガラスが CNF フィルムとなり、ガラスの厚みが薄くなるため、完全に互換とはならず、ガasketの厚みの調整、あるいはガラスのスペーサの調整が必要であった。

表 36 3層ガラスの性能比較

ガラス構成		ガラス総厚 22mm	ガラス総厚 22mm	ガラス総厚 22mm
		中空層 16mm 3mm ガラス 3mm ガラス	中空層 7mm 中空層 6mm 3mm ガラス 3mm ガラス 3mm ガラス	中空層 7.95mm 中空層 7.95mm 3mm ガラス 0.1mm フィルム 3mm ガラス
中空層 充填ガス	空気	2.721	2.253	2.136
	アルゴンガス	2.620	2.052	1.958
	クリプトンガス	2.622	1.834	1.769
ガラス重量		15.00	22.50	15.14 <small>PETフィルム(比重1.4g/cm³)の場合</small>

各充填ガスにおける断熱性能(U値):W/(m²・K) 重量:kg/m²



(a)

(b)

図 145 (a) APW430 内観 (b) APW430 内観、障子を開いた状態

C 開口部の断熱における展望

・ 3層ガラスへの CNF フィルムの応用

開口部の断熱性の要求は高く、すでに新築で単盤ガラスが用いられることは少なくなっている。弊社の製品では3層ガラスを使用する APW430 (図 145) が一定の比率を占めるに至っており、北海道等の断熱基準の 1、2 地域以外に 4 地域、5 地域でも使用されるようになってきている。断熱性能の要求の中で、3層ガラスの需要は高まっている。しかし、3層ガラスの重量は施工を困難にしており、特に都会の狭小地での施工は非常に困難になっている。中間膜を CNF フィルムとすることで、重量はかなり軽減されるため、期待は大きい。

中間膜をして使用できる CNF フィルムは曇りのない透明なフィルムであることを要求される。現状ではそのようなフィルムのサイズはまだ小さく、重量軽減の効果が大きい大きなサイズのガラスを作ることができない。1800mm 幅があれば殆どのサイズをカバーできるが、少なくとも 1600mm 幅程度の CNF フィルムが求められる。中間膜に CNF フィルムを使用した 3層ガラスを普及させるためにはフィルムサイズの拡大が必須である。また、価格もまだ高価で、3mm ガラスが平米 400 円程度で流通するのに比べ、数倍の価格となっている。価格については施工性の向上により克服できる可能性が大きく、これまで 6 人で行っていた作業が 4 人になればコストの上昇を吸収できる可能性があり、現在の価格でも一部には採用の可能性はある。

・ 窓フレームへの CNF の応用、課題

窓の構成はガラスのほかにフレームがあり、日本では材質としてアルミか硬

質 PVC が採用されている。窓には防火性能が要求されるため、世界的には住宅用の窓として硬質 PVC が主流で、ヨーロッパでは 50% 程度の窓が PVC 製である。日本でも断熱基準の 1、2 地区の北海道では住宅用窓のほとんどが硬質 PVC 製である。硬質 PVC は酸素指数が 43 程度あり、空气中で燃焼が継続しない。硬質 PVC は粒子性があり、この構造は加工後も保たれている。図 146、図 147 に硬質 PVC の原料パウダーの断面の走査型 SEM 写真、TiO₂ を添加し加工した硬質 PVC 中の TiO₂ の分散状態を透過型 SEM で確認した図を示した。加工前の PVC 粒子が加工後も保たれており、粒子中へ TiO₂ が入っていないことを確認できる。CNF を添加する場合、この粒子性が課題となる。図 148 に PVC に様々な表面処理を行った CNF を添加し板状に加工したサンプルの強度の結果を示した。いずれも大きな変化がなく、CNF は PVC 粒子の境界に単に充填剤として存在していると考えられる。

PVC には微結晶が数%含まれ、この微結晶が架橋点のように働くため、加工時にも粒子性が保たれている。硬質 PVC の分解開始温度は 180°C で、加工は 190°C 付近で行われる。そのため、安定剤を多量に配合し、分解を抑えながら加工される。微結晶の融点は 220°C であるため、加工時に微結晶が熔融せず、粒子性が保たれている。微結晶が熔融すれば粒子性はなくなり均一な熔融状態となると期待できる。しかし、この温度では分解速度が非常に速く、加工することができない。そのため、硬質 PVC へ CNF を添加するためにはより高温で PVC の分解を抑制できる優れた安定剤が必要となる。

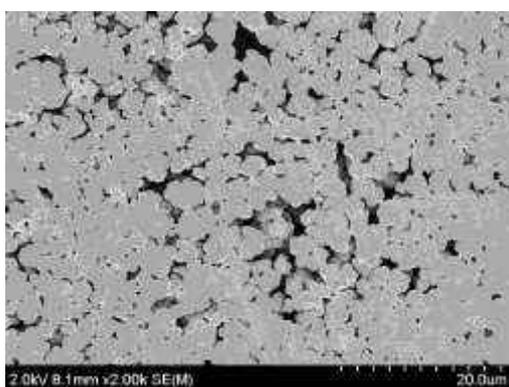


図 146 パウダーの断面の走査型 SEM 写真

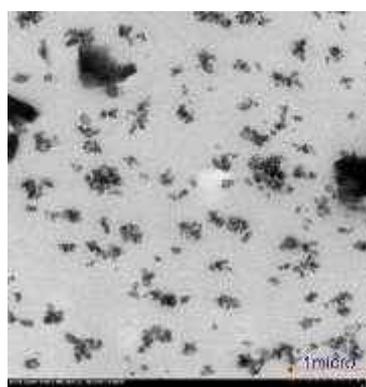


図 147 加工 PVC 中の TiO₂ 分散状態

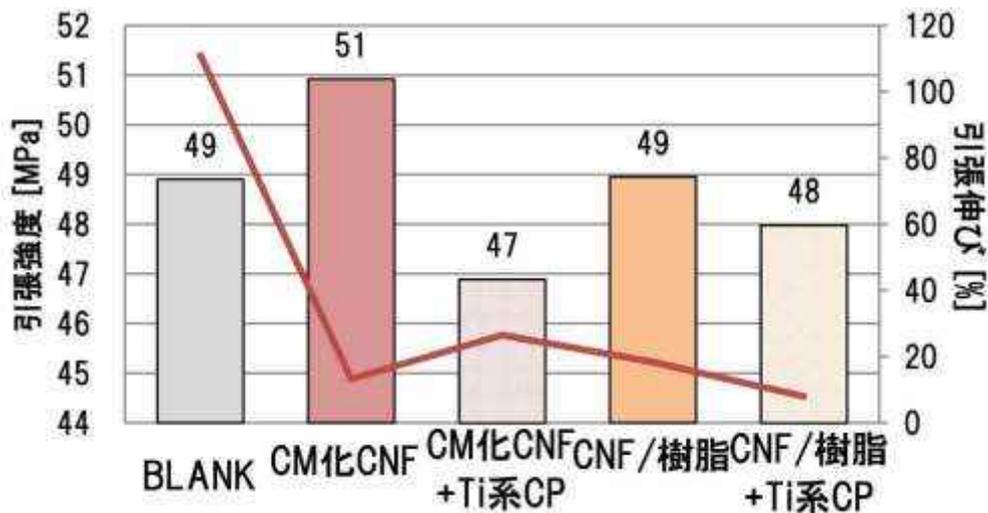


図 148 硬質 PVC への CNF の添加

PVC 用の安定剤としては、カドミウム、バリウムの組み合わせ、有機鉛、有機スズ、亜鉛化合物等が用いられる。世界の潮流はより無毒な安定剤の使用に向かっており、ヨーロッパ、日本では亜鉛化合物が主流になりつつある。また、EU では鉛安定剤の使用が実質的に禁止されようとしている。CNF を硬質 PVC へ分散させる前提として微結晶が熔融する 220℃で安定に PVC を加工できる無毒安定剤の開発が必要である。

イ 開口部品としての評価

本事業では、モデルルームの開口部品評価は実施しないが、開口部品は最も断熱性に影響を及ぼすことが予見される。そこで、ガラス部分の熱伝導率が室内の温度環境に及ぼす影響をモデルルーム仕様でシミュレーションを実施した。熱伝導率が約 0.8W/mK 下がることで、1 時間で室内温度に 2℃の差が生じることが確認された。以下には、開口部における変動因子と室内温度環境変化の関係の詳細を示す。

図 149 に示すモデルルームを解析対象として、有限体積法に基づく熱流体数値解析シミュレーションにより開口部品がモデルルームの断熱性に及ぼす影響を調査した。モデルルームの平面エリアは 3600mm×3600mm の 8 畳スペース、高さは 2400mm とし、一般住宅における標準的なサイズを想定した。

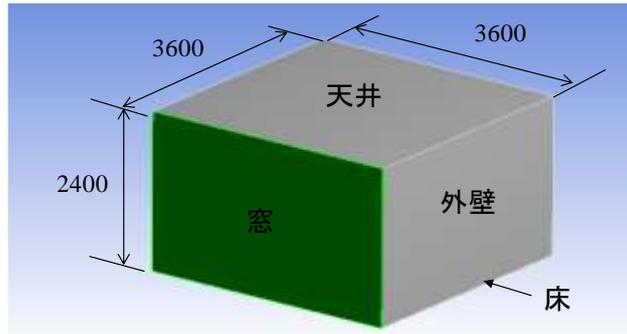


図 149 解析対象としたモデルルーム (開口部あり)

モデルルームの 4 つの側面のうち 1 面のみ開口領域とし、その全面 3600mm×2400mm を窓に設定した。窓の材料には、熱伝導率が異なる典型例として、従来のガラスと軽量化や断熱特性に優れるポリカーボネートを選択した。解析に使用した両開口部品の特性値を表 37 に示す。厚さはいずれも市販材の標準値である 8mm とした。ガラスと比較し、ポリカーボネートの密度は半分以下、熱伝導率は 5 分の 1 以下である。

天井、壁、床には、市販材の標準的な材料構成を想定し、最終的に表 38 に示す特性値を数値解析に入力した。天井はグラスウール断熱材 (厚さ 200mm、熱伝導率 0.050W/mK) と銘木合板 (厚さ 4.0mm、熱伝導率 0.160W/mK) から成る 2 層構造、壁は合板 (厚さ 5.0mm、熱伝導率 0.160W/mK) 、セルローズ断熱材 (厚さ 100mm、熱伝導率 0.040W/mK) 、石膏ボード (厚さ 12mm、熱伝導率 0.220W/mK) の 3 層構造、床はフローリング (厚さ 6.0mm、熱伝導率 0.160W/mK) 、合板 (厚さ 15mm、熱伝導率 0.160W/mK) 、セルローズ断熱材 (厚さ 100mm、熱伝導率 0.040W/mK) の 3 構造とした。いずれも等価熱伝導率 κ^* と等価熱貫流率 λ^* を次式により算出した。

$$\kappa^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\kappa_i}} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{\frac{t_1}{\kappa_1} + \frac{t_2}{\kappa_2} + \dots + \frac{t_n}{\kappa_n}}$$

$$\lambda^* = \frac{\kappa^*}{\sum_{i=1}^n t_i} = \frac{1}{\frac{t_1}{\kappa_1} + \frac{t_2}{\kappa_2} + \dots + \frac{t_n}{\kappa_n}}$$

ここで、 n は層の総数、 t_i は各構成材料の厚さ、 κ_i は熱伝導率を意味する。

表 37 解析に入力した開口部品の厚さと材料特性

	厚さ $t(\text{m})$	密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	熱伝導率 $\kappa(\text{W/m}\cdot\text{K})$	熱貫流率 $\lambda(\text{W/m}^2\cdot\text{K})$	比熱 $c(\text{J/kg}\cdot\text{K})$
ガラス	0.008	2500	1.0	125	837
ポリカーボネート	0.008	1200	0.19	23.8	1250

表 38 解析に入力した天井、壁、床の厚さと材料特性

	厚さ $t(\text{m})$	等価熱伝導率 $\kappa^*(\text{W/mK})$	等価熱貫流率 $\lambda^*(\text{W/m}^2\text{K})$
天井	0.204	0.0507	0.24
壁	0.117	0.0452	0.37
床	0.121	0.046	0.34

冬季の環境を想定し、外気温を 0°C に保持した環境下で、モデルルームが室温 25°C の初期状態から放置された場合の非定常熱流体解析を実施した。数値解析により得られた室内温度分布の時間変化を図 150 に示す。本図ではモデルルームの中央断面における温度分布を示し、断面において左側に開口部、右側に壁が位置する。上段には開口部がガラス、下段にはポリカーボネートである場合の結果を示し、左から順に 20 分後、40 分後、60 分後の温度分布を示す。いずれの時刻においてもガラスに比べポリカーボネートの室温が高い結果を得た。断面中央の 60 分後の温度を比較すると、ガラスの場合が 278K 、ポリカーボネートの場合が 280K で、およそ 2K の温度差が生じた。

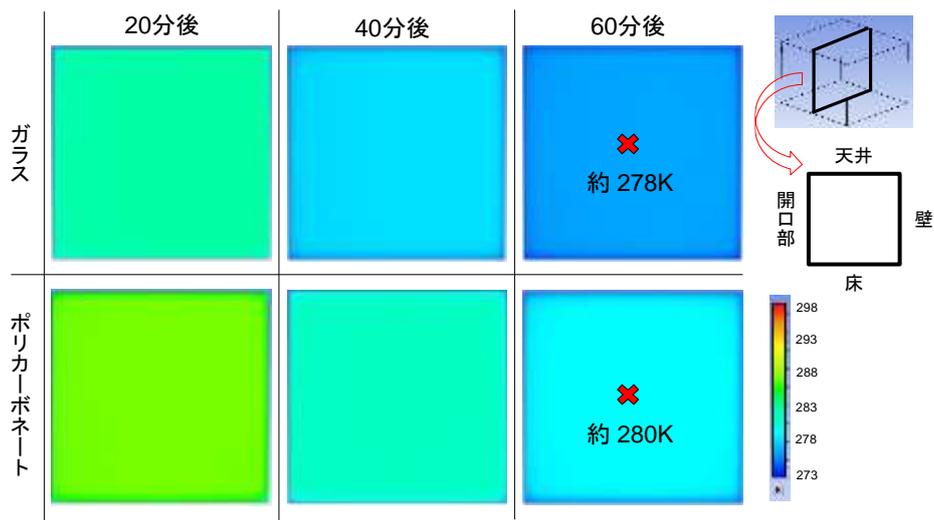


図 150 モデルルーム中央断面における温度分布の時刻変化

次に、モデルルームの中央における温度の時刻変化を図 151 に比較する。温度が低い外部へ熱が失われ、時間経過に伴って室温は初期状態 298K (25°C) から減少し、70 分以上経過した後定常状態に至ることがわかる。ガラスの場合と比較し、ポリカーボネートの場合の室温の低下が緩やかであり、保温性が高いことが確認できる。

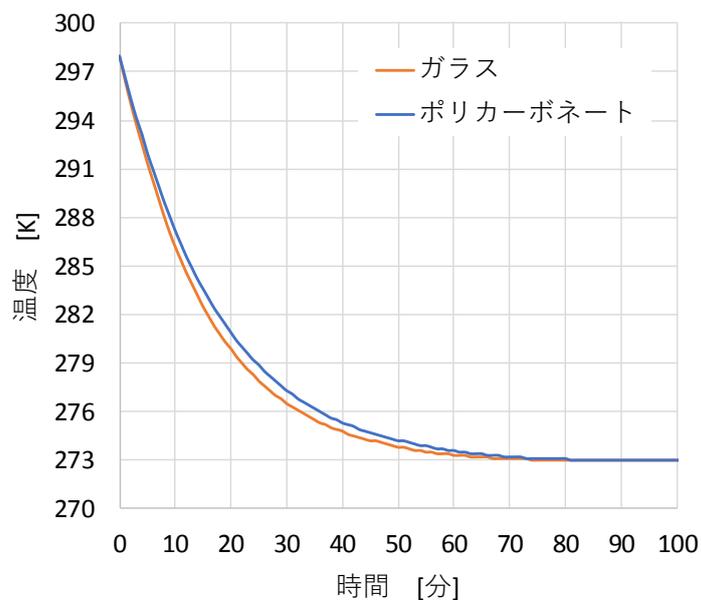


図 151 モデルルームの中央における温度の時刻変化

図 152 に定常状態に至るまでの時間を比較する。ガラスの場合、定常状態に至るまでの時間は 74 分であったのに対して、ポリカーボネートの場合は 81 分と長くなり、断熱効果が高いことが定量的に検証できた。なお、定常状態における室温はいずれの場合も同じで、外気温に等しい 273K である。

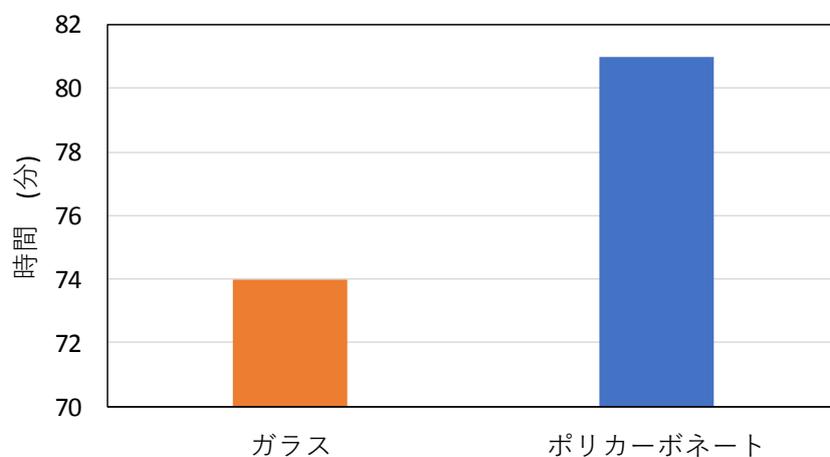


図 152 定常状態に至るまでの時間

(2) 内装部品における断熱性向上に関する技術開発

①内装部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 内壁構成素材の試作

1) 高断熱内装不燃ボード

A 概要

量産 (実用化) に則した条件で、CNF 添加高断熱内装不燃ボードの量産試作を実施した。この量産試作品の熱伝導率は、 0.174W/mK で、目標値 (0.200W/mK 以下) を確保した。さらに、経済性を確保できる仕様 (使用材料、配合、生産設備および生産能力) を確立した。以下には、その詳細を示す。

B 量産試作および量産試作品の評価

a 原材料

量産試作に使用した材料を表 39 および図 153、154 に示す。市販のプレミックス軽量モルタルおよび CNF を使用した。ナノファイバーは平均繊維径 $10\sim 50\text{nm}$ で、長さの異なる 5 種類を使用した。

表 39 使用材料

材料	種類	メーカー	物性等
セルロース ナノファイバー	BiNFi-s (ビンフィス)	IMa-10002 極長	粘度 8、053 (mPa・s) 濃度 2.2 (wt.%)
		BMa-10002 長	粘度 7、857 (mPa・s) 濃度 2.0 (wt.%)
		Wfo-10002 標準	粘度 5、680 (mPa・s) 濃度 2.0 (wt.%)
		Afo-10002 短	粘度 4、733 (mPa・s) 濃度 2.0 (wt.%)
		FMa-10002 極短	粘度 1、377 (mPa・s) 濃度 2.0 (wt.%)
軽量モルタル	太平洋ライトモルタル	太平洋 マテリアル(株)	—
練混ぜ水	上水道水	—	—



図 153 CNF の外観



図 154 市販の軽量モルタル

b 量産試作

表 40 に示すとおり、高断熱内装不燃ボードの配合検討を行い、テーブルフロー値、密度および圧縮強度の結果を踏まえて、No.21 の配合を選定した。図 155-158 に、配合検討および量産試作の状況を示す。

練混ぜは一般的なモルタルミキサ (10ℓ) を用いて行った。ナノファイバーは予め練混ぜ水に混入した。表に示すファイバー混入率は、練混ぜ水に占めるナノファイバーの質量比率である。

配合の選定は、ボードの生産性 (モルタルの流動性) の指標であるテーブルフロー値、またボードの熱伝導率に影響する供試体の密度の結果を重視し、できるだけナノファイバーの混入率を高めることを意識して行った。その結果、BMa (長) のナノファイバーを練混ぜ水に 0.15% 混入し、水モルタル比 0.50 の軽量モルタルを高断熱内装不燃ボード量産用の配合に選定した。

この配合であれば、一般的なコンクリート製造設備 (ミキサ、型枠、養生設備など) を用いて、高断熱内装不燃ボードの量産が可能である。

表 40 高断熱内装不燃ボード配合検討

No.	ファイバー種類	水モルタル比	ファイバー混入率%	テーブルフロー			供試体		圧縮試験		備考
				①	②	ave.	質量 g	密度 g/cm ³	荷重 kN	強度 N/mm ²	
1	無混入	0.40	0.00	-	-	-	-	-	-	-	
2	FMa(極短)	0.45	0.89	-	-	-	-	-	-	-	
3	AFo(短)	0.40	0.75	-	-	-	-	-	-	-	
4	AFo(短)	0.40	0.50	-	-	-	-	-	-	-	
5	無混入	0.40	0.00	218	218	218.0	278	1.4	11.4	5.8	
6	無混入	0.45	0.00	190	191	190.5	250	1.3	8.5	4.3	
7	IMa(極長)	0.50	0.25	229	228	228.5	289	1.5	11.9	6.1	
8	IMa(極長)	0.60	0.17	197	194	195.5	262	1.3	6.4	3.2	
9	WFO(標準)	0.50	0.20	226	228	227.0	227	1.2	10.9	5.6	
10	無混入	0.40	0.00	213	214	213.5	214	1.1	10.3	5.2	
11	WFO(標準)	0.45	0.11	223	222	222.5	223	1.1	12.1	6.1	
12	WFO(標準)	0.40	0.13	255	255	255.0	255	1.3	18.3	9.3	
13	WFO(標準)	0.45	0.22	241	241	241.0	241	1.2	14.0	7.1	
14	WFO(標準)	0.50	0.40	248	247	247.5	248	1.3	13.3	6.8	
15	WFO(標準)	0.55	0.27	231	232	231.5	232	1.2	9.7	4.9	
16	WFO(標準)	0.55	0.18	217	218	217.5	218	1.1	8.2	4.2	
17	BMa(長)	0.45	0.11	230	230	230.0	230	1.2	12.1	6.1	
18	BMa(長)	0.55	0.18	205	206	205.5	206	1.0	7.0	3.6	
19	BMa(長)	0.50	0.25	227	226	226.5	227	1.2	11.0	5.6	
20	BMa(長)	0.45	0.11	222	222	222.0	222	1.1	11.4	5.8	
21	BMa(長)	0.50	0.15	216	216	216.0	216	1.1	10.1	5.1	量産用配合



図 155 モルタルミキサによる混練



図 156 型枠への打設



図 157 水中養生



図 158 気中乾燥

c 量産品の性能評価

・熱伝導率

表 40 の配合 No.21 で試作したボードの熱伝導率を 0.174W/mK であり、目標 (0.200W/mK 以下) を達成した。

・機械的特性

本検討において、熱伝導率と生産性を重視し配合を選定したが、最低限ボードの運搬や設置に耐える強度を確保することができた。しかし、ナノファイバーの種類による強度への影響など、さらに検討を行う余地がある考える。

・耐久特性

本検討において、ボードの生産工程における乾燥による変形、ひび割れなどの防止対策として、出荷までの養生方法として脱型から 24 時間水中養生、その後ボードを立てて気中養生を行った。ボード設置以降の長期の耐久性 (変形、ひび割れを含む) については、今後の検討課題である。

C 経済性の評価

外皮部品は、建築研究所の省エネ計算に基づき、平均的な坪数の住宅で算出できるが、内壁の面積は、間取りにより大きく変わってくる。そこで、ここでは、15 畳 LDK、6 畳 3 部屋の 3LDK と想定し、住宅 1 戸あたりの面積とした (15 畳 ; $50\text{m}^2 + 6$ 畳 $20\text{m}^2 \times 3 = 110\text{m}^2$)。は、一般的な坪数のは、表 41 には、本量産試作をもとに施工費まで含め算出した開発品コストと既存品コストの比較表を示す。石膏ボードに対し、住宅 1 戸当たり 3,570 円コストアップとなる。石膏ボードに関しては、前述したとおり、安価な建材であり、この点では、軽量コンクリートに対してもコスト面では勝てない。しかしながら、耐久性の面では、本開発品のほうが大きなアドバンテージを有しており、メンテナンス面を加味すると、このコスト差はないといっても過言ではない。

表 41 開発品と既存品のコスト比較

	項目	使用量	単価	原価	備考	
開発品	変動費	軽量コンクリート	825.0 kg/戸	80 円/kg	66,000 円/戸	軽量コンクリート相場より
		CNF	8.3 kg/戸	1,000 円/kg	8,250 円/戸	中期的CNF価格を想定
		副資材	825.0 kg/戸	10 円/kg	8,250 円/戸	梱包資材等
		電力	330.0 kW/戸	16 円/kwh	5,280 円/戸	使用電力=0.4kW/kg
		計			87,780 円/戸	
	固定費	償却費	825.0 kg/戸	16 円/kg	13,200 円/戸	投資額(粉砕機、混練機、成型機他=50百万円)
		人件費	825.0 kg/戸	8 円/kg	6,600 円/戸	1.5名×600万円/名
		管理費等	825.0 kg/戸	30 円/kg	24,750 円/戸	
		計			44,550 円/戸	
		製造原価			132,330 円/戸	生産量1600kg/日
		販管費			19,850 円/戸	変動費+固定費 製造原価×15%
	施工費	職人人件費	2.5 日/戸	10,000 円/人/日	25,000 円/戸	軽量化による施工効率改善+クロスレス
	計			177,180 円/戸		
既存品	石膏ボード	1,650.0 kg/戸	29 円/kg	47,850 円/戸	吉野石膏通販価格	
	クロス	110.0 m ² /戸	416 円/m ²	45,760 円/戸	サンゲツ通販価格	
	施工費	職人人件費	8.0 日/戸	10,000 円/人/日	80,000 円/戸	石膏ボード施工4日+クロス施工4日
	計			173,610 円/戸		
	コスト比較(開発品-既存品)			3,570 円/戸		

2) 高断熱ウレタンボード

(1) -③-ア-2) にて同時に実施

イ 内壁部品としての評価

1) 内壁壁部品の試作

A 概要

量産スペックの内壁構成素材を用い、モデルルーム評価用の内壁部品の試作を実施した。この部品の熱貫流率は、 $0.18\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ で、目標値 ($0.29\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 以下) を確保した。以下には、その詳細を示す。

B 内壁部品の試作および性能評価

内壁部品の製作は、各種内壁構成素材とスギ枠材を用いて幅 900mm×高さ 1、800mm のパネル化することにより作製し、テストハウス室内壁内側に取り付け固定した (図 159)。

実証区 (西部屋) に CNF 添加による高断熱化された各種構成素材を用いた内壁部品を、対照区に既存製品の構成素材を用いた外壁部品を取り付けた。実証区、対照区における外壁部品の断面構成を表 42 に示す。



図 159 内装部品 (パネル) 作成と取り付けの様子

表 42 内装部品の断面構成

	室内側 ←	→ 天井側	
実証区 (西部屋)	内装壁(15mm)	断熱層 (40mm)	外壁下地(15mm)
	CNF添加高断熱 内装不燃ボード	CNF添加高断熱 ウレタンボード	CNF添加高断熱 内装不燃ボード
対照区 (東部屋)	内装壁(15mm)	断熱層 (40mm)	外壁下地(15mm)
	既存無機ボード (石膏ボード)	既存ウレタン断熱材	既存無機ボード (石膏ボード)

2) モデルルーム評価

A 概要

試作部品を用いモデルルームに施工し、実測評価を実施した。なお、既存部品との比較においては、(1) 外皮部品も同時に施工した状態で実測評価を実施し、平均で 7.3%の CO₂ 排出量削減となることが示された ((1)-①-イ-2) 参照)。また、モデルルーム設置に関しては、住宅メーカーに依頼し、施工における課題点、改善点のヒアリングを実施した。部品の構成が同じである点から既存部品とハンドリング面で同等である回答を得た。以下には、その詳細を示す。

B モデルルームでの評価

a 施工方法

(2)-①-イ-1)-B に記した方法で製作した各種内装部品パネルをテストハウス実証区 (西部屋)、対照区 (東部屋) にそれぞれ配した。取り付けは既存室内壁に胴縁を介してパネルをビス止めした。配置できない個所については市販ウレタンボードで被覆した。

b 既存品との施工性の比較

今回は、研究室において試作した小割の部品を用いたため、対照区における既存大判製品に比較するとパネル化作業が煩雑になったが、実用化により大判パネルが製造可能になれば、施工性になんら変わりはないと考えられる。

c 省エネ効果の検証

(1)-①-イ-2) 参照のこと

d 住宅メーカーのヒアリング結果

今回施工を担当した真庭市内工務店へのヒアリングの結果、今回開発された内装構成素材の中、不燃内装ボードは既存製品（石膏ボード）より軽量かつ同様のビス止めが可能であり、高断熱ウレタンボードに関しては、既存ウレタン製品同様、カッターナイフによる寸法調整が可能であることから、いずれの開発品も取り扱いに関して高評価を得た。

②浴室壁部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 浴室壁構成素材の試作

1) 高断熱ウレタンボード

(1)-③-ア-2) にて同時に実施

2) 高断熱内装不燃ボード

(2)-①-ア-1) にて同時に実施

3) 構成による高断熱化

本事業成果の高剛性 FRP ((2)-③-ア-1) 参照) を用いたサンドイッチパネルにより、最大の断熱層を確保できる構成を確立し、量産試作およびこれを用いた浴室壁評価を実施し、目標の断熱性能を確保した((2)-②-イ-2))。次に重要なポイントは、断熱層の断熱品質の確保となる。そこで、ここでは、空隙制御材の管理について追加検証を実施した。

A はじめに

材料内に空隙を多数有する、いわゆる多孔質材料の力学的性質はこれまで粉末冶金分野において先導的に解明されてきた。粉末冶金法は、固相法ゆえに固体粒子間での隙間を充てんできず、作製される焼結金属は多孔質となる。したがって、空隙のない緻密材（例えば、溶解材や鍛造材）に比べて、強度・剛性といった構造材料に必要な主要力学的性質が低下する。このような特性変化は焼結金属だけでなく、多孔質構造ならばセラミックスやプラスチックでも同様に生じる。ここでは、主要力学的性質の一つであるヤング率を取り上げ、空隙の

全体に占める割合 (気孔率) や寸法がヤング率 (以下、弾性率と記す) にどのように影響を及ぼすかを数値シミュレーション (有限要素法解析) によって明らかにする。

B 気孔率と弾性率の関係

焼結体の力学的性質において、気孔率との関係を議論する場合、強度に及ぼす影響がまずは注目される。強度は構造に敏感な力学的性質なので、気孔率のほかに気孔の形状や気孔分布に依存する応力集中によっても影響されるから、理論的にはより複雑な扱いとなるはずである。しかし、実際には気孔率に適当な実験定数を組み合わせた、言わば実験式に類する扱いが多い。扱いの基本は気孔率を有効断面積の変化に対応させて導くものであり、代的なものとして、Bal'sin による以下の扱いが有名であり、焼結体の強度 S と緻密体の強度 S_0 の強度比は

$$\frac{S}{S_0} = (1 - \phi)^m$$

なる形で表わされる (eq.1)¹⁾。ここで、 ϕ は気孔率、 m は実験定数である。焼結体の中でも焼結金属においては強度の実測値が気孔率の増加とともに下に凸状の非線形的に低下することから、以下のような指数関数 (eq.2) で表わされることもある。

$$\frac{S}{S_0} = \exp(-b\phi)$$

ここで、 b は実験定数である。

一方、弾性率－気孔率の関係では、弾性率が構造に鈍感なパラメータであるがゆえ、eq.1、2 の形がそのまま流用されてもよい (標記を $S \rightarrow E$ に変える意)。実際に式 eq.1、2 を用いる場合もあり、応力集中係数を加味する場合もみられる。以上のような実験式的扱いに対し、弾性率を理論的に表現することも行なわれる。Mackenzie²⁾によると、気孔の形状が完全な球を対象とする固体材料が均質等方性ならば、相対弾性率 E/E_0 と ϕ の関係は $\phi < 30\%$ において近似的に次のように表わすことができる (eq.3)³⁾。

$$\frac{E}{E_0} = 1 - \frac{3(1-\nu_0)(5\nu_0+9)}{2(7-5\nu_0)} \cdot \phi$$

ここで、 E は焼結体の弾性率、 E_0 、 ν_0 はそれぞれ緻密材の弾性率、ポアソン比である。eq.3 より、理論的には相対弾性率は気孔率の一次関数で表わされることがわかる。ここで、 $\nu_0=0.28$ とおくと、近似式として

$$\frac{E}{E_0} \approx 1 - 2\phi$$

が成り立つ (eq.4)。本式も弾性率—気孔率の関係を表す近似式としてしばしば使われる¹⁾。

図 160 は、エクセルのソルバー機能を使い、 $\phi < 40\%$ の範囲で算出した弾性率—気孔率の関係を表している。これから、 $m=2.52$ および $b=2.93$ が得られた。両者を比較すると eq.1 のべき乗則がより線形的にふるまい、eq.4 をより近似できることがわかる。ここで式 eq.4 は近似式であり、しかも気孔率の一次関数として表現しているので、次節では実際に近い状況を想定できる有限要素法によって相対弾性率の変化を調査する。

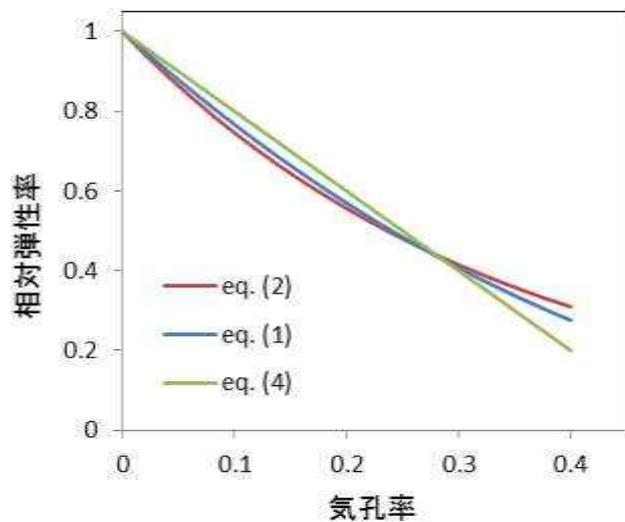


図 160 経験式 (eq.1、2) および理論モデル (eq.4) による気孔率と相対弾性率の関係

C 有限要素法による弾性率の予測

気孔率と弾性率の関係において、前節では経験式や理論モデルについて紹介した。しかし、理論は無限場での空隙を仮定しているが、実際には空隙の形状や位置の分布が様々に変化し、また表面近傍と内部では応力場は異なることから、理論モデルには限界がある。そこで、比較的自由に空隙モデルを作成できる有限要素法 (以下、FEM と記す) によって気孔率と弾性率の関係を明らかにする。ここでは、薄板に貫通円孔が複数存在する状況を多孔質体と仮定した 2 次元モデル (平面応力に基づく 2 次元弾性 FEM 解析) および内部に球形空隙を

有する 3次元モデル (3次元弾性 FEM 解析) により弾性率を予測する。

図 161 (a) (b) に 2D および 3D モデルの境界条件を示す。用いた要素はそれぞれ定ひずみ三角形要素、四面体要素であり、空隙の点対称を保つためにモデル形状を正方形および立方体とした。そして、モデル下の y 軸方向のみを固定端とし上方方向にひずみレベルで 0.1%の変位境界を与えた。材料定数としては弾性率 5.0GPa、ポアソン比 0.2 を仮定し、また 2D モデルの厚さは 0.01mm とした。2D モデルの空隙は貫通円孔であり、1つの円孔が全体の体積の 1%になるような寸法とし、気孔率 ϕ がそれぞれ 1、2、4、9、16 および 25%とした。また、3D モデルでは1つの球空隙が全体の体積の 1%とし、1、8、14、27、 および 35%となる要素分割とした。なお、ここで用いた FEM の数値計算ソフトは ANSYS である。

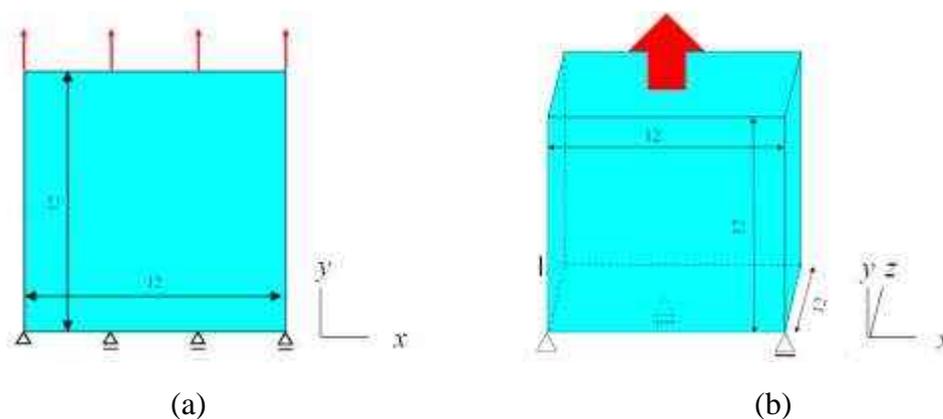
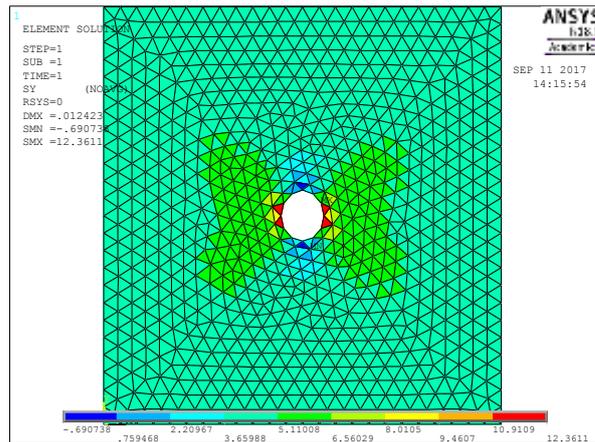
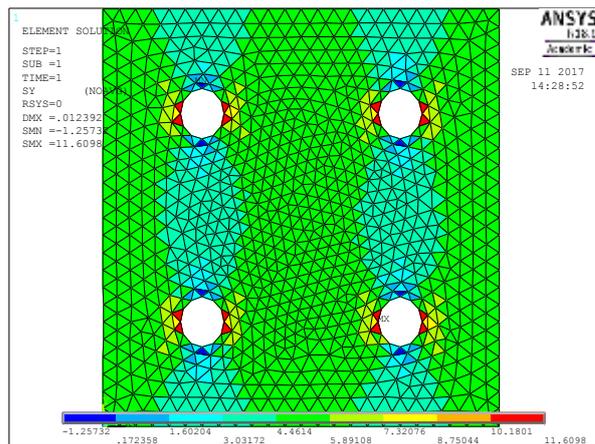


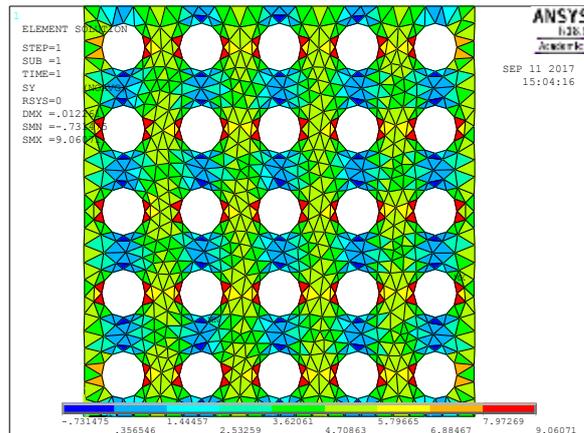
図 161 FEM モデルの境界条件
(a) 2D モデル (b) 3D モデル



(a)



(b)



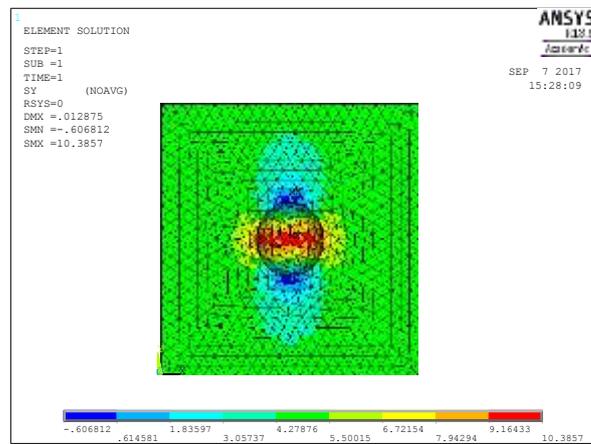
(c)

図 162 2D モデルの解析結果例

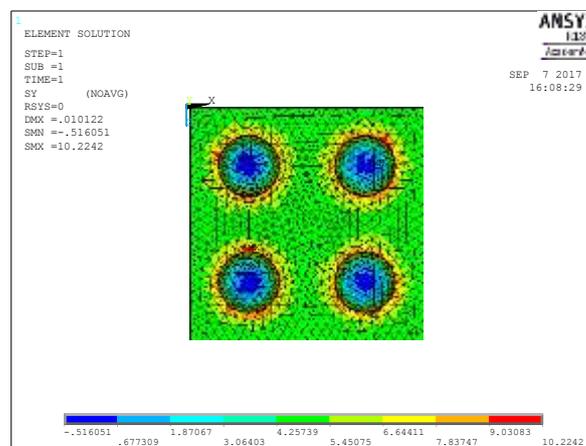
(a) $\phi=1\%$ (b) $\phi=4\%$ (c) $\phi=25\%$

図 162、163 に 2D および 3D モデルの解析結果の一例を応力分布図にして示す。これから、2D および 3D モデルともに 空隙の周辺において応力が集中することがわかる。一方、青色の領域から判断できるように、負荷方向においては

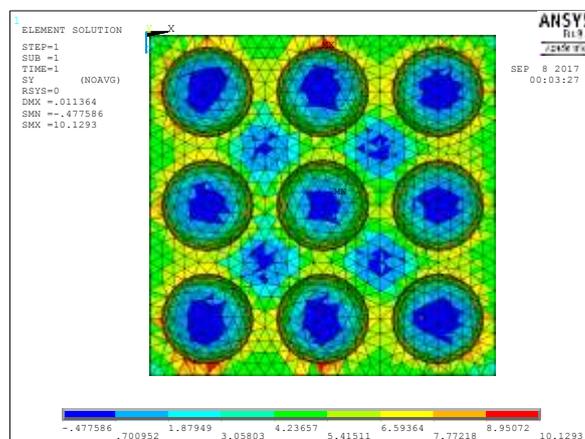
応力を十分に受け持つことができない。数値解析結果から計算される弾性率は
 図 162 (a) (b) (c) において、それぞれ 4.87、4.53、2.96GPa であり、図 163 (a)
 (b) (c) において、それぞれ 4.91、4.34、2.56GPa であった。



(a)



(b)

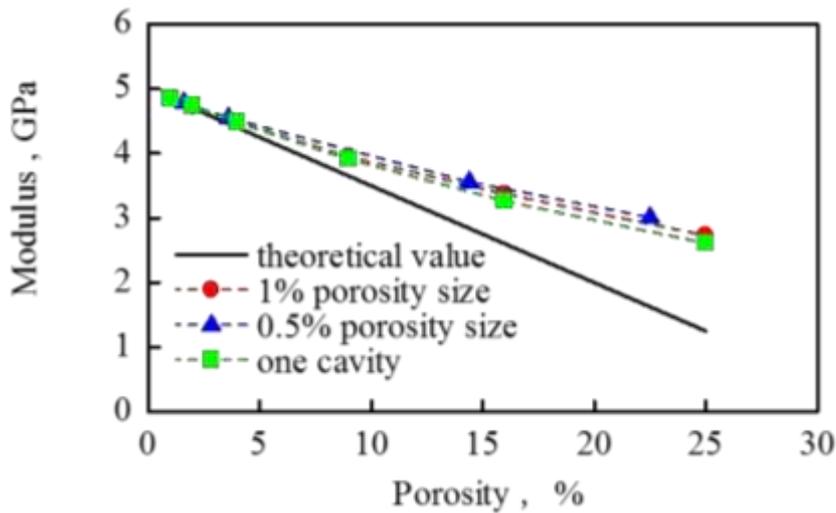


(c)

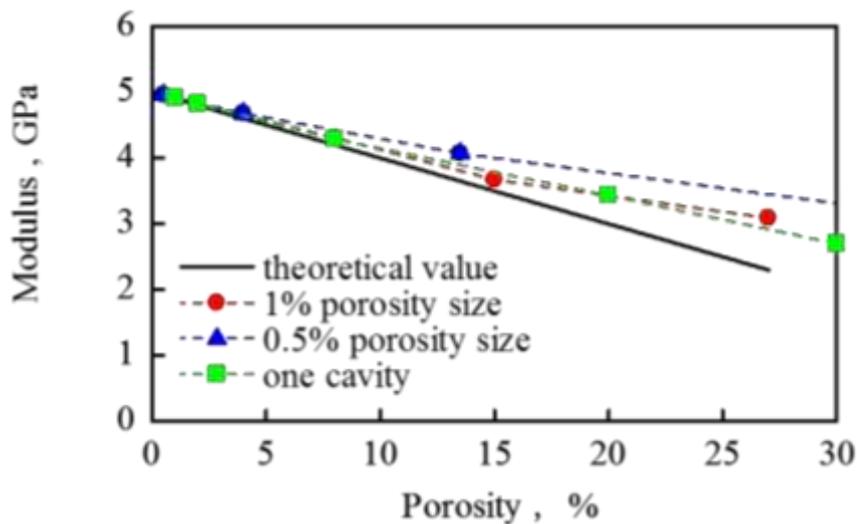
図 163 3D モデルの解析結果例

- (a) $\phi=1\%$ (y 方向↑)
- (b) $\phi=8\%$ (y 方向は奥から手前に向かう方向)
- (c) $\phi=35\%$ (y 方向は奥から手前に向かう方向)

2D および 3D モデルによる弾性率の予測結果を図 164 (a) (b) にそれぞれ示す。同図には、空隙サイズの影響も調査するために、空隙の球径を 1/2 に縮小した場合 (全体積の 0.5%) および空隙を一つにした場合の解析結果も示している。これから 2D モデルが 3D モデルより弾性率の減少度合いが大きいことがわかる。



(a)



(b)

図 164 気孔率の増加にともなう弾性率の変化

- (a) 2D モデル (理論値は、 $E/E_0 \approx 1 - 3\phi$ で与えられる)
- (b) 3D モデル (理論値は、 $E/E_0 \approx 1 - 2\phi$ で与えられる)

理論 (近似式) では気孔率と弾性率は線形関係で表されるが、数値解析結果では気孔率と弾性率は非線形関係にあり、気孔率の増加にともない理論と大きく離れることがわかる。理論近似式は 2D モデルでは気孔率 5%以上、3D モデルでは気孔率 15%以上になると過小評価することが懸念される。また、空隙寸法が小さくなってくると (図 164 における one cavity → 1% porosity size → 0.5% porosity size の順)、気孔率の増加による弾性率の減少を抑えることも確認できる。理論 (Poroelasticity) においては無限場を与えており、空隙回りの応力は空隙から離れるにつれて一樣になるために材料の弾性率は減少していくと考えられる。一方、実際の材料は有限場であり空隙が材料表面に近ければ空隙周りの応力は一樣になることなく表面に大きく現れるために理論値よりも高い弾性率を示したと考えられる。また、空隙寸法が小さくなってくると、同じ気孔率でも空隙数が増えて空隙同士の距離が近くなり、低気孔率であっても材料表面近くに影響を与えるために弾性率が向上したと考えられる。以上のことから、多孔質材料には気孔率の増加とともに弾性率が非線形的に減少していく性質があることが確認できた。また、空隙寸法を小さくしていくと弾性率の減少を抑えられることもわかった。

D まとめ

多孔質材料の力学的性質において、主要力学的性質の 1 つである弾性率と気孔率の関係を FEM 解析によって調査した。実際の材料は有限場であることから気孔率が大きくなると弾性率との関係は理論近似式のような線形関係で表すことができず、非線形関係となることがわかった。また、空隙寸法が小さくなると気孔率の増加にともなう弾性率低下を抑えられることも新たに判明した。

以上から、気孔率や気孔寸法が弾性率に及ぼす影響を FEM モデルによって現象の傾向を予測することができるかと結論付けられる。今後の課題としては、理論的に予測が困難な気孔の形や大きさが様々に分布する状況を FEM によって再現することが求められる。

イ 浴室壁部品としての評価

1) 浴室壁部品の試作

A 概要

システムバス評価用の浴室壁部品の量産試作を実施した。この部品の熱貫流率は、 $1.28\text{W/m}^2\text{K}$ で、目標値 ($1.86\text{W/m}^2\text{K}$ 以下) を確保した。以下には、その詳細を示す。

B 浴室壁部品の試作および性能評価

浴室壁は、意匠面となる鋼板に 25mm 厚の CNF 添加 FRP サンドイッチパネルをスコッチ建築用厚手強力両面テープ (3M) にて貼り合わせることで作製した (図 165)。

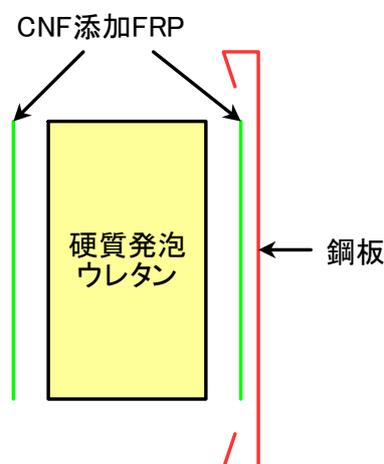


図 165 浴室壁構成

CNF 添加 FRP サンドイッチパネルは図 166 のフローにて作製した。

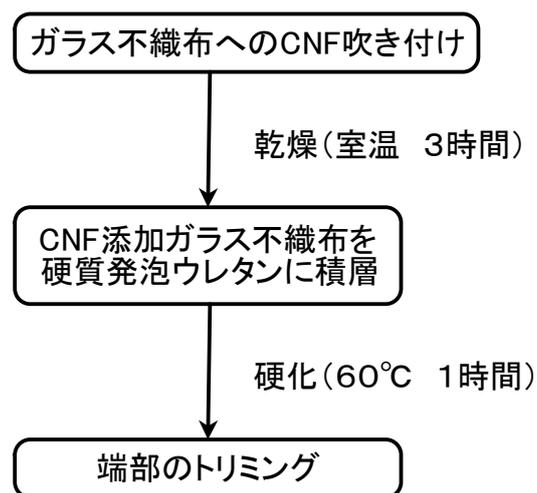


図 166 CNF 添加サンドイッチパネル作製フロー

次に、単位重量 $30\text{g}/\text{m}^2$ のガラス不織布に 2.5wt% に水で希釈した CNF (株スギノマシン BiNF-i-s WFo-10010) をスプレーにて吹き付けを行った (図 167)。CNF 付着量が多すぎるとガラス不織布の目が詰まり、樹脂が浸み込みにくくなるため、CNF 付着量は $5\text{g}/\text{m}^2$ を目標とした。



図 167 ガラスペーパーへの CNF 吹き付け作業

得られた CNF 添加ガラス不織布を硬質発泡ウレタンに積層した。積層作業としては、まず型となる鋼板に離型剤「ケムリース RC-1」(ケムリースジャパン株)を塗付し、離型処理を施した(図 168)。その後、鋼板の上に CNF 添加ガラス不織布を敷き、2kg の積層樹脂を含浸させた(図 169)。積層樹脂は「リゴラック 258BQTN」(昭和電工株)を用いた。硬化剤は、「カヤメック M (化薬アクゾ株)を積層樹脂：硬化剤=100：1 の割合で用いた。



図 168 鋼板への離型処理



図 169 CNF 添加ガラス不織布の含浸 (ハンドレイアップ成形)

CNF 添加ガラス不織布に積層樹脂を含浸後、樹脂が硬化する前に硬質発泡ウレタンを載せ一体化させた (図 170)。硬質発泡ウレタンは 25mm 厚の「クランボード P」(倉敷紡績株) を用いた。その後、硬質発泡ウレタンの上に再度 CNF 添加ガラス不織布を積層樹脂で含浸させ、離型処理をした鋼板で挟み込んだ。鋼板の上に錘を載せ、60℃で 1 時間加熱する事で樹脂を硬化させた。



図 170 硬質発泡ウレタンの一体化

CNF 添加 FRP サンドイッチパネルを作製するうえで硬質発泡ウレタンと CNF 添加 FRP の位置がずれてしまう。それを許容するために CNF 添加 FRP を大き目に作製した。最後に CNF 添加 FRP をトリミングし、CNF 添加 FRP サンドイッチパネルとした (図 171)。



図 171 端部のトリミング

今回の作製方法の課題としては工数の多さが挙げられる。CNF 添加ガラス不織布の樹脂含浸作業には壁 1 枚あたり 30 分かかり、硬化に 1 時間が必要となる。システムバスには壁が 7 枚必要となるため量産には対応する事ができない。

対策としては、材料メーカーの協力が必要となる。今回は、ガラス不織布へ CNF を吹き付ける事で添加したが、ガラス不織布は、GF を水に分散させ、抄く事で作製するため、GF と一緒に CNF も入れておけば工数の増加なしに CNF 添加ガラス不織布のロールを作製することができる。CNF 添加ガラス不織布のロールがあれば、ディップスクイズ加工で大量に CNF 添加 FRP を生産することが可能となる (図 172)。さらに、大面積の硬質発泡ウレタンの生産にはキャリアとなる紙が必要となり、紙と一体化した状態で生産されているが、紙を CNF 添加 FRP とする事で、CNF 添加サンドイッチパネルを自動的に生産する事が可能となる。

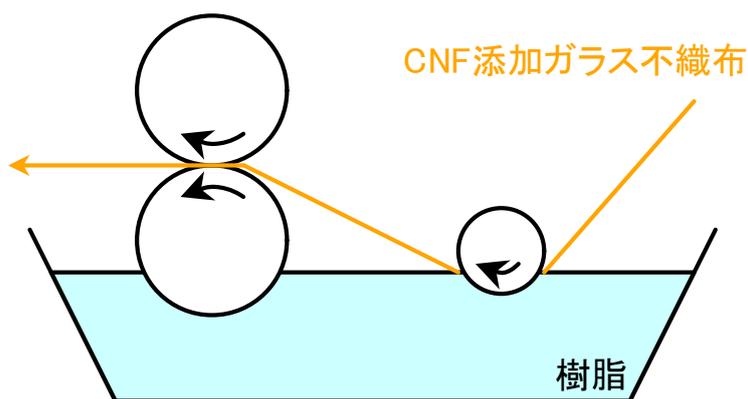


図 172 ディップスクイズ加工

2) システムバス評価

A 概要

CNF を利用した浴室壁および後述する浴室天井の試作部品を用いシステムバスに施工し、実測評価を実施、既存部品に対し、環境温度 10°C、浴室暖房の温度設定 25°Cにおいて 25.5%の CO₂削減効果を実現した。以下には、その詳細を示す。

B システムバスでの評価

a システムバスの概要

システムバスとは、全ての構成部材や部品を工場生産・加工し、現場ではこれらの部材・部品を組み立てるだけで完成させることが可能な、プレハブ化された浴室のことである。タイル等を職人が貼りつける在来工法と比べて、防水工事が不要で工期が短縮でき、断熱性にも優れているため、近年、急速に普及している。2017年の新築着工件数が約 95 万件であるのに対し、システムバスの出荷台数は約 150 万台であることから新築のみでなくリフォームにも広く採用されている事がうかがえる。

b システムバスの仕様

試験に用いるシステムバスはトクラス株式会社の普及価格帯モデルである「every」とし、サイズは最も一般的な 1616 サイズ (1 坪) とした。システムバスの外枠は、洗い場パン (1 枚)、浴槽パン (1 枚)、ドア (1 枚)、浴室壁 (7 枚) および浴室天井 (2 枚) により構成される (図 173)。この内の浴室壁および浴室天井を CNF を利用した試作部品に置き換えて試験を実施した。比較として、断熱仕様でない既存品および断熱仕様である既存品の試験を実施した。浴槽や水洗等のシステムバス内に設置する部材に関しては、システムバスの断熱性に寄与しないことから設置を省略した。



図 173 システムバス外観 (1616 サイズ)

c 試験方法

システムバスを 10℃に設定した恒温恒湿室に設置し、システムバス内中心温度が 25℃になるようにシステムバス内の暖房装置で温めた際の消費電力を測定した (図 174)。環境温度は、冬季夜間の室温を想定して 10℃と設定した。暖房装置は、「浴室暖房換気乾燥機 BS-151H」(マックス株式会社) を浴室内中央に置いた。暖房設定は、システムバス内中心温度が 25.1℃以上にて暖房が切れるようにし、24.9℃以下にて暖房が入るように設定した。

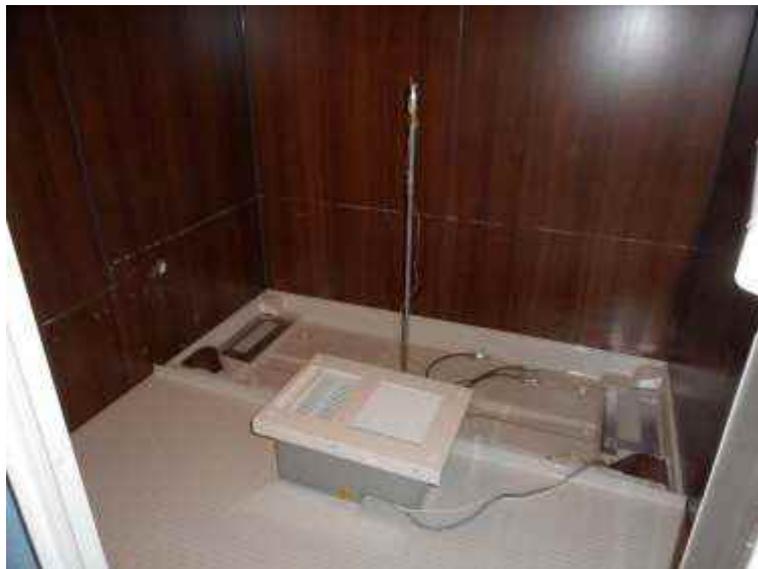


図 174 システムバス内部

d 施工方法

CNF を利用した浴室壁は、他部材との嵌合部位は既存品と同じ仕様としているため、既存品同様に施工する事が可能である。CR タイプの浴室壁設置順序を図 175 に示した。システムバスはドアの位置により、R、CR、CL、L タイプの 4 種に分別される。図 175 において⑦の壁の位置にドアがあれば R タイプ、②の位置にドアがあれば CL タイプ、①の位置にドアがあれば L タイプとなる。浴室壁をジョイントにて接合することで施工することができる。詳細に関しては「システムバスルーム every (エヴリイ) 取付設置説明書 (図 176、177)」に記載されている。

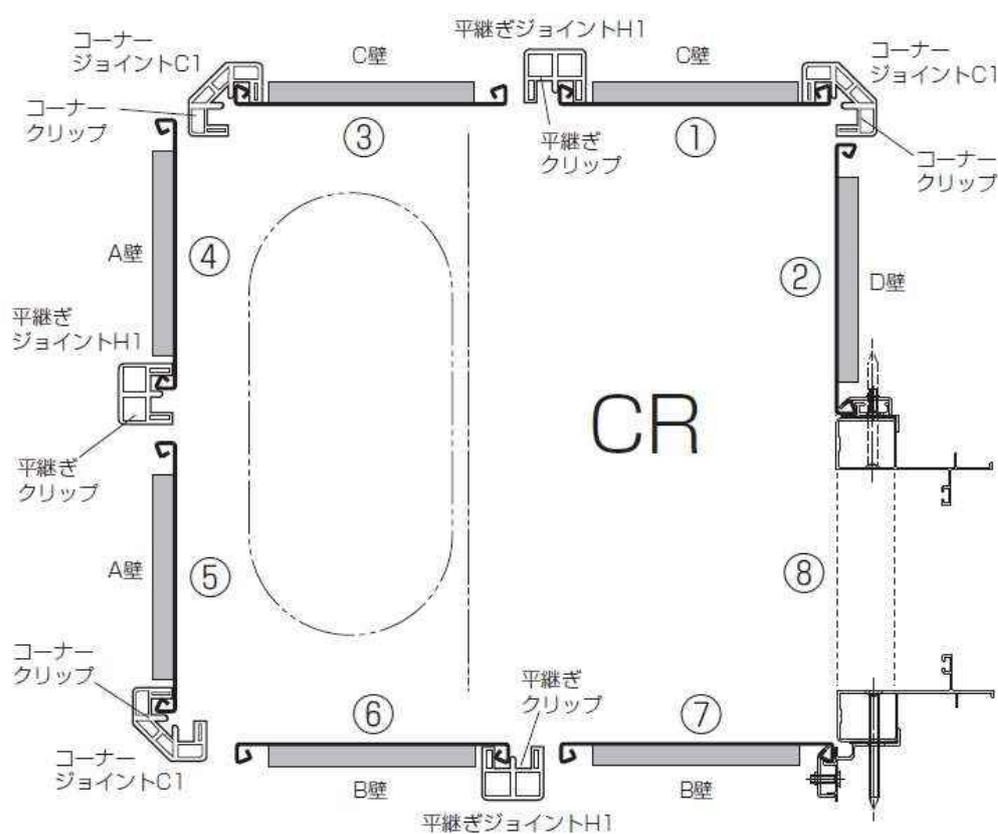


図 175 浴室壁建て込み順序

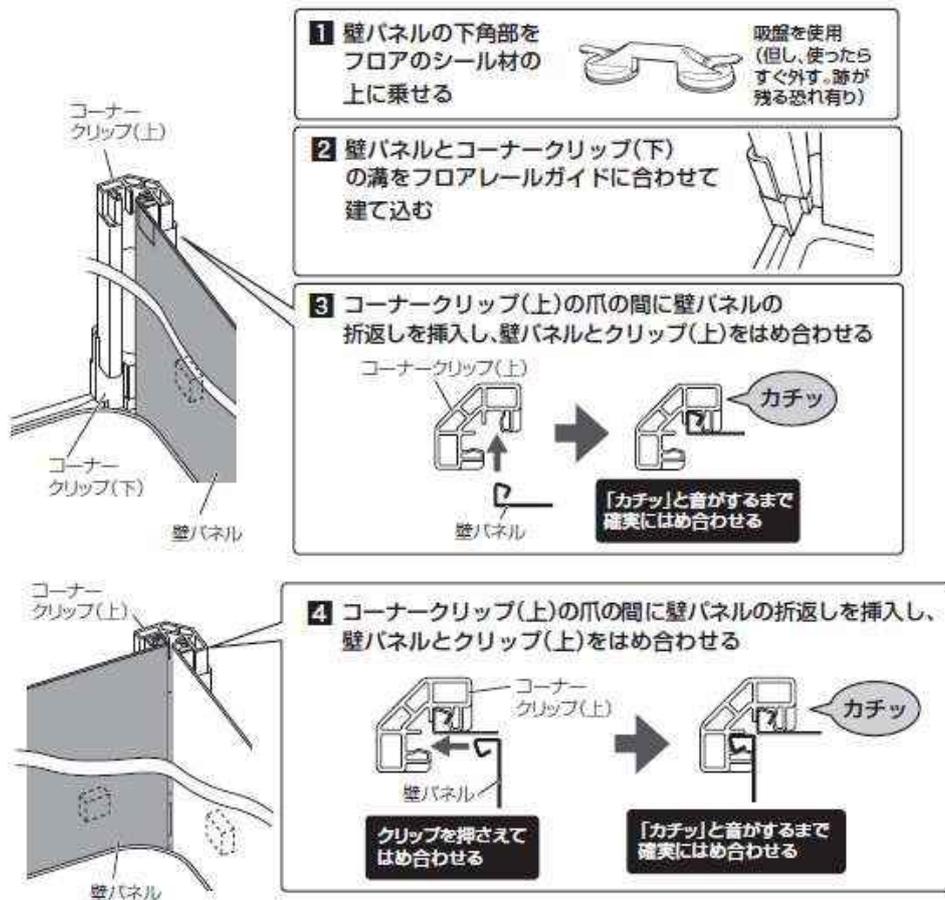


図 176 コーナー部の建て込み

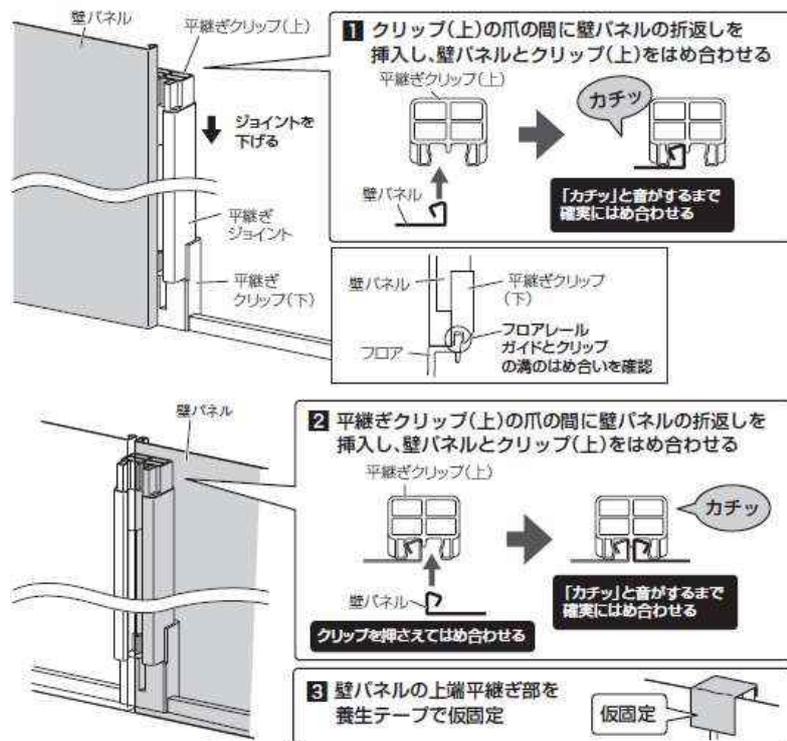


図 177 平継ぎ部の建て込み

既存浴室天井の設置方法を図 178 に示した。浴室天井を設置するためには天井レールが嵌合する必要があるが、CNF を利用した浴室天井は 25mm の厚みがあり天井レールが嵌らないため、今回は、浴室壁の上に載せたあとに L 金具にて固定した。

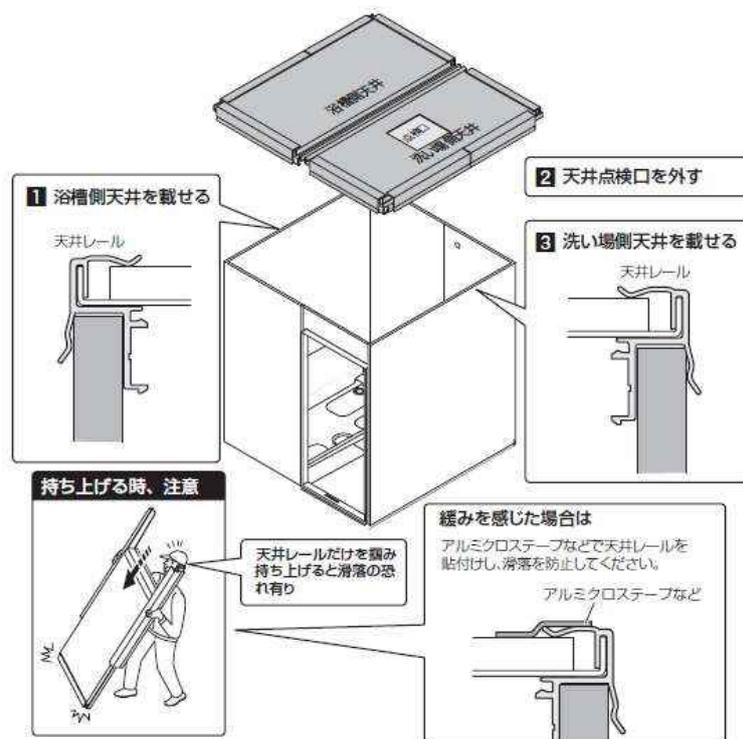


図 178 浴室天井の設置

e 既存品との施工性の比較

浴室壁に関しては、他部材との嵌合部は既存品と同じ仕様であるため、既存品と同様の施工性を確保する事ができる。浴室天井に関しては、CNF を利用した浴室天井に適した天井レールを設定する事で既存品と同様の施工性を確保する事ができる。

f 省エネ効果の検証

断熱仕様でない既存品、断熱仕様である既存品および CNF を利用した浴室部材での積算消費電力と浴室中心温度を表 43 に示した。環境温度を 10°C に設定し、浴室暖房器を用いて浴室中心温度が 25°C となるように、実験を行った。既存品は設定温度である 25°C に到達するのに 17~22 分かかったが、CNF を利用した浴室部材では 10 分間で 25°C に到達している。既存品は鋼板と石膏ボードにより構成されているが、CNF を利用した浴室部材は鋼板と発泡ウレタンにより構成されている、暖房速度の差は石膏ボードと発泡ウレタンの熱容量の差であると考えた。

積算消費電力と経過時間の関係を図 179 に示した。断熱仕様でない既存品は 25°C に達した後ほとんど消費電力が変わらないが、断熱仕様である既存品および CNF を利用した浴室部材は消費電力が削減されている事がわかる。

浴室内を 25℃に維持するために必要な電力を図 180 に示した。CNF を利用した浴室部材は、断熱仕様でない既存品と比較して 49.7%、断熱仕様である既存品と比較して 25.5%の電力削減を実現した。今回の実験では、消費電力削減効果を確認するために環境温度と浴室内の温度の差を 15℃に設定している。実用化環境での効果は環境温度から浴室設定温度の差、浴室暖房を使用する時間を勘案することで、本結果をもとに算出が可能になると考える。

表 43 積算消費電力と浴室中心温度まとめ

経過時間 (分)	既存品(断熱材なし)		既存品(断熱仕様)		CNF利用浴室部材	
	積算消費電力 (Wh)	浴室中心温度 (°C)	積算消費電力 (Wh)	浴室中心温度 (°C)	積算消費電力 (Wh)	浴室中心温度 (°C)
0	0.0	9.6	0.0	8.9	0.0	8.1
1	15.8	13.0	15.2	13.1	15.6	11.8
2	32.1	16.7	31.5	16.7	31.5	15.5
3	48.2	18.7	47.8	18.3	47.7	18.1
4	64.9	19.9	64.1	19.2	64.0	19.5
5	80.8	20.7	80.2	20.1	80.1	20.9
6	97.0	21.4	96.5	19.4	96.3	21.6
7	113.8	21.9	113.1	19.5	112.6	22.6
8	129.6	22.3	129.0	20.7	128.8	23.5
9	145.9	22.3	145.3	21.0	145.5	24.2
10	162.3	22.7	161.5	21.3	161.3	25.1
11	178.4	22.9	177.8	21.4	167.5	23.3
12	195.0	23.1	194.1	21.6	183.6	25.1
13	210.1	23.5	210.3	22.1	189.2	23.0
14	227.3	23.9	226.5	22.3	200.7	24.6
15	243.3	24.1	242.8	22.4	210.5	24.2
16	259.5	24.3	259.1	22.7	215.5	22.9
17	275.9	24.8	275.3	23.2	227.7	25.4
18	285.4	23.1	291.5	23.4	234.2	24.0
19	298.7	23.5	308.0	23.9	241.6	24.0
20	314.7	24.1	324.1	24.5	252.4	25.3
21	330.9	23.5	340.3	24.9	254.5	23.1
22	347.3	23.7	356.7	24.8	264.4	24.6
23	363.4	23.7	370.5	24.6	273.3	24.8
24	379.7	23.7	380.1	24.9	275.6	23.5
25	396.4	23.6	386.9	23.4	285.9	25.2
26	412.1	23.8	399.4	24.5	293.0	24.8
27	428.5	24.3	409.4	24.3	295.9	23.5
28	444.7	24.4	416.4	23.0	307.5	25.4
29	460.1	24.5	432.7	25.0	312.0	24.4
30	474.7	24.6	437.1	23.7	316.5	24.1
31	477.3	23.3	446.7	24.5	324.3	24.7
32	490.2	24.7	457.3	24.6	333.1	25.5
33	499.8	23.8	462.3	22.9	334.6	23.8
34	512.7	24.6	474.9	24.8	341.5	24.3
35	521.0	23.7	483.3	24.3	351.0	25.5
36	538.4	24.8	489.7	23.2	351.3	23.7
37	554.8	23.9	501.2	25.0	359.0	24.4
38	570.5	24.3	509.9	24.2	368.6	25.3
39	587.3	24.3	515.5	23.5	370.6	23.7
40	603.2	24.7	528.6	24.7	377.4	24.5
41	619.5	24.6	536.7	24.2	387.5	25.5
42	633.0	24.7	542.2	23.5	388.1	23.8
43	642.8	24.1	556.8	25.3	395.6	24.7

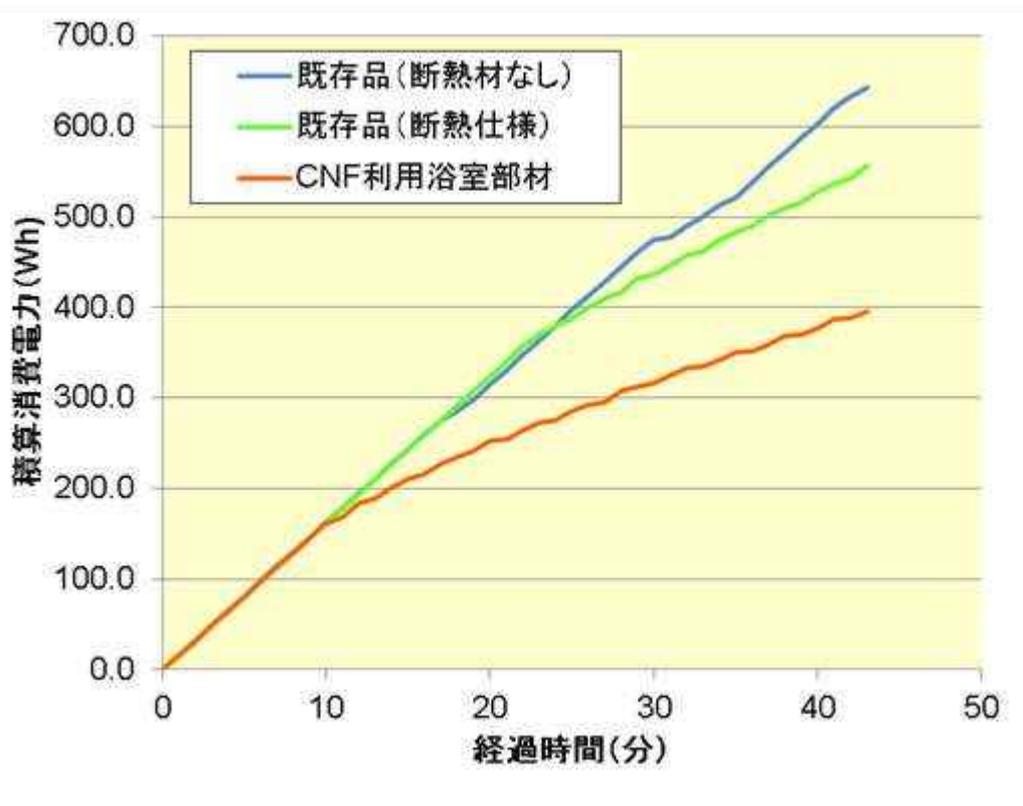


図 179 積算消費電力と経過時間の関係

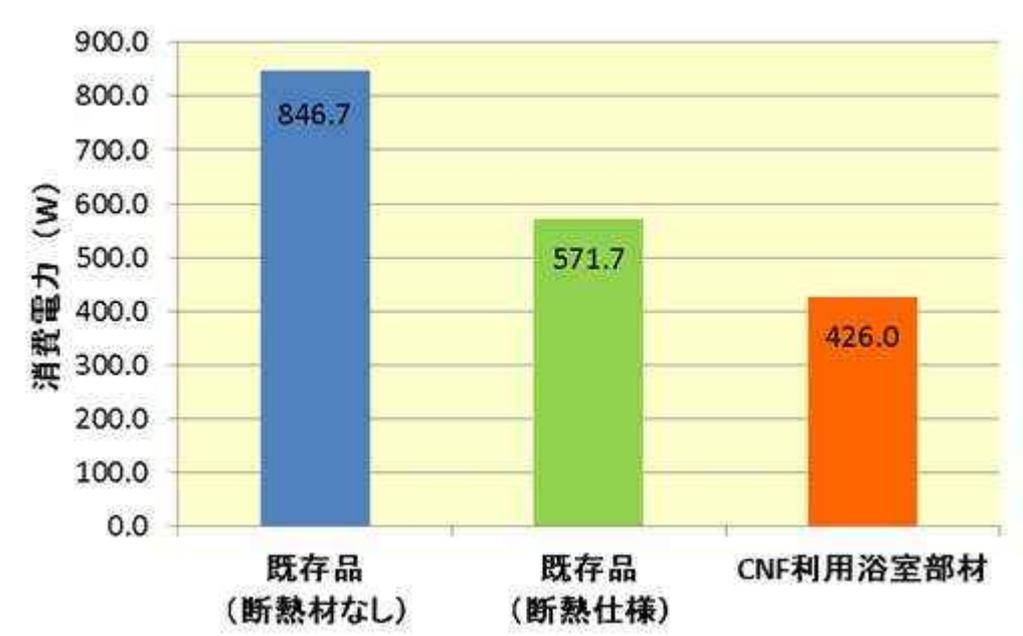


図 180 浴室内を 25°Cに維持するために必要な電力

③浴室天井部品における断熱性向上に関する技術開発

ア 浴室天井構成素材の試作

1) 高剛性 FRP 素材

A 概要

量産 (実用化) に則した条件で、CNF 補強高剛性 FRP の量産試作を実施した。この量産試作品の曲げ剛性は、2mm 厚みでも 4mmFRP と同等の剛性が確保できる CNF 利用の FRP を実現した。以下には、その詳細を示す。

B 量産試作および量産試作品の評価

a 原材料

セルロースナノファイバーは、市販の水分散 CNF (WFO-10010、スギノマシン) を使用した。白色ゲル状の外観をしており、濃度 10 wt.%、粘度 130 Pa・s 以上である。CNF の直径は約 20 nm、長さは数 μm 以上である。これを濃度 1 wt.% まで純水で希釈して使用した。

ガラスマット (WBC000103、サンライト) は GF がおおよそランダム配向した不織布 (面密度 30 g/m²) である。GF の直径は約 15 μm 、繊維長は約 20 mm である。

EP (EP) フィルム (DRS-028、サンユーレック) は工程紙上に樹脂層が付着しているもので、今回使用したものは樹脂目付量 150g/m² である。

b 量産試作

CNF/GF ハイブリッド繊維基材作成方法は、(1) -②-ア-1)と同様にスプレー法で吹き付けを行った。ハイブリッド繊維基材の製造工程図を以下の図 181 に示す。

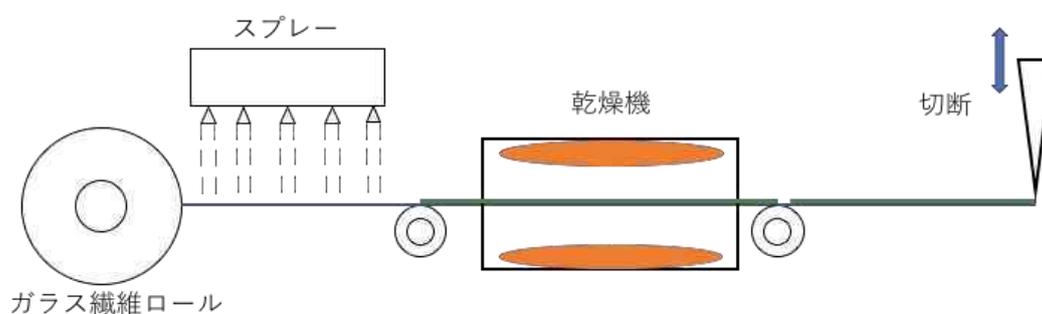


図 181 ハイブリッド繊維基材製造の工程図



図 182 ラボスケールホットプレスマシン

ハイブリッド繊維基材製造工程については、GF ロールから引き出された GF マット上にスプレーを用いて CNF 懸濁液を吹きつけ乾燥機で水分を乾燥させるだけの簡単な工程であり、量産に適した製法となっている。

また、複合材料製造工程については、EP フィルムをホットプレス (図 182) により樹脂含浸温度 (80°C) でプレスすることでプリプレグを容易に製造可能である。また少量生産の場合はハンドレイアップも可能であり、繊維強化複合材料の製造に用いられる汎用的な設備で製造可能である。

次に、CNF/GF ハイブリッド繊維基材に対して EP 樹脂を含浸させ、CNF/GF プリプレグを作製した。作製方法には、ホットプレス法を採用した。まず初めに繊維基材中の水分を可能な限り除去するため、恒温機を用いて 130 °C×60 分加熱した。次に、CNF/GF ハイブリッド繊維基材と EP フィルムを積層し、110 °C×1.0 MPa×20 分でプリプレグを成形した。この状態では、EP 樹脂は完全硬化しておらず、タック性がある状態である。その後 130 °C×1.0 MPa×120 分で EP 樹脂を完全硬化させた。比較のため、CNF を添加せずに GF マットのみを EP フィルムを積層し、同様に硬化させた。作製した GF/EP 複合材を図に、CNF/GF/EP ハイブリッド複合材を図 183 に示す。

また、それぞれの破面の SEM 画像を図 184 にそれぞれ示す。CNF の吹付け側に CNF/EP 層が形成され、CNF/EP 層と GF/EP 層の積層材となっていることがわか

る。

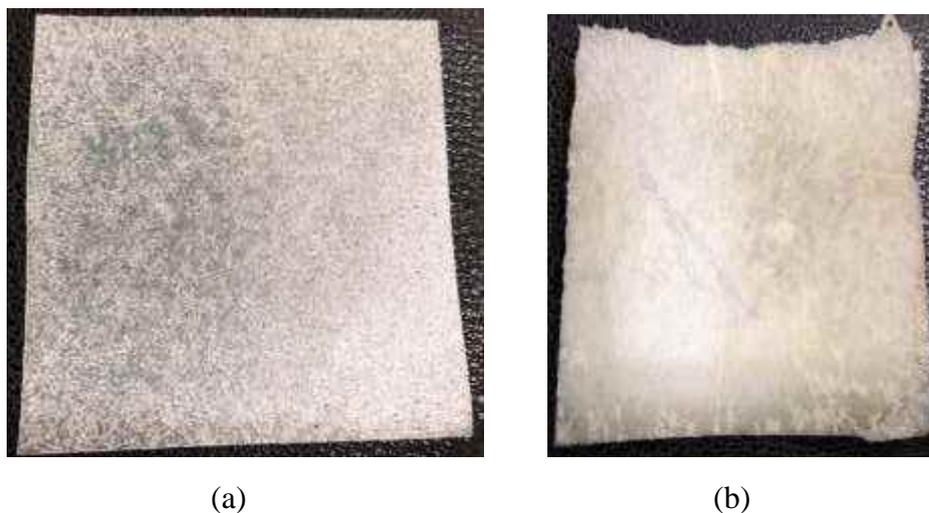


図 183 成形した複合材料
(a) GF/EP 複合材 (b) CNF/GF/EP ハイブリッド複合材

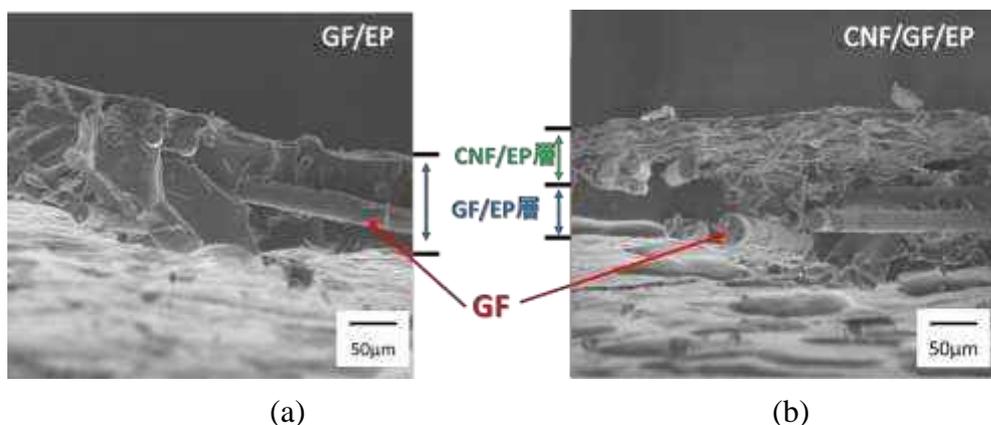


図 184 複合材料試験片の破面 (a) GF/EP 破面 (b) CNF/GF/EP 破面

c 量産品の性能評価

・曲げ剛性に関する報告

曲げ剛性を計算する上で必要な CNF/GF ハイブリッド複合材の機械的特性の基礎データを得るために引張試験を実施した。引張試験は JIS K 7127 を参考にした。試験条件は、試験片寸法として全長 50 mm、幅 5 mm の短冊形試験片であり、クロスヘッド変位速度 0.4 mm/min とし、室温大気中で引張試験を実施した。伸びは非接触伸び計を用いて測定した。各 5 本ずつ試験片を作製し、試験を行った。その結果のヤング率を図 185、引張強度を図 186 に示す。GF/EP に比べてヤング率が 225%、引張強度が 210%向上したことがわかる。

以上により、CNF 添加で剛性 2 倍確保できることが実証できた。このことは、従来 4mm 厚さの板を 2mm 厚さに減少させても、同等の剛性を確保できることを意味している。

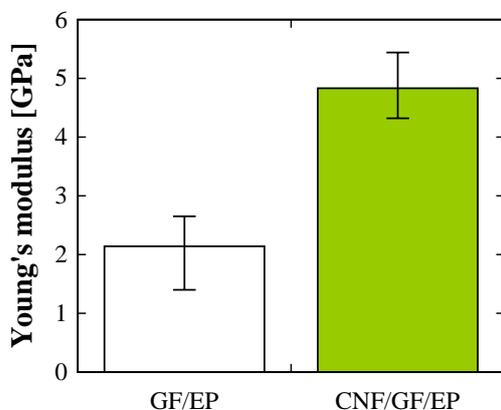


図 185 ヤング率比較

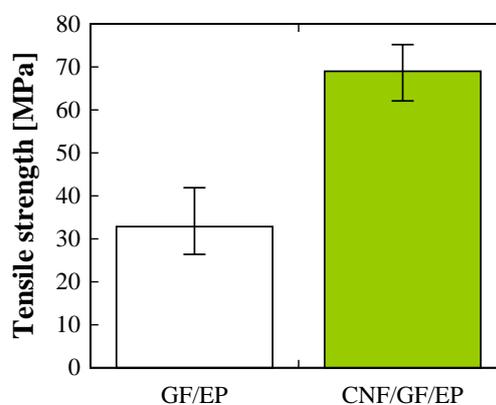


図 186 引張強度比較

・耐久特性

耐久特性の評価のために、複合材料の飽和吸湿状態での引張試験を実施した。内容は基本的に (1) -②-ア-1)-B で述べた耐久性試験と同じであるため、結果と結論を簡単に述べる。

飽和吸水後のヤング率を図 187、引張強度を図 188 に示す。飽和吸水により CNF/GF/EP ハイブリッド複合材のヤング率、引張強度は低下したが、飽和吸水のような極端な例であっても、GF/EP 複合材の値を下回ることはなく、構造としての基本的な物性は担保されていることを明らかとした。なお実際には、住設向けの GFRP 構造で一般に行なわれる表面コーティングにより吸湿自体を大幅に低減させることが可能である。

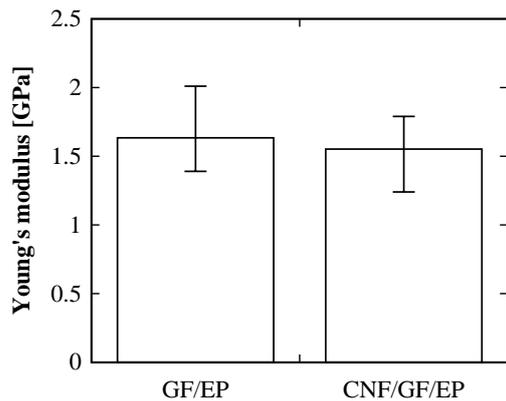


図 187 飽和吸水後のヤング率比較

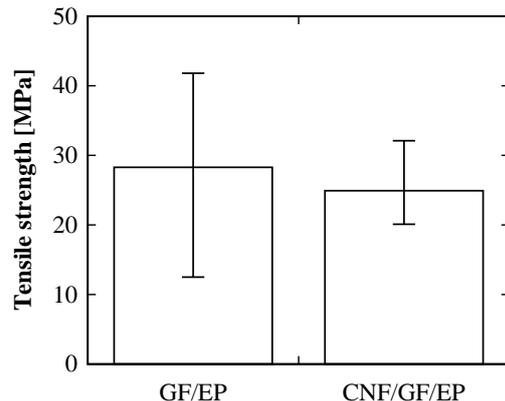


図 188 飽和吸水後の引張強度比較

2) 高断熱吹付ウレタン

A 概要

量産 (実用化) に則した条件で、CNF 添加高断熱吹付ウレタンの量産試作を実施した。この量産試作品の熱伝導率は、 0.0208W/mK で、目標値 (0.038W/mK) を確保した。以下には、その詳細を示す。

B 量産試作および量産試作品の評価

a 原材料及び処方

表 44 に吹付ポリウレタン発泡体の基本原料処方を示す。各原料にはいずれも市販品を用いたが、スプレー時の 2 液反応性を高めるため触媒を選択、ポリオールも活性の高いタイプを選択した。また発泡剤にはここでも低 GDP (地球温暖化係数) タイプのノンフロン発泡剤 HFO (ハイドロフルオロオレフィン) を用いた。

表 44 吹付用発泡体基本処方

原料区分	品番	メーカー名	組成概要	部数	
R 液	ポリオール	EL-450ED	AGC	アミン系ポリエーテルポリオール	40.0
		GR-04	三井化学 SKC ポリウレタン	アミン系ポリエーテルポリオール	40.0
		RDK-133	川崎化成	芳香族系ポリエステルポリオール	20.0
	難燃剤	TMCPP	大八化学	トリス (クロロプロピル) ホスフェート	20.0
	触媒	PC-12	東レ・ダウコーニング	アミン系触媒	3.0
		DICNATE425	DIC	金属系触媒	0.3
	整泡剤	SH-193	東レ・ダウコーニング	シリコンオイル	1.5
	発泡剤	水	—	—	3.0
LBA		ハネウエル	HFO-1233zd	25.0	
I 液	イソシアネート	MR-200	東ソー	ポリメチレンポリフィルポリイソシアネート	167.8
合 計				320.6	

本実験に用いた CNF を表 45 に示す。ここでもボードと同様、実用化を想定し、市販の第一工業製薬社製水分散 CNF (I-2SX、製法 ; TEMPO 酸化法) を利用するとともに、CNF の均一分散性を考慮し、水分散 CNF はロールミルを使用し、事前にポリオール中に分散、同時に分散水を揮発させた。

表 45 使用した CNF の性状 (第一工業製薬社カタログより)

品番	濃度 (%)	繊維長	繊維幅 (nm)
I-2SX	2	非公開	4~10

但し吹付ウレタンにおいて、CNF の増粘性による吹付性の低下が懸念されたため、CNF 添加ポリオールで 3,000mPa・s 以下、R 液調合後で 500mPa・s を目安に CNF の添加量を設定、ポリオールに対し 0.08%、原料総重量比で 0.025% とした (表 46)。

表 46 CNF 添加ポリオール及びR 液の粘度

CNF 添 加	ポリオール		R 液	
	CNF 添加率	粘度 (mPa・s)	CNF 添 加 率	粘度 (mPa・s)
無し	—	2、200	—	190
有り	0.08%	2、950	0.025%	420

b 量産試作

吹き付けウレタンは現場施工のため、ここでは、原料となるウレタン樹脂ブレンド工程に関して生産手法の検証を行った。

ウレタン樹脂 (R 液) ブレンド工程を図 189 に示す。

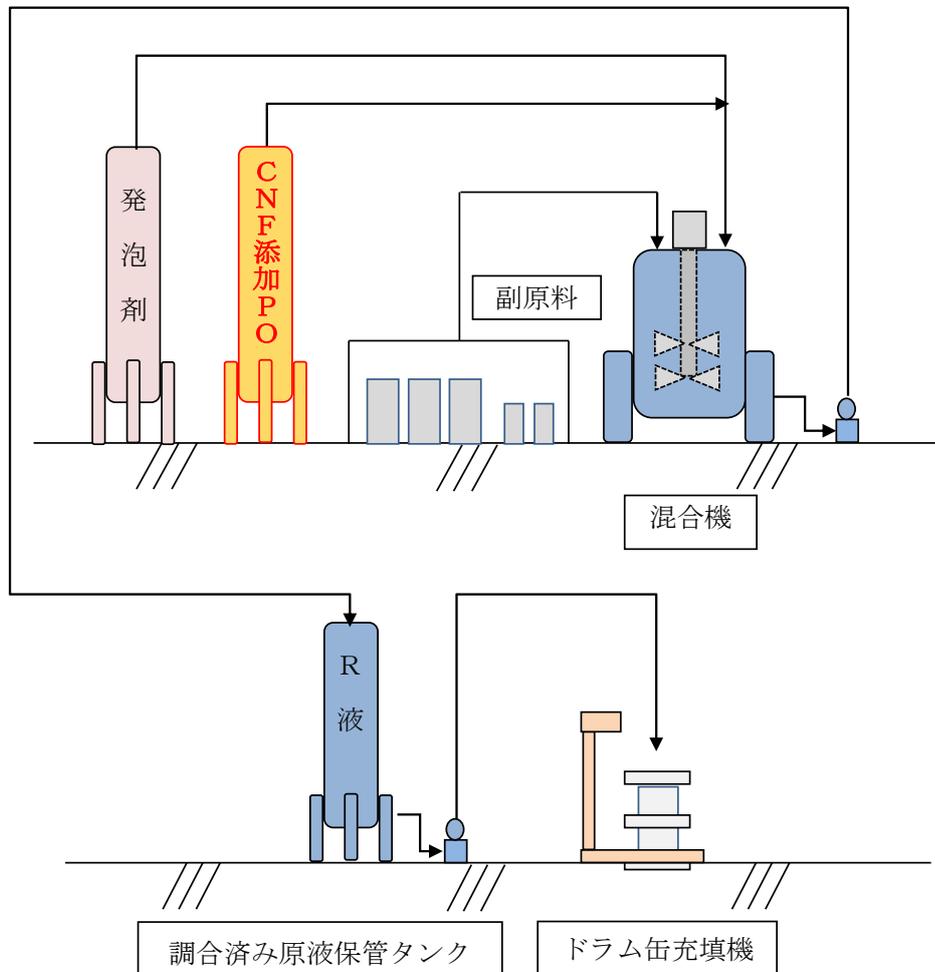


図 189 ブレンドライン工程図

7) 調液

ポリオールにあらかじめ触媒、発泡剤、整泡剤等の助剤を添加し、混合機にて混合・調液する。

CNF は水分散体を、予めポリオール原料に添加・分散、分散水を揮発させる。

未揮発の水分は、発泡剤として発泡成形に寄与させる。

1) 梱包

任意の容器に調合液を梱包する。

※内は CNF 添加時の追加工程。

ウレタンボード製造工程と同様に、ポリオール原料にあらかじめ CNF 水分散体を添加・混合することで、その後の混合～梱包までの工程は、特に追加工程の必要は無い。よって、既存の製造ラインを利用して製造できる。

以下にウレタン吹付方法を記述する。

- ・使用吹付機；ヒガキ・マシナリー・サービス社製 PF-1600 (図 190)
- ・吹付対象躯体；0.9m×1.2m
- ・試験室温；21℃、69%RH
- ・吹付手順；厚さ 5mm 以下の下吹き後、下吹きが硬化したことを確認して、30mm 以下の積層を行い、最終厚さ 60mm とする。
- ・養生手順；上記作成資料を恒温恒湿室 (23℃、50%RH) に搬入し、16 時間以上 48 時間以内で状態調節する。



図 190 使用吹付発泡機

吹付時の温度条件を表 47、吹付試験時の写真を図 191、192 に、吹付後の各試験体写真を図 193 に示す。本試作では、CNF 添加による増粘の影響はなく、CNF 入りポリオールを用いた R 液でも、用いない場合と吐出状態に差異はなく、成形可能であることを確認した。

表 47 試験時の温度条件

	CNF 添加率	
	0.000%	0.025%
R 液液温	40℃	39℃
I 液液温	40℃	40℃
ホース温度	41℃	41℃
躯体温度	23.9℃	23.5℃

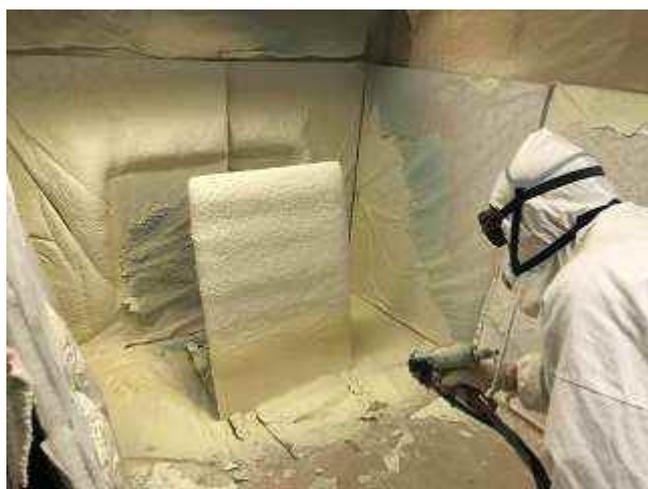


図 191 ウレタン吹付工程写真 (CNF 添加無)



図 192 ウレタン吹付工程写真 (CNF 添加有)



図 193 ウレタン吹付試験体 (CNF 無 (左) 、CNF 有 (右))

c 量産品の性能評価

・熱伝導率

熱伝導率は(1)-③-ア-2)-Bに準拠して測定した。発泡フォームのCNF添加率別熱伝導率試験結果について表48、図194に示す。CNF添加により、密度は上昇したにも関わらず、熱伝導率は約1.9%低減した。

昨年度に報告したウレタンボードに比べて低減率が低下した原因は、吹付性確保のためのCNF添加率抑制と、ウレタンボードでの検証と同様に断熱ガスの変更が考えられる。CNFによる増粘特性の抑制が課題であると言える。

表 48 CNF 添加率別ウレタンボードの密度・熱伝導率

	CNF 添加率	
	0.000%	0.025%
密度 (kg/m ³)	37.1	37.4
熱伝導率 (W/mK)	0.0212	0.0208

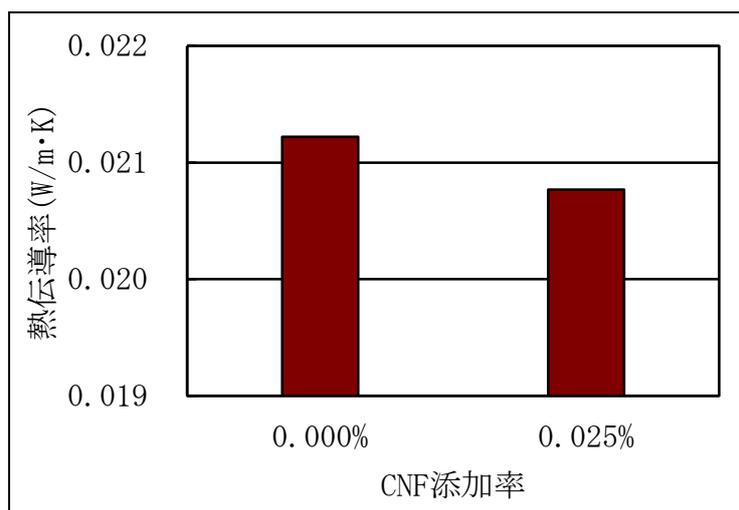


図 194 熱伝導率試験結果

・機械的特性

JIS A 9521に準拠して測定した発泡フォームのCNF添加率別圧縮強さ及び曲げ強さについて、表49、図195、図196に示す。

表 49 CNF 添加率有無によるウレタンボードの密度・強度

	CNF 添加率	
	0.000%	0.025%
密度 (kg/m ³)	40.7	39.8
圧縮強さ (N/cm ²)	10.9	12.3
曲げ強さ (N/cm ²)	49.3	55.4

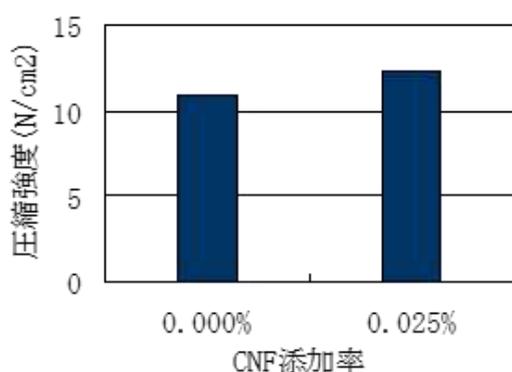


図 195 圧縮強さ試験結果

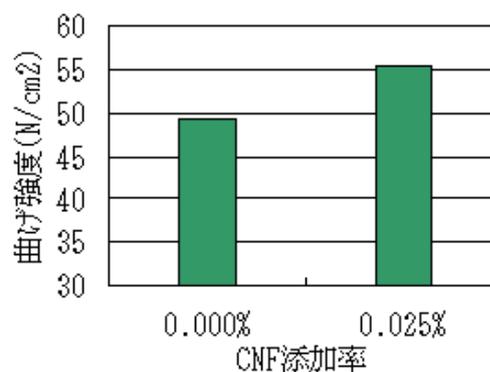


図 196 曲げ強さ試験結果

フォームの圧縮強さが僅か 0.025% の CNF 添加で約 13%、曲げ強さも 12% 増大している。ボードと比較し CNF の添加量が減少している分、効果も減少しているが、やはり CNF による樹脂補強が、効果を発現していると推定される。

・耐久特性

発泡ウレタンボードの CNF 添加率別吸水量結果 (JIS A 9521 に準拠) について、表 50 に示す。この結果からは CNF 添加による吸水量の上昇はないと確認される。CNF 添加率が非常に少ないことから、それによる劣化促進の懸念はないと言える。

表 50 CNF 添加有無によるウレタンボードの吸水量

	CNF 添加率	
	0.000%	0.025%
吸水量 (g/100cm ²)	1.20	1.20

ASTM D2126 を参考にして実施した、各試験体の乾熱・湿熱・低温処理後の寸法変化率測定結果を、表 51 に示す。この結果から、吹付ウレタンにおいても CNF に添加により寸法変化率が抑制される傾向にあり、CNF による樹脂補強が、寸法安定性に寄与したと推定される。

表 51 CNF 添加有無によるウレタンボードの各条件下での寸法変化率

		CNF 添加率	
		0.000%	0.025%
乾熱処理後	長さ・幅	-0.4	-0.6
	厚さ	0.5	0.4
湿熱処理後	長さ・幅	0.3	-0.0
	厚さ	7.3	5.1
低温処理後	長さ・幅	-0.3	-0.2
	厚さ	-0.8	-0.5

イ 浴室天井部品としての評価

1) 浴室天井部品の試作

A 概要

(2)-②-イ-1) にて、CNF 添加 FRP サンドイッチパネルの断熱性が高い結果を踏まえ、同スペックにて、システムバス評価用の浴室天井部品の量産試作を実施した。この部品の熱貫流率は、0.34W/m²K で、目標値 (0.57W/m²K 以下) を確保した。以下には、その詳細を示す。

B 浴室天井部品の試作および性能評価

(2)-②-イ-1) にて同時に実施

2) システムバス評価

(2)-②-イ-2) にて同時に実施

(3) 社会実装に向けた実証

① 実用化に向けた環境整備

ア CNF 製品製造者に向けた情報の明確化

A 概要

空隙サイズ、形状の異なるサンプルを試作し、空隙状態と断熱性の相関関係を明確化した。このデータは、本事業参画者である各部品（部品素材）供給者へ提示した。また、空隙と空気対流のシミュレーションを実施し、CNF 添加による空隙制御が断熱特性に及ぼす影響を算出し、本事業協力者の住宅メーカーへ提示した。なお、これらの提示データおよび製造者側の見解を（3）-⑤の事業化計画に反映させた。以下には、その詳細を示す。

B 空隙状態と断熱性の相関関係

a 空隙評価用のサンプルの作製

多孔質セラミックス建材の製造で利用される成形法は、通常セラミックス成形法に加えてコンポジット成形や鋳型を利用することが多い。また多孔質セラミックスの機能を充分発現するには、原料粉体特性や焼結体の結晶粒径、形態、粒界構造の空間的因子を、時間的因子となる粉体合成・調整・成形・乾燥・脱脂・焼成の各ステージを通じて制御しなければならない。本技術開発における検討において、セラミックス成形法の一つであるゲルキャスト法に着目した。本成形手法は、セラミックススラリー中に溶解させたモノマーを、ラジカル重合により形成したポリマーネットワークによりセラミックス粒子を固定、固化させ成形体を得る方法であり、重合開始前のスラリーに気泡を導入することで容易に多孔質化が可能となる。

本 b、c 項の空隙状態と断熱性の相関関係の検証において、ゲルキャスト法用スラリーに異なる量の界面活性剤と CNF を添加した際の多孔質構造の変化について検討を行い、高断熱性を有する多孔質セラミックス建材の作製が可能かどうかについて検討を行った。

本検討ではセラミックス粒子として、近年その有機親和性の良さから吸着材としての応用が期待される水酸化アパタイト (HAp) を用いた。また分散処理を施した二種類の CNF (HG13-G14 と IJ05-J06、(株)スギノマシン) を使用した。HAp 粉体 (太平化学産業) 62.54g、蒸留水 37.46g に対し、分散剤セルナ D-305 (中京油脂) を 1.58g 添加した後、分散処理を施した CNF (HG13-G14、(株)スギノマシン) を水に対し 0、1、2、3wt% 添加し、自転公転ミキサーにより混合し CNF 含有 HAp スラリーを作製した。CNF 含有 HAp スラリーに架橋剤として PVA (関東化学) 1.14g、EP 樹脂 (ナガセケムテック) 4.57g を添加し自転公転ミキサーにより混合、脱泡処理を行った。その後、硬化剤として TETA1.04g、界面活性剤

としてラウリル硫酸ナトリウム (花王) 0.1、0.5、1g を加え 1、2、3 分間、機械ミキサーにより起泡させた。その後、塩化ビニル製の直方体型 (10×10×1cm) に注型し 24 時間室温固化させた。得られた成形体は真空乾燥した。焼成は大気中で 1000℃で 2 時間保持し HAp 多孔体を作製した。得られた試料の気孔構造を X-CT 装置、光学顕微鏡、アルキメデス法による気孔率測定を行い評価した。さらにそれら作製した多孔体の断熱特性を評価するために迅速熱伝導率計 (QTM-700、京都電子) をもちいて測定を行った。実験手順を図 197 に、用いたスラリー組成等を表 52 に、作製した試料を表 53 に示す。



図 197 実験フローチャート

表 52 用いたスラリーの組成

スラリー組成	質量(g)
セラミックス粉体：水酸化アパタイト (HAp, 太平化学産業)	62.54
蒸留水	37.46
分散剤：PCA(セルナD-305, 中京油脂)	1.58
エポキシ樹脂：EX-614b (ナガセケムテック)	4.57
架橋剤：PVA(重合度500, 関東化学)	1.14
硬化剤：トリエチレンテトラミン(TETA)	1.04
CNF: HG13-G14/IJ05-J06 (スギノマシン)	0, 1, 2, 3wt% (水に対して)
界面活性剤：ラウリル硫酸ナトリウム(ラテムルAD25, 花王ケミカル)	0.1, 0.5, 1.0

表 53 作製した多孔質試料と実験条件

実験	試料	界面活性剤	攪拌時間	CNF
シリーズ1	1-A	0.1g	3分	0wt%
	1-B			1wt%
	1-C			2wt%
	1-D			3wt%
シリーズ2	2-A	0.5g		0wt%
	2-B			1wt%
	2-C			2wt%
	2-D			3wt%
シリーズ3	3-A	1.0g		0wt%
	3-B			1wt%
	3-C			2wt%
	3-D			3wt%
シリーズ4	4-A	1.0g	1分	3wt%
	4-B		2分	
シリーズ5	5-A	1.0g	3分	1wt%
	5-B			2wt%
	5-C			3wt%

b 空隙状態と断熱性の関係

図 198 に界面活性剤の量、CNF の種類及び添加量、攪拌時間の違いに伴う多孔質構造の変化について X-CT による評価結果を示す。結果より、界面活性剤の量が増えるに従い、CNF 添加の効果が表れることが分かった。シリーズ 1 (界面活性剤 0.1g、攪拌時間 3 分間、CNF (HG13-G14) 添加量 : 0、1、2、3wt%) において、CNF 添加、無添加の有無に変わらず、すべての試料において開気孔、閉気孔が存在することが確認できたが、多孔体構造としては不安定なものであった。これは界面活性剤の量が少なすぎ、スラリー起泡処理時に気泡をスラリー中に保持できず、また CNF を添加しても、界面活性剤との相互作用も起きず、添加、無添加の有無による差異が生じなかったものと考えられる。シリーズ 2 (界面活性剤を 0.5g、攪拌時間を 3 分間、CNF (HG13-G14) 添加量 : 0、1、2、3wt%) においては CNF 無添加の場合、界面活性剤の量が少なく、スラリー起泡処理時に気泡をスラリー中に保持できなかつたため、相対的に気孔率は低くなつたと考えられる。しかし CNF を添加するに従い開気孔も閉気孔も量が多くなつていき、断熱材料として良好な構造が作製できることが分かった。また CNF3wt% 添加した試料では、気孔がいびつな形となり非常にユニークな形状を作ることが分かった。シリーズ 3 (界面活性剤 1 g、攪拌時間 3 分間、CNF (HG13-G14) 添加量 : 0、1、2、3wt%) において、CNF を添加しない場合、1 mm 程度の粗大な気孔と 100 μ m 程度の小さい気孔が存在し、そのほとんどが開気孔となつた。これは小さな気孔間の壁部分が焼結の際に破れてしまい、外部と貫通した開気孔となつてしまうためと考えられ、既往の研究結果とも一致している。一方、CNF を加えていくに従い、気孔径の増大とともに気孔間の壁が厚くなつていくことが X-CT の結果明らかとなつた。CNF を 3wt% 加えたできた気孔が界面活性剤を 0.5g 添加時と同じような非常にユニークな形状となつた。シリーズ 4 (界面活性剤 1 g、CNF (HG13-G14) 添加量 3wt%、攪拌時間 : 1、2、3 分) において、攪拌時間が延びるに従い、気孔径が増大することが分かった。また攪拌時間 1 分の場合、閉気孔率は 2、3 分より上昇し、気孔形状やサイズが均一となつており、特異な断熱特性を発現すると期待できる。CNF の種類を変えたシリーズ 5 (界面活性剤 1g、攪拌時間 3 分間、CNF (IJ-G14) 添加量 : 0、1、2、3wt%) においては、CNF (IJ-G14) を添加する場合、CNF (HG13-G14) と比べると、異なる気孔構造を持つ多孔質を作ることが分かった。これは CNF (IJ-G14) の方が (HG13-G14) よりかなり高い粘度 (IJ-G14: 2500mPa \cdot s; HG13-G14: 2500mPa \cdot s) を持つことで、分散させたスラリーの粘度が上昇し、攪拌処理時に起泡しにくいためと考えられる。

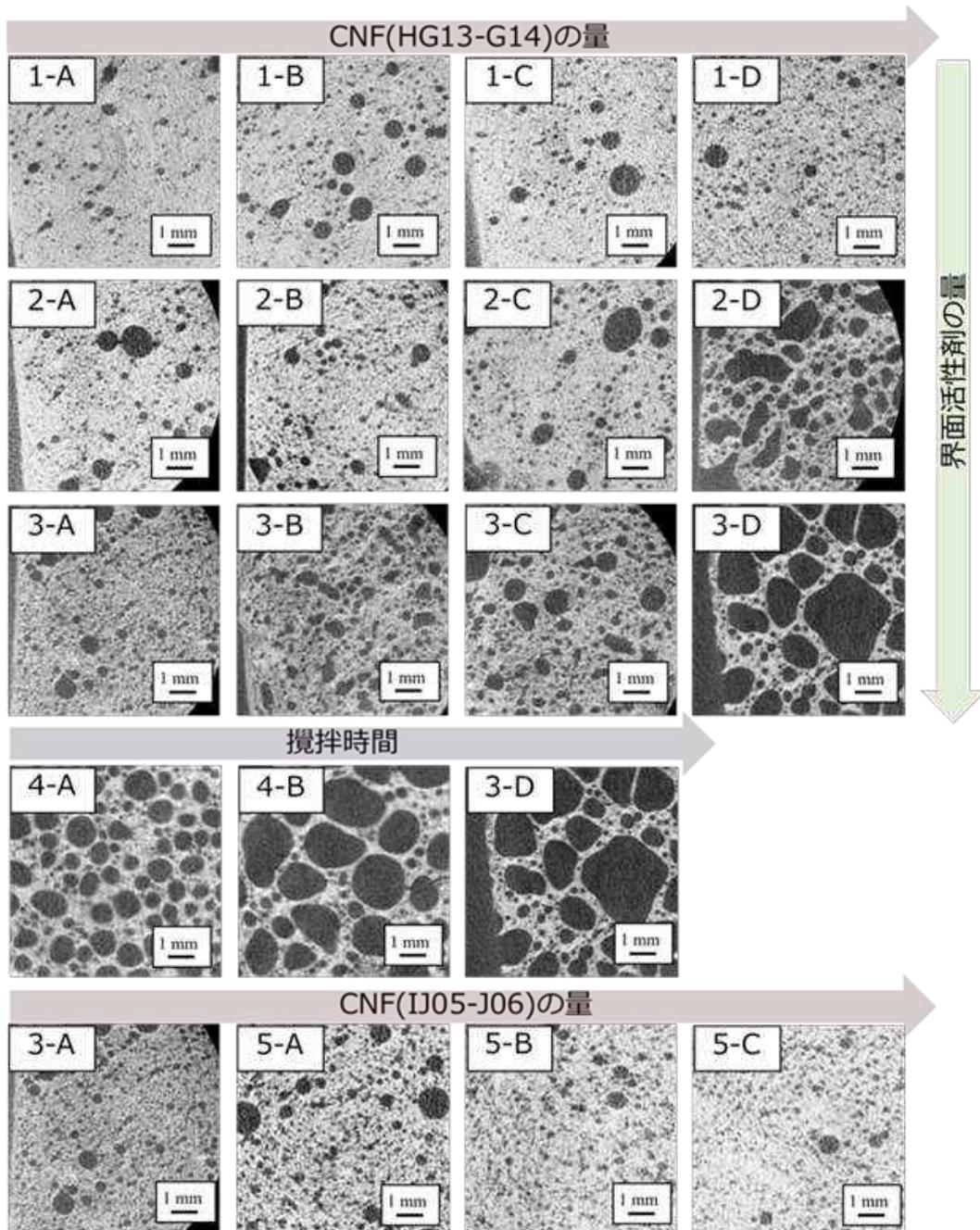


図 198 界面活性剤の種類、量、攪拌時間の違いによる多孔質構造の変化

図 199 にシリーズ 1 – 5 の条件により作製した気孔率の変化を示す。結果より、シリーズ 1 – 4 全般において、界面活性剤が増えるに従い全体的な気孔率が増加していることが分かる。また CNF (HG13-G14) を用いた場合、その添加量が増えるに従いその気孔率が増加していることが分かる。一方、CNF (IJ-G14) を添加する場合、CNF 添加量が増えるに従い、その気孔率が減少していることが分かる。これは X-CT 観察結果とも一致し、相対的に高い粘度の影響で分散させたスラリーの粘度が上昇し、攪拌処理時に起泡しにくかったと考えられる。

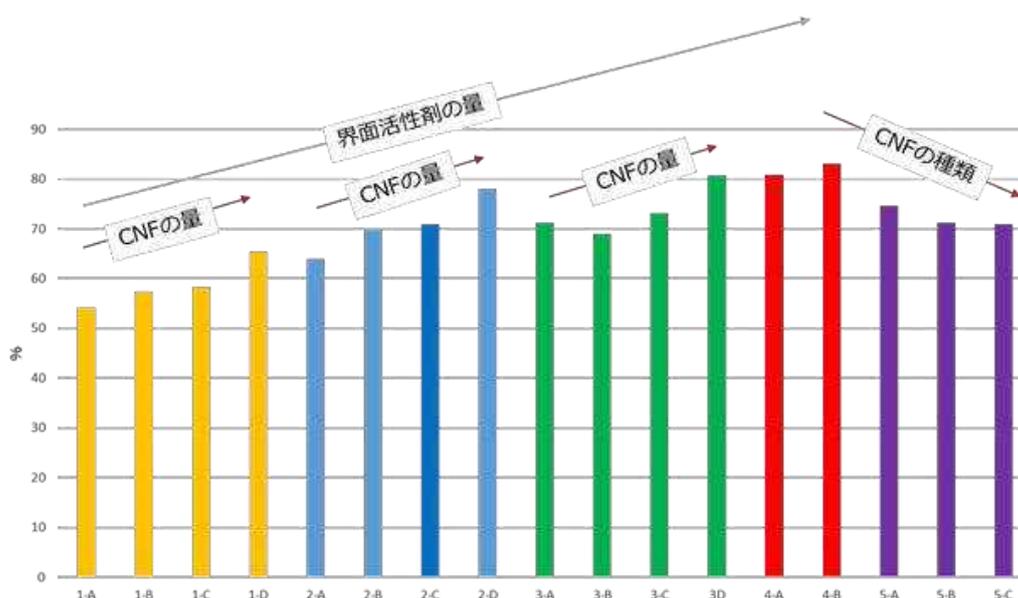


図 199 界面活性剤の種類、量、攪拌時間の違いによる多孔質構造の変化

図 200 にシリーズ 1 – 5 の条件により作製した多孔体の熱伝導率の変化を示す。参考のためそれぞれのサンプルの気孔率及び閉気孔率を示す。結果より、今回作製したサンプルはすべて 0.3W/mK 以下と良好な熱伝導率特性を持つことが分かった。これらはゲルキャスト法による良好な多孔質構造かつ高气孔率による影響と考えられる。また CNF の添加によりそれぞれの熱伝導率が減少していることが分かる。界面活性剤の添加量が増えるに従い、気孔率の増加とそれらに伴う熱伝導率の相対的な低下がみられたが、それ以上に CNF 添加の影響による熱伝導率の低下が顕著にみられた。これは X-CT での観察で見られた特異な多孔質構造により断熱特性が向上したものと考えられる。とくに今回作製したサンプルの中で最も低熱伝導率であった 4-B 試料は 0.1W/mK と、良好な断熱特性を有することが分かった。図 201 に今回作製したサンプルの気孔率と熱伝導率の関係を示す。結果より通常報告されている熱伝導率と気孔率の関係は直線的な関係で示される場合が多いが、CNF 添加による特異な多孔質構造の影響

響のため直線状とはならないが良好な相関関係にあることが分かった。

以上の結果より、界面活性剤が十分量存在する場合、添加した CNF との相互作用により保持する気孔の構造が変化し、これまでに例のない特異な構造を持つ多孔質セラミックスの作製が可能であることが分かった。界面活性剤と CNF の相互作用については、形成する気孔の量、分布状態、形状に大きく寄与することが本研究の結果から明らかになったが、断熱性能あるいは空隙制御に影響するため、製造時においては留意する必要があると考えられる。

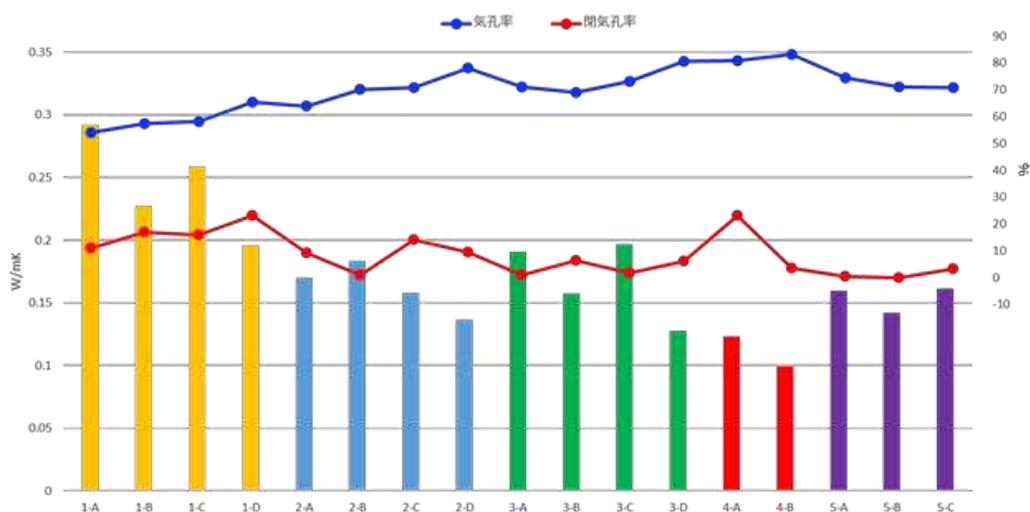


図 200 界面活性剤の種類、量、攪拌時間の違いによる熱伝導率の変化

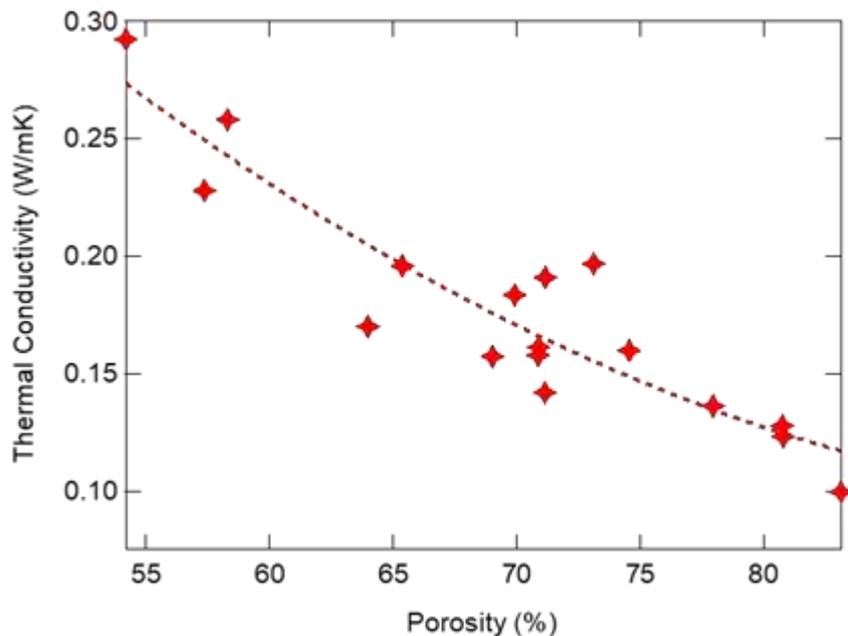


図 201 今回作製した試料の気孔率と熱伝導率の関係

c 空隙と空気対流の関係

・ CNF 添加断熱材のマイクロ構造のモデル化と断熱特性評価方法

本事業では、ウッドファイバーやグラスウール断熱材に対してセルロースナノファイバー (CNF) をスプレー添加し、空隙を微細化することで空気の対流を防止し、断熱特性を向上する。一例として、CNF を添加したウッドファイバーの SEM 観察図を図 202 に示す。mm オーダーのメゾ構造においては、繊維間にスプレー添加された CNF が膜状に付着し、繊維間の空隙を分離していることがわかる。さらに、CNF 膜の μm オーダーの組織を拡大してマイクロ構造を観察すると、CNF 繊維が複雑に絡み合っており、細かい円形の空隙を形成していることがわかる。ここでは、このような CNF 膜におけるマイクロ構造が断熱特性に及ぼす効果を有限体積法に基づく数値解析シミュレーションにより明らかにする。

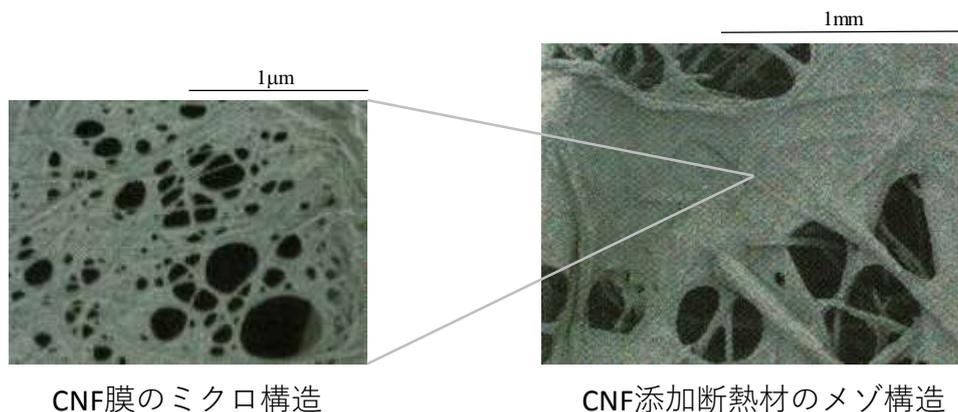


図 202 CNF を添加したウッドファイバーの SEM 観察図

図 203 に CNF 膜のマイクロ構造に対する解析モデルを示す。ここでは、CNF 膜を直径 d の円孔が間隔を d として規則的に配列した膜と見なす。複数枚の CNF 膜が積層されている状態が見受けられることから、代表体積要素として 4 層の層状構造を想定する。層の厚さは t とし、隣接する層の間隔も円孔サイズと同じ d とする。また、隣接する層において、円孔の配置が 2 分の 1 周期だけずれている場合を想定した。

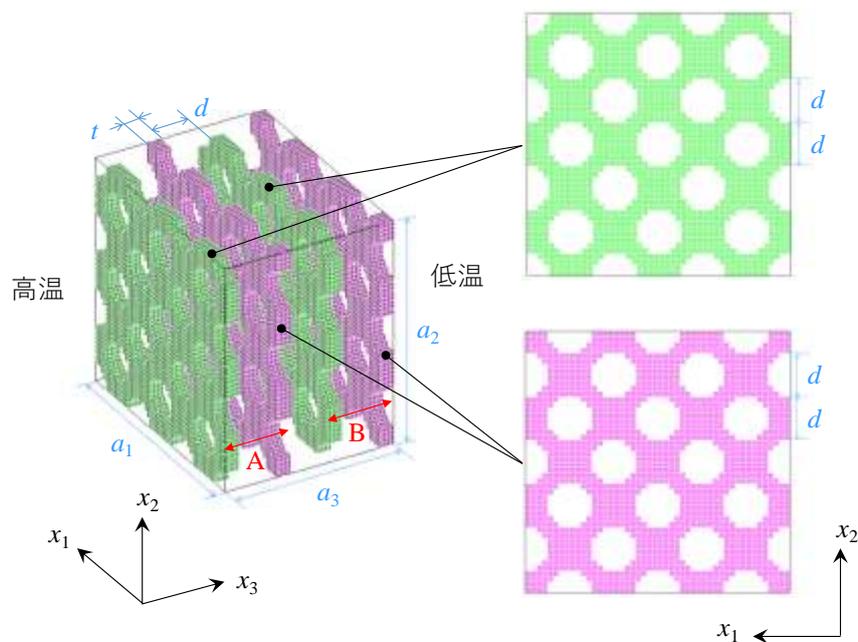


図 203 CNF 膜のマイクロ構造に対する解析モデル

CNF 膜の面内に x_1 および x_2 軸を設定し、厚さ方向に x_3 軸とする。 x_3 軸に対

して負方向に熱量 $Q=10 \text{ W/m}^2$ を与え、非定常熱伝導流体解析を行った。断熱材が壁に使用された場合を想定し、重力の方向を x_2 軸、熱の移動方向を x_3 軸に設定した。解析に用いた CNF と空気の物性値を表 54 に示す。

表 54 解析に用いた CNF と空気の物性値

	密度	熱伝導率	比熱
	kg/m^3	$\text{W/m}\cdot\text{K}$	$\text{J/kg}\cdot\text{K}$
空気	1.2425	0.0249	1006
CNF	1500	0.038	1255.82

高温側の温度 T_1 として図 203 中 A のセル平均温度、低温側の温度 T_2 として B のセル平均温度を算出し、これらの時刻に対する変化率が 1.0%以下となる、すなわち定常状態まで解析を実施した。フーリエの法則に基づき、次式からミクロ構造全体の等価な熱伝導率 κ を算出した。

$$\kappa = \frac{Q \Delta x}{T_1 - T_0}$$

ここで、 Δx はセル中心間距離を意味する。

・断熱特性に及ぼす CNF 膜の空気対流防止効果

解析コードの使用制約にから nm オーダーの解析モデルが作成できなかったため、ここでは mm オーダーの相似形ミクロ構造における熱伝導挙動を分析する。最初に、標準スケールモデルとして、解析領域 $a_1 = a_2 = 480\text{mm}$ 、 $a_3 = 360\text{mm}$ 、空隙サイズ $d = 80\text{mm}$ 、膜厚 $t = 30\text{mm}$ に設定し、非定常熱伝導流体解析を実施した。数値解析から得た高温および低温側セル平均温度、すなわち T_1 および T_0 の時刻変化を図 204 に示す。定常状態に至るまで、いずれセルも 1000 分以上を要し、定常状態において T_1 は 16.5°C 、 T_0 は 5.87°C となった。

標準スケールにおいて、CNF 膜の空気対流防止効果を定量的に明らかにするため、CNF 膜のない空気だけが存在する領域 ($a_1 = a_2 = 480\text{mm}$ 、 $a_3 = 360\text{mm}$) に対しても同様の解析を実施した。高温および低温側セル平均温度の時刻変化を図 205 に示す。空気だけの場合、600 秒で定常状態となり、そのときの温度は $T_1 = 12.0^\circ\text{C}$ 、 $T_0 = 9.85^\circ\text{C}$ であった。の CNF 膜がある場合、定常状態における高温側と低温側の温度差は 10.6°C であったのに対して、空気だけの場合は CNF 膜により空気対流がまったく抑制されず、熱伝導性が増大するため、定常状態における温度差

は 2.15°C にすることがわかる。

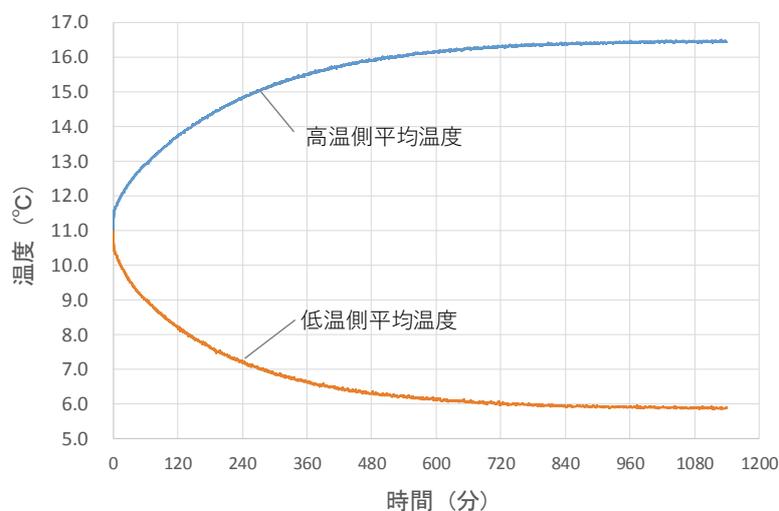


図 204 高温および低温側セル平均温度の時刻変化 (標準スケール)

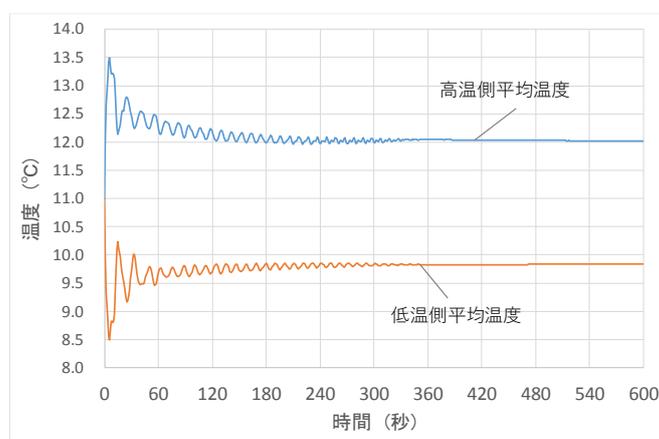


図 205 CNF 膜のない空気領域に対する平均温度の時刻変化 (標準スケール)

次に、CNF 膜の有無による温度分布と空気対流の違いを把握するため、CNF 膜がある場合と空気だけの場合について、定常状態における (a) 温度分布と (b) 流速ベクトル分布をそれぞれ図 206 および図 207 に比較する。CNF 膜が存在する場合は、空気の流れが阻害され、複雑な経路で水平方向に移動している様子が確認できる。また、熱が移動する水平方向に顕著な温度差を生じることがわかる。これに対して、空気層だけの場合は、流れが阻害されず、水平方向に層流が発生している。また、空気が十分に対流することから、熱が移動する水平方向ではなく、重力によって垂直方向に温度差が生じることがわかる。

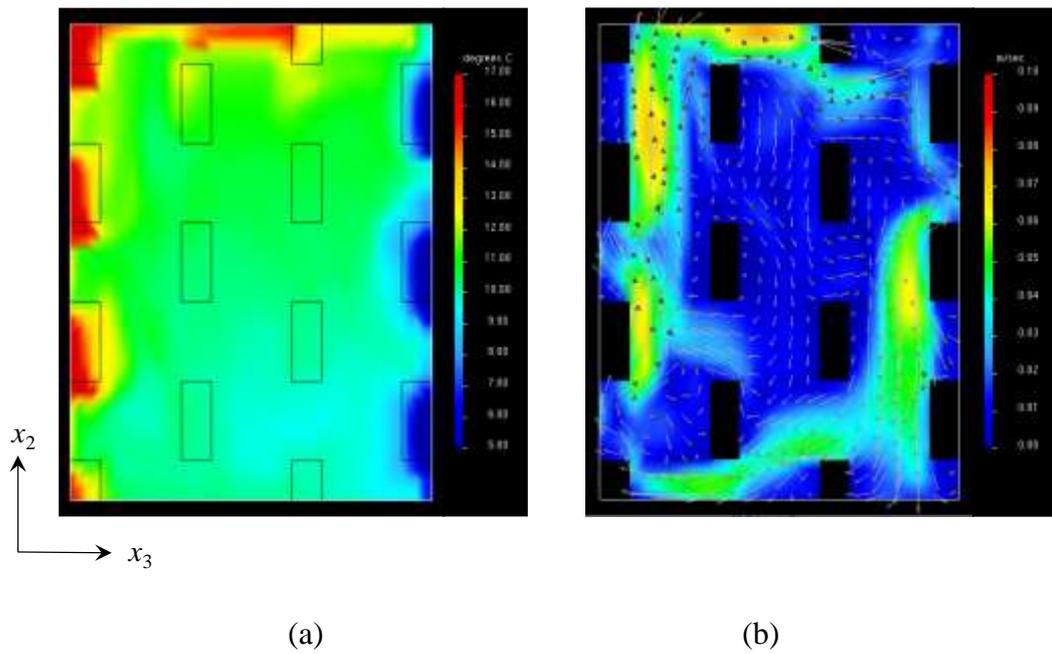


図 206 CNF 膜がある場合の定常状態 (1140 分後) の
(a) 温度と (b) 流速 (標準スケール)

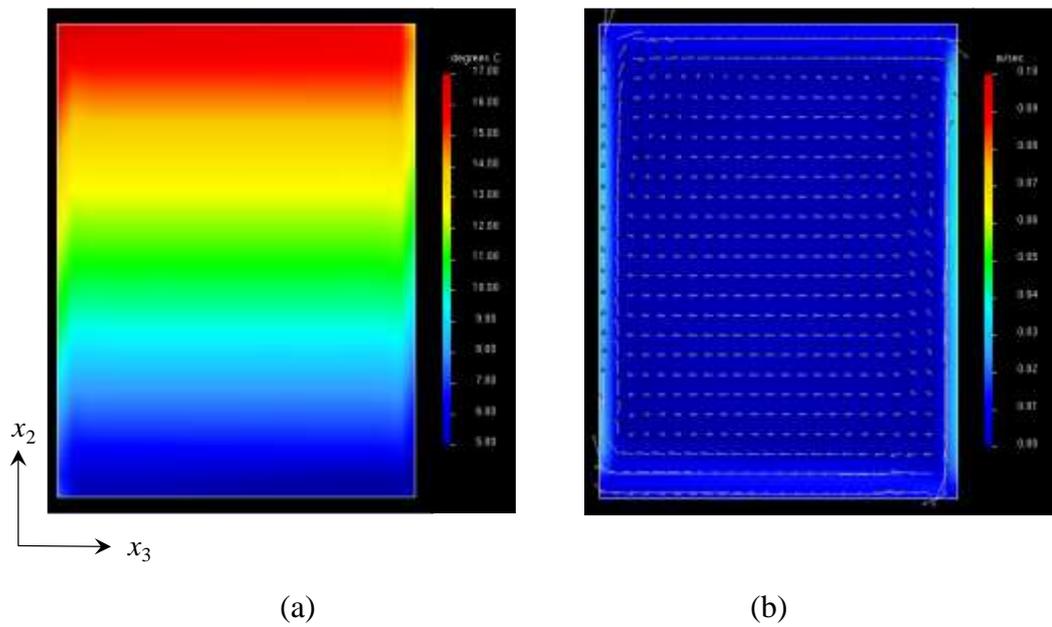


図 207 空気だけの場合の定常状態 (600 秒後) の
(a) 温度 と (b) 流速 (標準スケール)

前述の式に基づいて図 204 に示す温度差から算出した、CNF 膜が存在する場合のマイクロ構造全体の等価な熱伝導率の時刻変化を図 208 に示す。時間経過に

伴って領域内での温度勾配も小さくなり、これに応じてマイクロ構造全体の等価熱伝導率も低下する。定常状態における等価熱伝導率は 0.3333W/mK であった。一方、CNF 膜のない空気だけの場合の等価熱伝導率の時刻変化を図 209 に示す。定常状態における等価熱伝導率は 1.6136W/mK となり、CNF 膜のある場合と比較し、およそ 5 倍に増大することがわかる。標準スケールにおいて、CNF 膜による空気対流防止効果による熱伝導率の低下率は、およそ 79% であった。

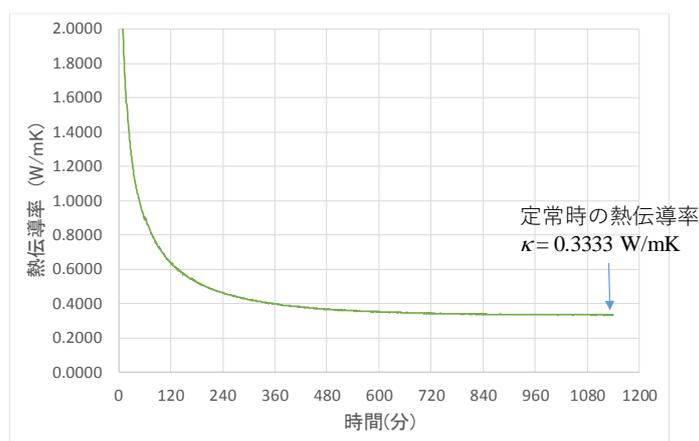


図 208 CNF 膜が存在する場合の等価熱伝導率の時刻変化 (標準スケール)

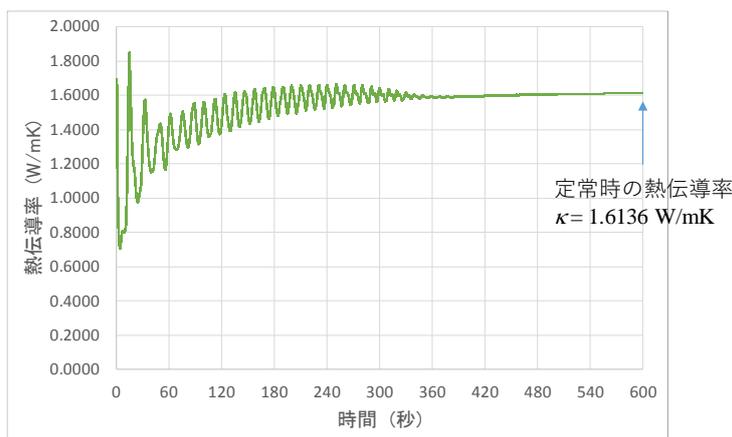
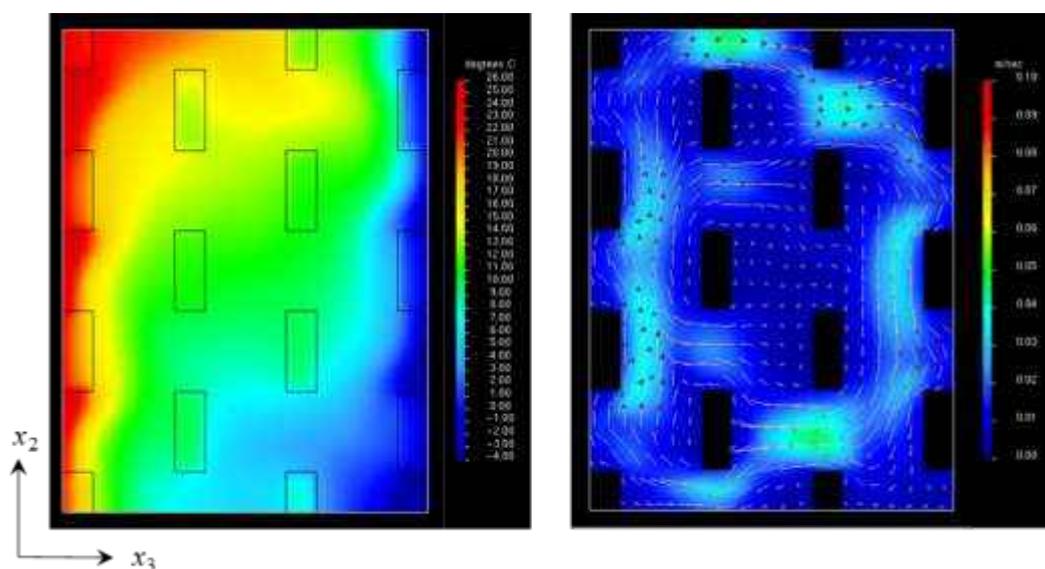


図 209 CNF 膜のない空気だけの場合の等価熱伝導率の時刻変化 (標準スケール)

・断熱特性に及ぼす空隙サイズの影響

断熱特性に及ぼす空隙サイズの影響を明らかにするため、図 203 に示すマイクロ構造に対して、解析領域 $a_1 = a_2 = 48\text{mm}$ 、 $a_3 = 36\text{mm}$ 、空隙サイズ $d = 8\text{mm}$ 、膜厚

$t=3\text{mm}$ と設定した 0.1 倍スケールモデルと、解析領域 $a_1= a_2=4800\text{mm}$ 、 $a_3=3600\text{mm}$ 、空隙サイズ $d=800\text{mm}$ 、膜厚 $t=300\text{mm}$ と設定した 10 倍スケールモデルに対して、上記の同様の非定常熱伝導流体解析を実施した。図 210 および図 211 にそれぞれ 0.1 倍スケールと 10 倍スケールの定常状態における温度と流速分布を示す。スケールが小さくなると、定常に至るまでの所要時間は短くなる。また、空気が複雑に対流する傾向は同じであるが、流速は小さくなり、一部の流れは水平方向を完全に移動せず、局所化する傾向も見受けられる。一方、スケールが大きくなると、定常に至るまでの所要時間は長くなる。また、流速は増大し、大半の流れは水平方向を完全に移動している様子が確認できる。これらの結果から、CNF 膜による空気対流の防止効果として、流速の減少と流れの局所化が現れることが明らかになった。



(a) (b)

図 210 CNF 膜がある場合の定常状態 (480 秒後) の
(a) 温度 と (b) 流速 (0.1 倍スケール)

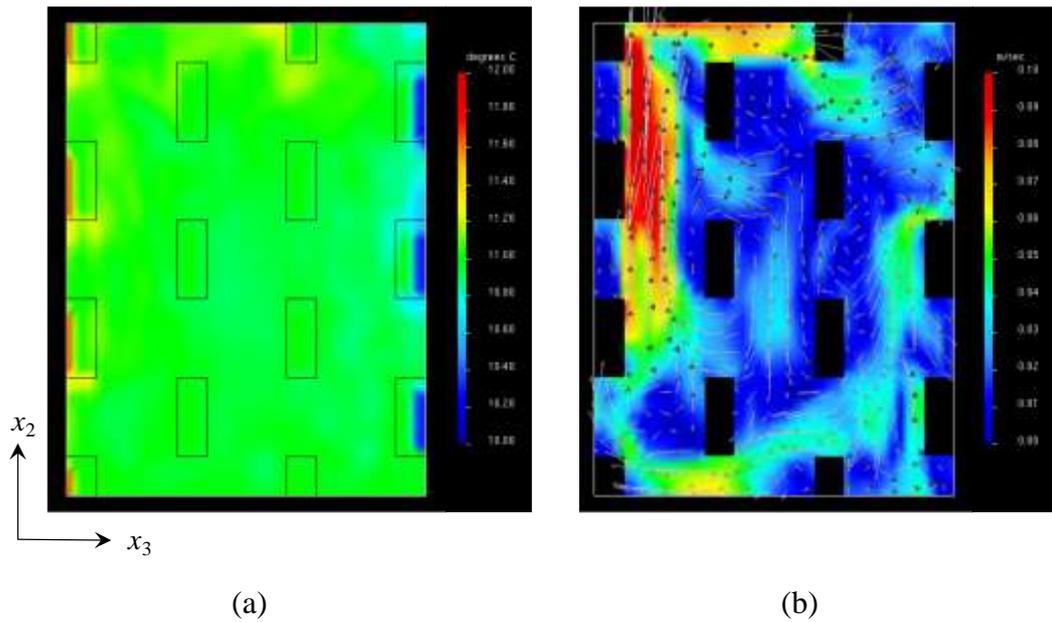


図 211 CNF 膜がある場合の定常状態 (2100 分後) の
(a) 温度 と (b) 流速 (10 倍スケール)

断熱特性のスケール依存性を把握するため、等価熱伝導率と空隙サイズ d の関係を図 212 に示す。空隙サイズが小さくなるに伴って、空気の対流が防止され、等価熱伝導率が低下する傾向が確認できる。特に、等価熱伝導率は 800mm から 80mm へのスケール変化で大きく減少し、その後は緩やかに減少する。 d が極限としてゼロとなった場合、マイクロ構造における空隙は消滅し、CNF だけになることから、マイクロ構造全体の等価熱伝導率は CNF 自身の熱伝導率 0.038W/mK に収束するものと考えられる。

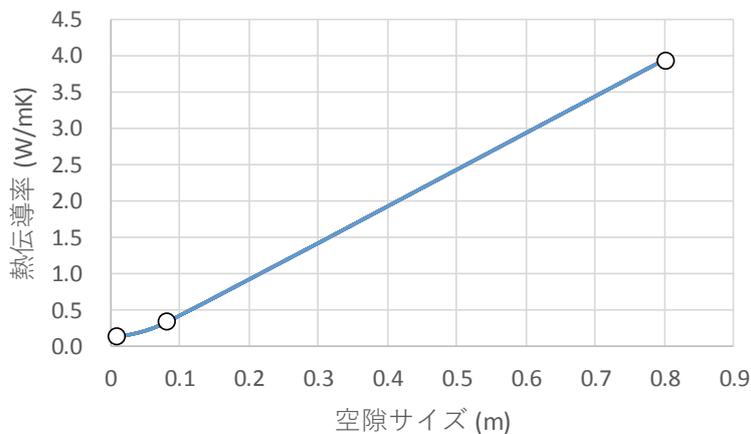


図 212 CNF 膜の等価熱伝導率と空隙サイズの関係

イ CNF 製品利用者に向けた情報発信

A 概要

本事業で実測したモデルルーム仕様をベースに、本開発断熱部材が室内温度環境に及ぼす効果を熱流体数値解析シミュレーションにて評価し、既存部品よりも高い断熱性を発現することが定量的に確認された。この結果は、(3)-②-イに実施したヒアリングに活用した。以下には、その詳細を示す。

B モデルルームにおける本断熱部品使用の効果

従来の断熱部材と比較して、本開発断熱部材の優位性を定量的に示すため、有限体積法に基づく熱流体数値解析シミュレーションによりモデルルームの断熱性に及ぼす効果を調査した。図 213 に示すモデルルームを想定し、(1)-④-イに実施した調査と同様に、平面エリアは 3600mm×3600mm の 8 畳スペース、高さは 2400mm とし、一般住宅における標準的なサイズを想定した。

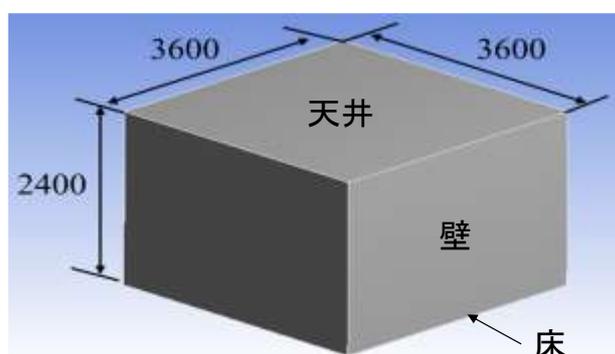


図 213 解析対象としたモデルルーム (開口部なし)

モデルルームの上面を天井、下面を床、4つの側面を壁に設定し、それぞれの部材に応じて表 38 ((1)-④-イ参照) に示す特性値を入力した。従来材料は、すべて(1)-④-イにおいて市販材の標準的な材料構成を想定して設定した特性値である。一方、開発材料では、天井はグラスウール断熱材 (厚さ 200mm、熱伝導率 0.045W/mK) と銘木合板 (厚さ 4.0mm、熱伝導率 0.160W/mK) から成る 2 層構造、壁はバインダレスボード (厚さ 5.0mm、熱伝導率 0.120W/mK) 、CNF 添加セルローズ断熱材 (厚さ 100mm、熱伝導率 0.038W/mK) 、軽量コンクリート (厚さ 12mm、熱伝導率 0.200W/mK) の 3 層構造、床はウッドコンポジット (厚さ 10mm、熱伝導率 0.120W/mK) 、CNF 添加ウレタン (厚さ 11mm、熱伝導率 0.330W/mK) 、CNF 添加セルローズ断熱材 (厚さ 100mm、熱伝導率 0.038W/mK) の 3 構造とした。従来材料と同様に、(1)-④-イに記載した式より等価熱伝導率 κ^* および等価熱貫流率 λ^* を算出した。

冬季の環境を想定し、外気温を 0°C に保持した環境下で、モデルルームが室温 25°C の初期状態から放置された場合の非定常熱流体解析を実施した。材料の使用形態が異なる下記の 4 条件に対して、解析を実施した。

- I 天井、壁、床のすべてに従来材料を使用
- II 天井にのみ開発材料を採用し、壁と床には従来材料を使用。
- III 壁にのみ開発材料を採用し、天井と床には従来材料を使用。
- IV 床にのみ開発材料を採用し、天井と壁には従来材料を使用。
- V 天井、壁、床のすべてに開発材料を採用。

数値解析により得られた、モデルルームの中央における温度の時刻変化を図 214 に比較する。温度が低い外部へ熱が失われ、時間経過に伴って室温は初期状態 298K (25°C) から減少し、I から V までのいずれの条件においても 80 分以上経過した後定常状態に至ることがわかる。すべてに従来材料を使用した条件 I と比較し、開発材料を採用した場合、特にすべてに開発材料を採用した条件 V の場合の室温の低下が緩やかであり、保温性が高いことが確認できる。

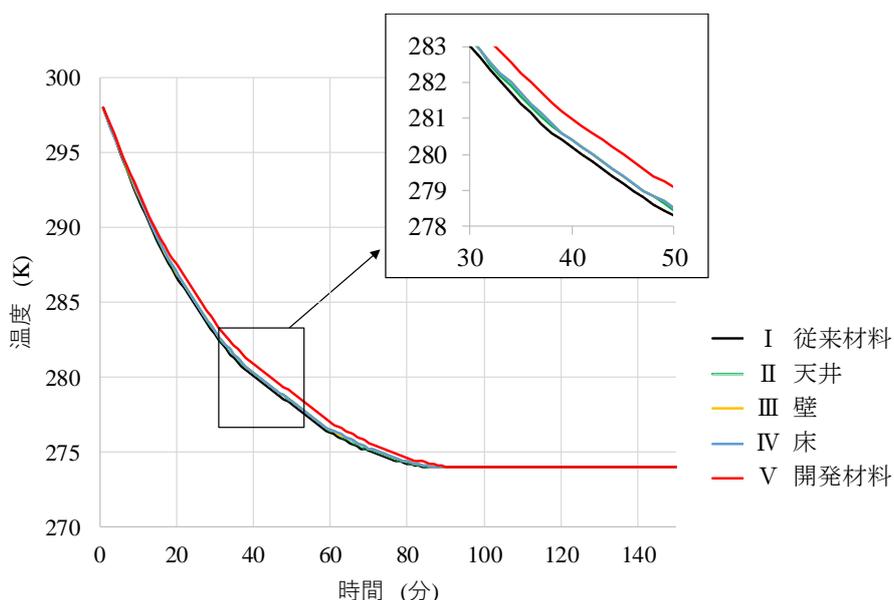


図 214 モデルルームの中央における温度の時刻変化の比較

図 215 に定常状態に至るまでの時間を比較する。すべてに従来材料を使用した条件 I では、定常状態に至るまでの時間は 83 分であったのに対して、天井のみ開発材料を採用した条件 II では 84 分、壁のみ開発材料を採用した条件 III と床のみ開発材料を採用した条件 IV では 85 分と長くなり、特に壁と床において開発

材料の採用が効果的であることが分かった。さらに、すべてに開発材料を使用した条件Vでは、定常状態に至るまでの時間は89分まで長くなり、従来材料の条件Iと比較して6分の遅延効果があった。一方、天井、壁、床にそれぞれ単独で開発材料を採用した条件II、III、IVでは、それぞれ1分、2分、2分の遅延であり、3条件の合計で5分の遅延であったことから、すべてに開発材料を採用した場合には相乗効果によって断熱効果がさらに向上することが確かめられた。

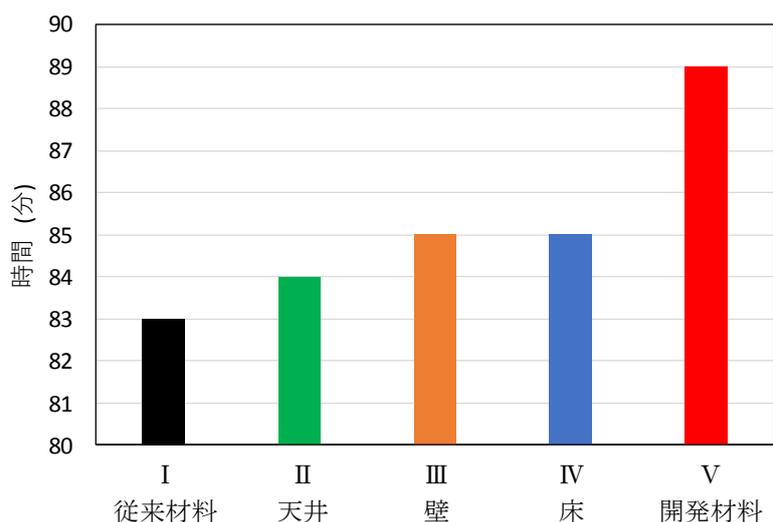


図 215 定常状態に至るまでの時間の比較

②経済性の評価

ア 各部品の経済性評価

表 55 に住宅 1 戸あたりのコスト比較を示す。イニシャルコストは開発品の方が高いものの、ランニングコストは開発品の方が低く、両者を勘案すれば 2.6 年でコスト回収が可能となる。

表 55 経済性評価

イニシャルコスト	95,354 円/戸	
ランニングコスト	既存品	108,036 円/戸/年
	開発品	70,862 円/戸/年
	差	37,174 円/戸/年
回収年数	2.6 年	

A 各部品のコスト比較

表 56 には、施工まで含めた各部品の住宅 1 戸当たりのコスト比較表を示す。既存部品と比較し、外壁で 50 千円/戸、天井で 11 千円/戸、床で 20 千円/戸、内壁で 14 千円/戸で、トータルでは、95 千円/戸のコストアップとなっている。今回は計算のモデルとした住宅は、床面積 38 坪で算出しているため、坪単価では、約 2,5 千円のコストアップとなる。したがって、CNF を利用した新規技術でありながら、市場で受け入れられるコストアップで抑えられているといえる。CNF 利用による材料費の上昇が要因の一つではあるが、開発部素材はすべて新規にラインの導入を前提として算出しているため（各項の製造原価参照）、固定費分の負荷も大きい。本開発部素材の特徴は、特殊な設備を用いず、既存のラインでも製造できることを前提に開発を進めている。したがって、多くの開発部素材は、既存ラインにて製造可能であるため、固定費分のコスト差は少なくなると思われる（表 56 推定参考値）。また、各原料の単価は、設計価格に近い単価を採用しており、実際に数量が増えれば、スケールメリットによるコストダウンは期待できる。しかしながら、本事業では、安全率も見据えて、あえて、コスト的に高くなる算出法で原価計算を行った。

表 56 各部品の製造コスト比較

部品		部品コスト	差(コストアップ分)	(推定参考値) 既存ラインを利用した 場合の差 (コストアップ分)
外壁	開発品	592,398 円/戸	50,939 円/戸	16,335 円/戸
	既存品	541,459 円/戸		
天井	開発品	274,524 円/戸	11,168 円/戸	10,935 円/戸
	既存品	263,356 円/戸		
床	開発品	428,216 円/戸	19,624 円/戸	6,517 円/戸
	既存品	408,592 円/戸		
内壁	開発品	264,403 円/戸	13,623 円/戸	863 円/戸
	既存品	250,780 円/戸		
計	開発品	1,559,541 円/戸	95,354 円/戸	34,650 円/戸
	既存品	1,464,187 円/戸		

B ライフサイクルコストの比較

表 57 には、断熱区分 6 地域における既存部品と開発部品を用いた場合の暖房エネルギーコスト比較を示す。これは、各部品の熱還流率から、建築研究所の「エネルギー消費性能計算プログラム」を用い、電力エネルギー計算を行い、各住宅の使用エネルギー比率に分割して算出している。年間の暖房費においては、1,732 円/年の暖房エネルギー削減になっている。

また、表 58 には、断熱区分 4 地域における既存部品と開発部品を用いた場合の暖房エネルギーコスト比較を示す。年間の暖房費においては、4,948 円/年の暖房エネルギー削減になっている。4 地域は寒冷地のため、6 地域と比較すると暖房エネルギー削減効果は大きくなっている。

表 59 には、開発品と既存品のメンテナンスコスト比較を示す。長期使用においては、様々な部品のメンテナンスが必要となるが、ここでは、外観上、交換を要する部品、意匠部品である部屋の壁とフロア部分で評価を行った。意匠部品である本開発品の壁とフロアの特徴は、再研磨するだけで、元の素地が復元できる点である。したがって、交換部品を要しない点が大きなメリットで、メンテナンス費用として、412 千円/戸のコスト効果があり、単純に償却換算しても、35 千円/戸/年の効果が見込まれる。

表 57 暖房エネルギーコスト比較 (6 地域)

開発部品							
	世帯あたり エネルギー 消費割合	暖冷房関連 エネルギー 消費割合	機器別 一次エネルギー (住宅データ)MJ	燃料	単位発熱量	燃料単価	金額 (円/年)
石油ファンヒーター	6.2%	30.1%	5,929.13	灯油	36.7 MJ/L	84 円/L	13,570.8
石油ストーブ	5.4%	26.2%	5,164.08	灯油	36.7 MJ/L	84 円/L	11,819.7
エアコン	3.5%	17.0%	3,347.09	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	9,064.3
電気カーペット	1.0%	4.9%	956.31	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	2,589.8
ガスストーブ	0.3%	1.5%	286.89	ガス	46.1 MJ/m ³	134 円/m ³	833.9
その他	4.2%	20.4%	4,016.50	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	10,877.2
	20.6%	100.0%	19,700.00				48,755.7
既存部品							
	世帯あたり エネルギー 消費割合	暖冷房関連 エネルギー 消費割合	機器別 一次エネルギー (住宅データ)MJ	燃料	単位発熱量	燃料単価	金額 (円/年)
石油ファンヒーター	6.2%	30.1%	6,139.81	灯油	36.7 MJ/L	84 円/L	14,053.0
石油ストーブ	5.4%	26.2%	5,347.57	灯油	36.7 MJ/L	84 円/L	12,239.7
エアコン	3.5%	17.0%	3,466.02	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	9,386.4
電気カーペット	1.0%	4.9%	990.29	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	2,681.8
ガスストーブ	0.3%	1.5%	297.09	ガス	46.1 MJ/m ³	134 円/m ³	863.6
その他	4.2%	20.4%	4,159.22	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	11,263.7
	20.6%	100.0%	20,400.00				50,488.1
既存部品－開発部品							
	世帯あたり エネルギー 消費割合	暖冷房関連 エネルギー 消費割合	機器別 一次エネルギー (住宅データ)MJ	燃料	単位発熱量	燃料単価	金額 (円/年)
石油ファンヒーター	6.2%	30.1%	210.68	灯油	36.7 MJ/L	84 円/L	482.2
石油ストーブ	5.4%	26.2%	183.50	灯油	36.7 MJ/L	84 円/L	420.0
エアコン	3.5%	17.0%	118.93	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	322.1
電気カーペット	1.0%	4.9%	33.98	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	92.0
ガスストーブ	0.3%	1.5%	10.19	ガス	46.1 MJ/m ³	134 円/m ³	29.6
その他	4.2%	20.4%	142.72	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	386.5
	20.6%	100.0%	700.00				1,732.4

表 58 暖房エネルギーコスト比較 (4 地域)

開発部品							
	世帯あたり エネルギー 消費割合	暖冷房関連 エネルギー 消費割合	機器別 一次エネルギー (住宅データ)MJ	燃料	単位発熱量	燃料単価	金額 (円/年)
石油ファンヒーター	6.2%	30.1%	12,911.65	灯油	36.7 MJ/L	84 円/L	29,552.6
石油ストーブ	5.4%	26.2%	11,245.63	灯油	36.7 MJ/L	84 円/L	25,739.3
エアコン	3.5%	17.0%	7,288.83	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	19,739.1
電気カーペット	1.0%	4.9%	2,082.52	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	5,639.7
ガスストーブ	0.3%	1.5%	624.76	ガス	46.1 MJ/m ³	134 円/m ³	1,816.0
その他	4.2%	20.4%	8,746.60	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	23,686.9
	20.6%	100.0%	42,900.00				106,173.6
既存部品							
	世帯あたり エネルギー 消費割合	暖冷房関連 エネルギー 消費割合	機器別 一次エネルギー (住宅データ)MJ	燃料	単位発熱量	燃料単価	金額 (円/年)
石油ファンヒーター	6.2%	30.1%	13,513.59	灯油	36.7 MJ/L	84 円/L	30,930.3
石油ストーブ	5.4%	26.2%	11,769.90	灯油	36.7 MJ/L	84 円/L	26,939.3
エアコン	3.5%	17.0%	7,628.64	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	20,659.3
電気カーペット	1.0%	4.9%	2,179.61	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	5,902.7
ガスストーブ	0.3%	1.5%	653.88	ガス	46.1 MJ/m ³	134 円/m ³	1,900.7
その他	4.2%	20.4%	9,154.37	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	24,791.2
	20.6%	100.0%	44,900.00				111,123.4
既存部品－開発部品							
	世帯あたり エネルギー 消費割合	暖冷房関連 エネルギー 消費割合	機器別 一次エネルギー (住宅データ)MJ	燃料	単位発熱量	燃料単価	金額 (円/年)
石油ファンヒーター	6.2%	30.1%	601.94	灯油	36.7 MJ/L	84 円/L	1,377.7
石油ストーブ	5.4%	26.2%	524.27	灯油	36.7 MJ/L	84 円/L	1,200.0
エアコン	3.5%	17.0%	339.81	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	920.2
電気カーペット	1.0%	4.9%	97.09	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	262.9
ガスストーブ	0.3%	1.5%	29.13	ガス	46.1 MJ/m ³	134 円/m ³	84.7
その他	4.2%	20.4%	407.77	電気	10.0 MJ/kWh	27 円/kWh	1,104.3
	20.6%	100.0%	2,000.00				4,949.8

表 59 メンテナンスコスト比較

			単価	数量	メンテナンス費用	耐用年数	ランニングコスト	
内壁部	開発品	無機ボード 再研磨	施工費	800 円/m ²	235 m ²	188,000 円/戸	10 年	18,800 円/年
			計			188,000 円/戸		18,800 円/年
	既存品	クロス貼替	クロス	416 円/m ²	235 m ²	97,760 円/戸	10 年	9,776 円/年
			施工費	1,400 円/m ²	235 m ²	329,000 円/戸	10 年	32,900 円/年
			計			426,760 円/戸		42,676 円/年
差(既存品－開発品)					238,760 円/戸		23,876 円/年	
フロア部	開発品	WPC 再研磨	施工費	800 円/m ²	62 m ²	49,600 円/戸	15 年	3,307 円/年
			計			49,600 円/戸		3,307 円/年
	既存品	フロア貼替	フロア合板	2,798 円/m ²	62 m ²	173,476 円/戸	15 年	11,565 円/年
			施工費	800 円/m ²	62 m ²	49,600 円/戸	15 年	3,307 円/年
			計			223,076 円/戸		14,872 円/年
差(既存品－開発品)					173,476 円/戸		11,565 円/年	
開発品メンテナンス費用					237,600 円/戸		22,107 円/戸	
既存品メンテナンス費用					649,836 円/戸		57,548 円/戸	
メンテナンス費用での効果額					412,236 円/戸		35,441 円/戸	

イ 住宅メーカー等へのヒアリング

A 高断熱化へのニーズ

a 一般的な高断熱化ニーズに対する報告

H29 年度「住宅市場動向調査 (国土交通省 www.mlit.go.jp/report/press/house02_hh_000126.html)」によれば、住宅の選択理由となった設備等については、注文住宅取得世帯では「高気密・高断熱住宅だから」が最も多く、回答者の約 60%が選択している。このような情勢の中、岡山県北部の地域工務店 2 社 (院庄林業住宅・藤久工務) の 2 社に対する聞き取り調査を行った。

b 高断熱部品の普及情報

住宅の省エネ性能を確保・向上させることで他社との差別化を図るとともに、税制優遇など施主に対するメリットを生み出すための手段としての高気密・高断熱化は、住宅メーカーのみならず地域工務店にも広がりつつある。窓を例にとると、アルミサッシに比較して断熱性能を高めたアルミ樹脂複合サッシおよび、単層・複層ガラスに比較して断熱・保温性能を高めた LOW-E ペアガラスの採用は今や標準仕様となっている。

B CNF を利用した新規部品の課題

a コスト面

建築物省エネ法 (国土交通省)、ZEH (経産省)、HEAT20 (2020 年を見据えた住宅の高断熱化技術開発委員会) において住宅の省エネ性能目標が設定される中、その指標となる UA 値 (外皮平均熱貫流率) が新規部品の目標基準となる。既存の断熱部材において、UA 値の低下 (性能向上) とコスト上昇には密接な関係があり、院庄林業住宅で採用している断熱製品を用いた事例では、UA 値 0.87 (断熱材がガラスウール 16K 相当) を 0.6 に低下させる断熱壁構造に変更した場合、坪単価が約 15 万円アップする。しかし、10 年程度の長期的視点において税制優遇措置や高熱費削減などの恩恵も大きく、これを理由に採用する事例は工務店レベルにおいても増加しつつある。CNF を利用した新規部品において、先述したような既存の製品を使用した際のコスト上昇から大きく外れない技術開発が課題になると思われる。

b 施工性

施工性において、今回開発された部品構成素材はいずれも既存製品に比較して同等か軽く、現場におけるサイズ調整 (切削性) も容易であることから施工業者から高い評価を受けており問題はなかった。

c 実感できることの重要性

部材や住宅の性能は数値で表せるものの、消費者には伝わりにくく、税制優遇や光熱費のメリットを測る指標にしかならないため、必ずしも省エネ型住宅購買決定要因になり得ない。このような中ハウスメーカーや大手ビルダーはテストハウスによる性能を体感させる宿泊型展示会等を開催している。院庄林業住宅においても販売した先導型省エネ物件については施主に依頼して温度変化のモニタリング調査を実施しデータを得るだけでなく、新築時にテストハウスとして借上げ、展示会を行い、多くの消費者に住み心地の良さを体感してもらうイベントを重視している。

今回試作した CNF 添加構成素材の特徴として、表面細孔の増加による体感温度特性の向上が、グローブ温度測定結果から示唆されたことから、CNF 活用製品普及において実際のモデル空間における体感型 PR が有効であると考えられる。

③リサイクルに関する調査

ア 熱可塑性樹脂部品

本事業で量産試作した仕様にて、リサイクル性の検証を実施した。通常樹脂製品と同様、樹脂の熱劣化による性能低下は認められたが、本事業開発品は、CNF 補強効果で汎用樹脂より高い特性を有していることから、ウッドデッキ等の WPC 製品に活用できることが確認された。以下には、その詳細を示す。

a 材料

(1)-③-ア-1) の高断熱 WPC フロアにて作製されたホモ PP ベースの CNF 添加高断熱 WPC フロア材を使用した。

b 試験方法

WPC フロア材を粉砕機 (SA-23、シュトルツ) にて粒子サイズ 1-5 mm 程度に粉砕した。粉砕物をニーダー (ラボプラストミル 30R150、東洋精機製作所) により 190 °C、30 rpm にて 10 分間混練し、リサイクルコンパウンドを作製した。このコンパウンドを再度粉砕機で粉砕し、小型射出成形機 (BABYPLAST 6/10P、CRONOPLAST) を用いて、短冊形試験体、ダンベル形試験体に成形した。短冊形試験体は厚さ 3 mm、幅 10 mm、長さ 60 mm とし、成形温度 200 °C、射出圧 50 bar にて作製した。ダンベル形試験体は、平行部の寸法を厚さ 2 mm、幅 5 mm、長さ 15 mm、つかみ部幅 12 mm、全長 60 mm とし、成形温度 200 °C、射出圧 50 bar にて作製した。図 216 に再成形プロセスを示す。

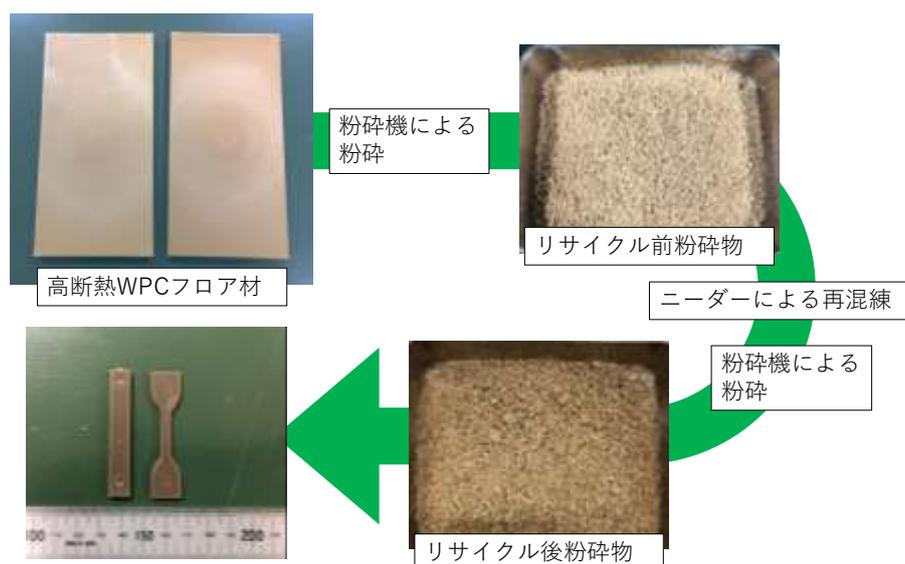


図 216 再成形プロセス

リサイクルコンパウンドの流動性をキャピラリーレオメータ (LCR7000、日本ダイニスコ) により測定した。直径 2 mm、無水マレイン酸変性ポリプロピレン (MAPP) は直径 1mm のダイを使用し、熔融温度 180 °C、試料投入量 9 g、事前熔融時間 300 s とし、せん断速度 100、150、224、334、500 s^{-1} の 5 段階にてせん断粘度を測定した。機械的特性はダンベル形試験体を用いた引張試験、短冊形試験体を用いた曲げ試験および衝撃試験にて評価した。引張試験および曲げ試験は JIS A 5741 に準拠して行った。引張試験は試験速度 50 mm/min、つかみ具間距離 30 mm とし、引張強さを算出した。曲げ試験は試験速度 2 mm/min の中央荷重方式とし、曲げ強さおよび曲げ弾性率を算出した。衝撃試験は JIS K 7110 に準拠したノッチなしアイゾット衝撃試験とし、2 J のハンマー、試験速度 3.5 m/s にて試験体を打撃し、衝撃強度を算出した。これらのリサイクル WPC の特性とリサイクル前の WPC の特性を比較した。図 217 に本試験で使用した試験機を示す。作製した試験体は 20 °C、相対湿度 60% の恒温室に 48 時間静置し、各種試験に供した。

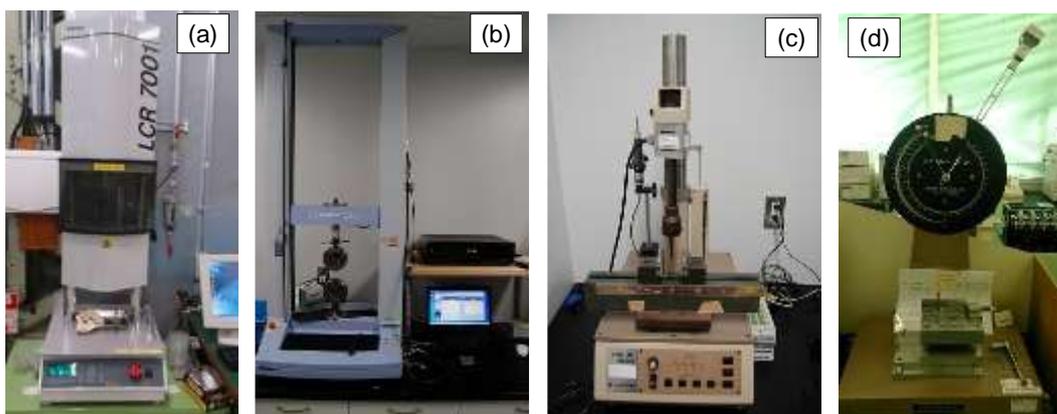


図 217 流動・機械的特性評価機器一覧

(a) キャピラリーレオメータ (b) 引張試験機 (c) 曲げ試験機 (d) 衝撃試験機

c 高断熱 WPC フロアの流動特性

図 218 にリサイクル前後の WPC コンパウンドのせん断速度とせん断粘度の関係を示す。WPC コンパウンドのリサイクル前後の粘度変化は小さかった。そのため、リサイクル後においても流動性は変化しないことが示唆された。

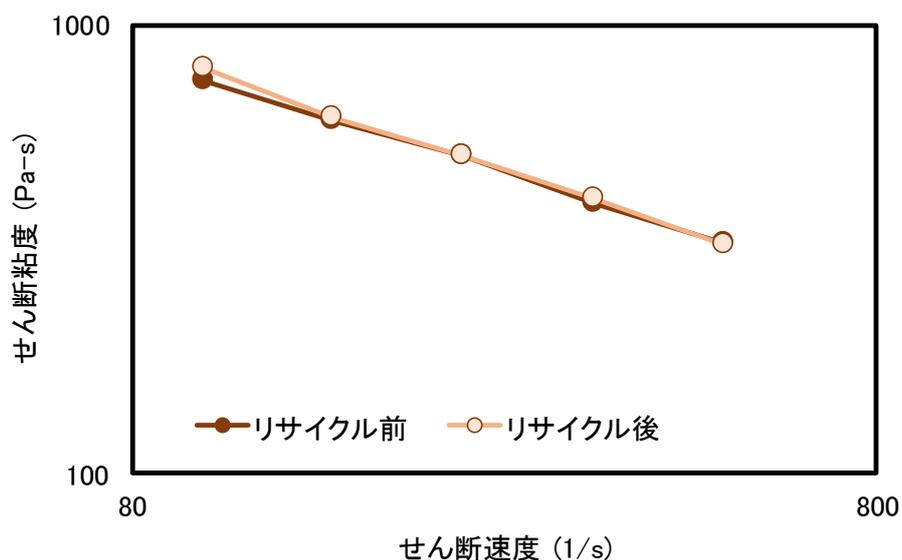


図 218 リサイクル前後の WPC のせん断速度とせん断粘度の関係

d 機械的特性

表 60 にリサイクル前後の WPC の機械的特性の一覧を示す。リサイクル前に対し、リサイクル後の曲げ強さは 95%、曲げ弾性率は 96%、引張強さは 91%、破断伸び率は 97%および衝撃強度は 95%に変化した。これらの特性値の低下はフィラーや樹脂の熱履歴による変性等様々な要因が考えられるが、リサイクル

後においても強度は 90%以上を維持することが確認された。

表 60 リサイクル前後の WPC の機械的特性

	曲げ強さ (MPa)	曲げ弾性率 (GPa)	引張強さ (MPa)	破断伸び率 (%)	衝撃強度 (kJ/m ²)
リサイクル前	67.8	2.89	42.1	7.4	24.3
リサイクル後	64.0	2.76	38.3	7.2	23.4
変化率* (%)	0.95	0.96	0.91	0.97	0.96

*リサイクル後の特性値/リサイクル前の特性値

イ 熱硬化性樹脂部品

ウレタンのリサイクルに関しては、いくつか手法が提案されていることから、これら既存手法を活用したい。そのために重要なポイントは、減容化 (=粉砕) となる。そこで、本事業では、CNF 添加による粉砕特性の評価を行った。粉砕後のウレタンは CNF を含むことで粒度の低下やかさ密度の増加が見られ、粉砕時間が減少する傾向にあった。そのため、CNF の添加はリサイクル性を向上させることが期待される。以下に、その詳細を示す。

a 材料

(1)-③-ア-2) の CNF 添加高断熱ウレタンボードにて作製したウレタンボードを用いてリサイクル性の検証を行った。

b 試験方法

図 219 に CNF 添加ウレタンボードの粉砕工程を示す。粉砕機にてウレタンボードを粗粉砕し、その後ローターミルにより、微粉砕を行い、微粉砕ウレタン粉を作製した。

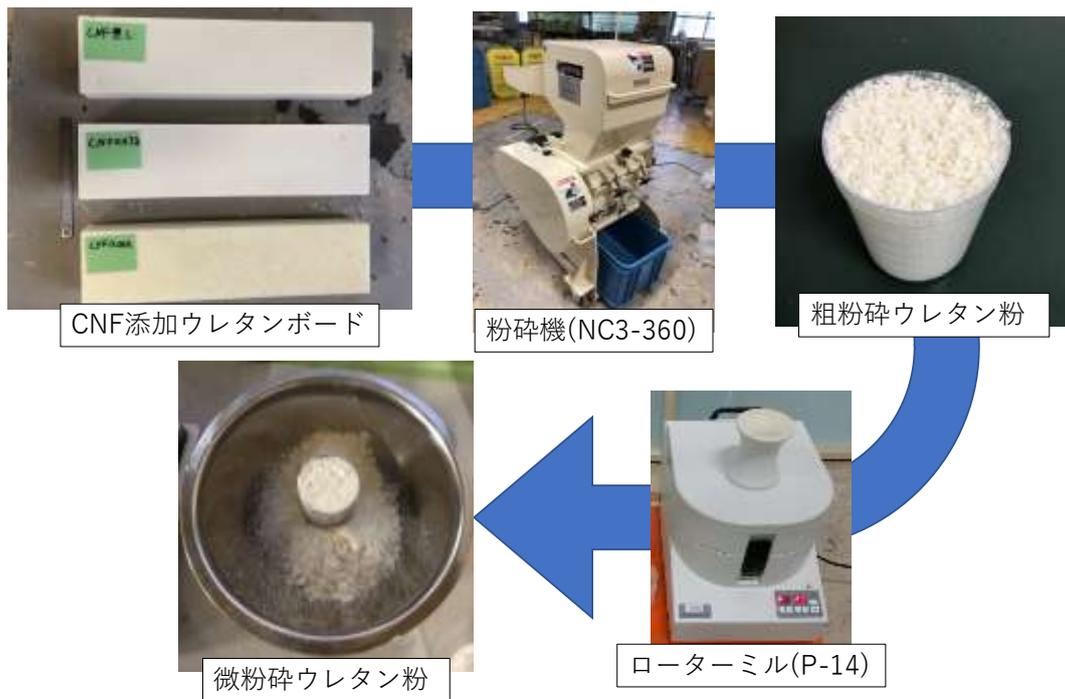


図 219 ウレタンボードの粉碎工程

容量 200 ml のステンレス容器に微粉碎ウレタン粉を充填し、その重量を測ることにかさ比重を算出した。図 220 にかさ比重測定風景を示す。



図 220 かさ比重測定風景

微粉碎ウレタン粉の粒度分布をレーザー回折・散乱式粒子径分布測定装置

(Partica LA-950v2、堀場製作所) により解析した。図 221 に粒度分布測定装置を示す。



図 221 レーザー回折・散乱式粒子径分布測定装置

また、走査型 SEM (SEM) (JSM-6510LV2、日本電子) を用いて、加速電圧 15kV、高真空雰囲気下で引張試験後の試験体破断面を観察した。なお、電子の帯電を防止するため、オートファインコーター (JEC-3000FC、日本電子) を用いて表面の白金コーティングを行った。図 222 に使用した SEM の図を示す。



図 222 走査型 SEM (SEM)

c 粉砕時間

表 61 にウレタンボードの粉砕に要した時間を示す。粉砕機による粗粉砕では CNF の有無によらず、約 1 分で粉砕が可能であった。一方、ローターミルを用いた微粉砕は、CNF 未添加および CNF0.003% では約 40 分、CNF0.006% では約 30 分となり、CNF の添加量が多い条件では粉砕が容易であった。

表 61 ウレタンボードの粉砕時間

CNF 添加率 (wt%)	粉砕重量 (g)	粉砕時間 (分)	
		粗粉砕	微粉砕
0	159.4	60	2400
0.003	159.2	50	2340
0.006	159.0	60	1800

d かさ比重

図 223 に微粉砕ウレタン粉のかさ比重を示す。CNF 添加量が増加するほどかさ比重は高い値を示した。軽量かつ多孔質なウレタン粉においては、比重の増加は粉砕性の向上につながるため、粉砕時間が減少したと考えられる。

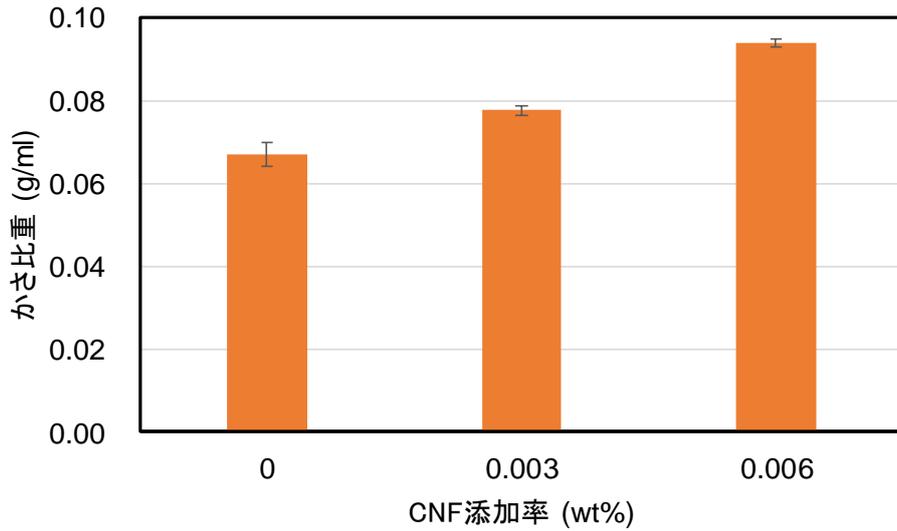


図 223 微粉砕ウレタン粉のかさ比重

e 粒度分布

図 224 に微粉砕ウレタン粉の粒度分布を示す。CNF を添加したウレタン粉は CNF 未添加の条件と比較し、粒度が減少した。より小径に粉砕されたことで、かさ比重の低下が生じたことが示唆された。

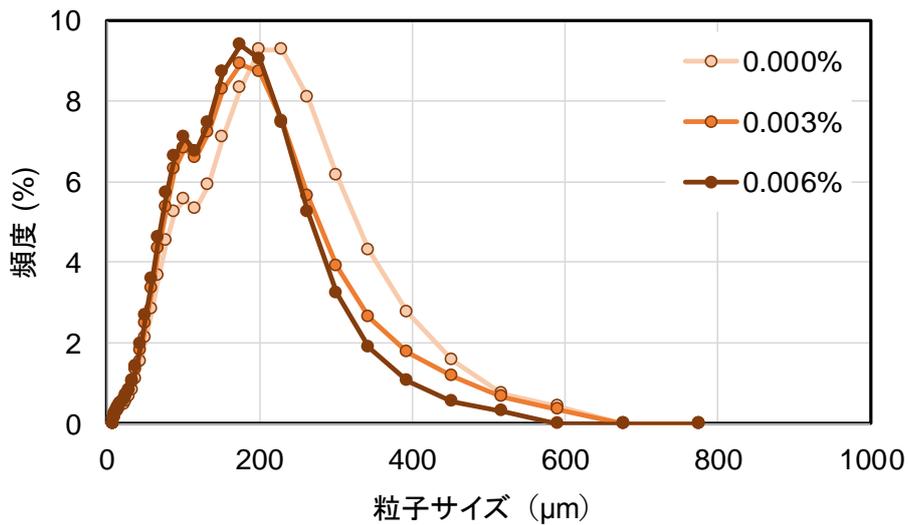


図 224 微粉砕ウレタン粉の粒度分布

f SEM 観察

図 225 に微粉砕ウレタン粉の SEM 画像を示す。ウレタン粉の形状は CNF の添加の有無にかかわらず、扁平でブロック状となった。粒子サイズの変化やか

さ比重の増加は確認できたが、CNF の添加による形状の違いは明確に確認できなかった。

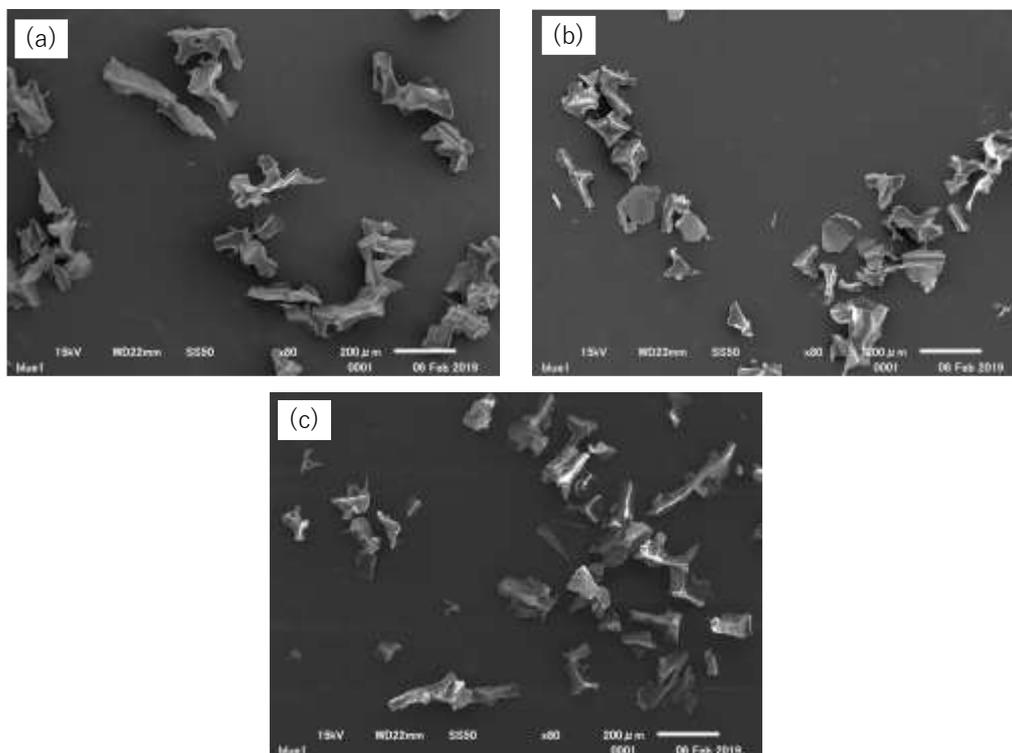


図 225 微粉碎ウレタン粉の SEM 画像
(a) CNF0 wt% (b) CNF0.003 wt% (c) CNF0.006 wt%

g 半炭化燃料としての評価

CNF 添加ウレタンボード廃材は、マテリアルリサイクルだけではなく、サーマルリサイクルに供することも考えられる。そこで、これらを半炭化燃料としたときの高位発熱量を測定した。

図 226 に、半炭化 (300°C-400°C) における各種バイオマスの高位発熱量の測定結果を示す。これより、高位発熱量は炭化温度が高くなるにつれて、大きくなるのがわかる。特に、竹粉末は、350°Cの炭化温度で、最大の高位発熱量を有し、それが石炭の高位発熱量に匹敵していることがわかる。



図 226 各種バイオマス粉末の半炭化後における高位発熱量の変化

図 227 に、竹粉にポリウレタン+セルロースを添加したときの高位発熱量の測定結果を示す。竹：ポリウレタン+セルロースを 10:90、30:70、50:50 とした。ポリウレタン+セルロース中のセルロース含有量は 10%とした。まず、半炭化前の原料をみていくと、竹のみに比べて、ウレタン+セルロースの量が増えるほど高位発熱量は増加し、竹 50%のときに最大となっており、石炭の高位発熱量に匹敵する固体燃料になっていることがわかる。竹のみの高位発熱量が低いことから、半炭化前の混合濃度によって、高位発熱量が最大となる条件が存在することがわかった。さらに、半炭化を行うと、竹：ウレタン：セルロース=30：63：7 のとき、石炭の高位発熱量を超える燃料が製造できることがわかった。

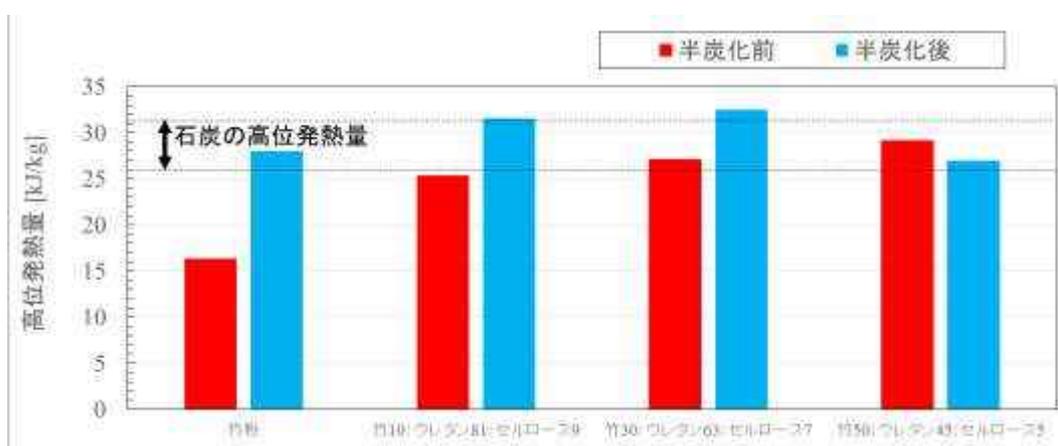


図 227 竹粉+ウレタン+セルロースの半炭化後における高位発熱量の変化

ウ 無機素材

本事業開発品は、焼成していない、即ち、固くない素材である点がポイントである。そこで、素材特性を活かし、微粉化することで、プラスチックのフィラーへの活用を検証した。汎用の無機フィラーである炭酸カルシウムと同程度の曲げ、引張強さを示した。また、同コンソーシアムで行った平成 30 年度環境省委託業務“平成 30 年度セルロースナノファイバーリサイクルの性能評価等事業委託業務”により試作した酸変性 CNF 廃材樹脂の添加することで、汎用の無機フィラーよりも曲げ、引張強さの向上が認められた。以下には、その詳細を示す。

a 材料

項目(1)-①-ア-3)にて作製された CNF 添加高断熱無機ボードを粉砕した無機ボード粉をフィラーとし、マトリックス樹脂としてホモポリプロピレン (J107G、プライムポリマー) を用いた。さらに比較用に汎用フィラーである炭酸カルシウムを用いた。また、フィラーと PP 間の界面を改善するため、平成 30 年度環境省委託業務“平成 30 年度セルロースナノファイバーリサイクルの性能評価等事業委託業務”で作製した CNF 廃材を利用した酸変性樹脂を添加した。この事業は同コンソーシアムが筆頭の事業であるため、単一事業を超えた横断的な検証を行った。

b 検証方法

図 228 に内装無機ボードの粉砕手順を示す。内装無機ボードをハンマーで適正サイズに粉砕したのち、ボールミルを用いてさらに微粉砕化した。ボールミルの粉砕条件は回転速度 320 rpm、粉砕時間 10 分とした。粉砕した無機ボード粉の粒度分布を確認し、比較に用いた炭酸カルシウムと粒子サイズを比較した。粒度分布測定にはイ-b の粒度分布測定と同様にした。

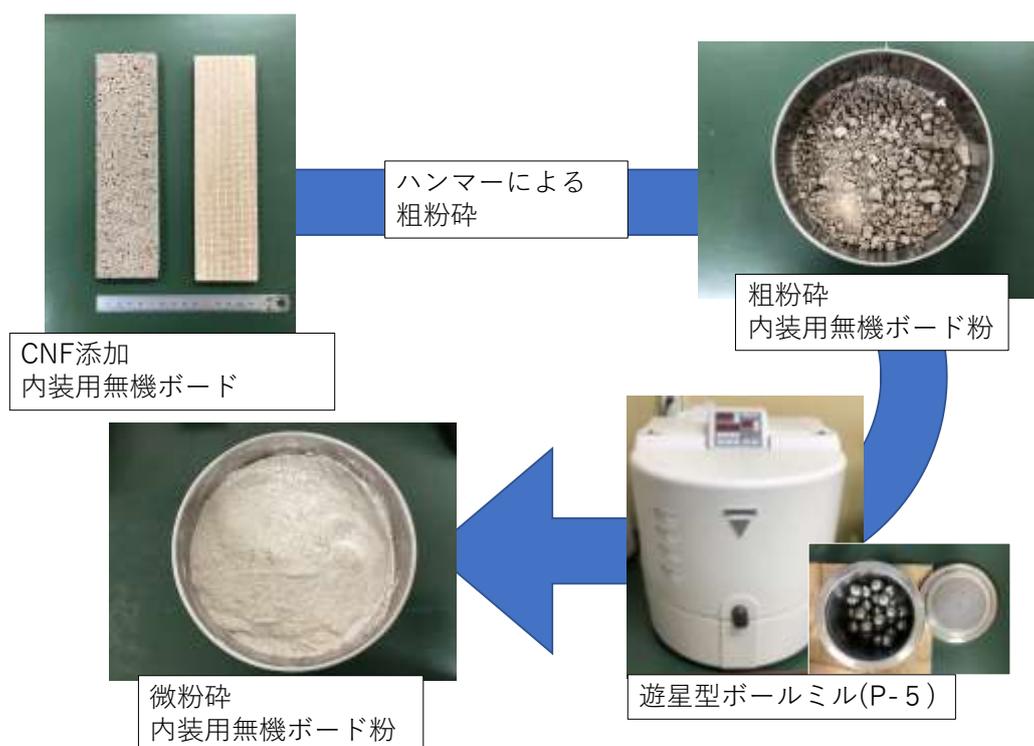


図 228 内装無機ボードの粉碎手順

無機ボード粉は 20、25、30 wt% の 3 条件に設定し、PP とともに容量 500 ml のニーダーにて 13 分間溶融混練し、コンパウンドを作製した。作製したコンパウンドを粉碎機で粉碎し、粉碎物を小型射出成形機にて短冊形、ダンベル形試験体に成形した。同様の手順で炭酸カルシウムをフィラーとした複合材料を作製した。酸変性樹脂の効果は無機ボード粉 25 wt% の条件で検討した。表 62 に PP 複合材料の配合条件を示す。短冊形試験体は厚さ 3 mm、幅 10 mm、長さ 60 mm とし、ダンベル形試験体は、平行部の寸法を厚さ 2 mm、幅 5 mm、長さ 15 mm、つかみ部幅 12 mm、全長 60 mm とした。作製した試験体は 20 °C、相対湿度 60% の恒温室に 48 時間静置し、各種試験に供した。

表 62 PP 複合材料の配合条件

No.	配合比 (wt%)			
	無機ボード粉	炭酸カルシウム	PP (J107G)	酸変性樹脂
1	20	-	80	-
2	25	-	75	-
3	30	-	70	-
4	-	20	80	-
5	-	25	75	-
6	-	30	70	-
7	25	-	73	2

項目ア-b 高断熱 WPC フロア再成形材料の流動・機械的特性評価と同様の手法を用いて、せん断粘度、引張強さ、曲げ強さ、曲げ弾性率および衝撃強さを算出した。

c 無機ボード粉の粒度分布

図 229 に粉砕した無機ボード粉と炭酸カルシウムの粒度分布を示す。無機ボード粉は 0.445、22.793 μm に粒子サイズのピークが見られ、平均粒子サイズ 30 μm 程度のフィラーとなった。比較検討用に用いた炭酸カルシウムは 0.259、8.816、200 μm に粒子サイズのピークが見られ、平均粒子サイズは 10 μm 程度となった。無機ボード粉の平均粒子サイズは炭酸カルシウムよりも小さいが、一般的に混練型 WPC に用いられるフィラーサイズ (100-300 μm) よりも小さいことから、十分にフィラーとして使用可能と判断できる。

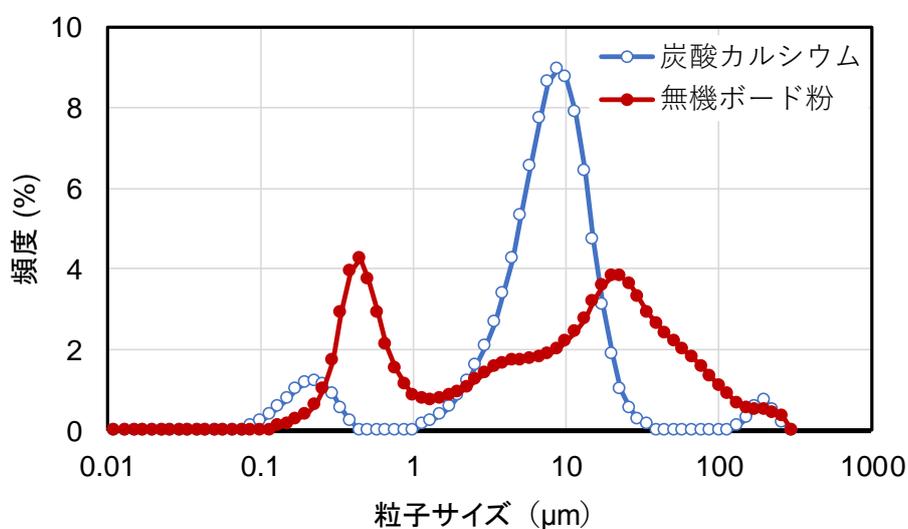


図 229 無機ボード粉と炭酸カルシウムの粒度分布

d PP 複合材料の流動特性

図 230 に PP 複合材料のせん断速度とせん断粘度の関係を示す。25 wt%のフィラー量において、無機ボード粉を用いた複合材料の粘度は炭酸カルシウムよりも粘度が増加する結果となったが、酸変性 CNF 廃材樹脂を加えることで、改善された。また、25 wt%以外の添加率ではすべての条件で粘度は同程度であった。よって、無機ボードをリサイクルしたフィラーは汎用フィラーと同等の流動性が得られることが示唆された。

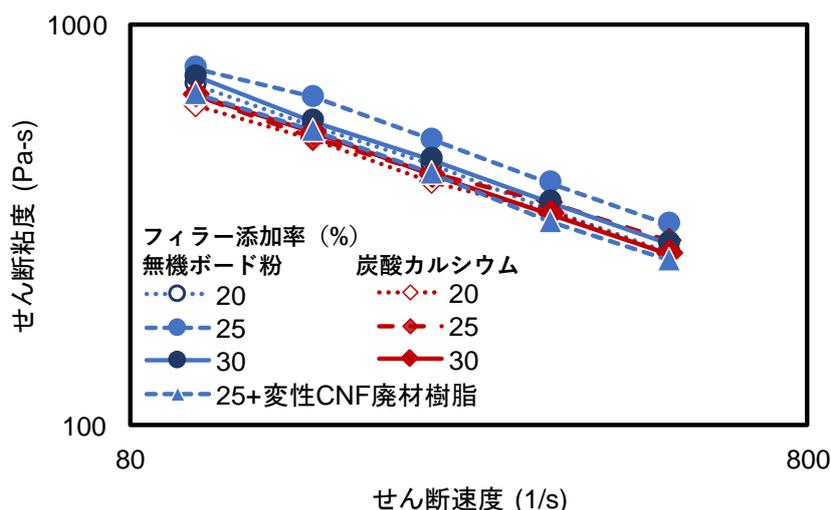


図 230 PP 複合材料のせん断速度とせん断粘度の関係

e PP 複合材料の機械的特性

図 231 に PP 複合材料の引張強さを示す。無機ボード粉を用いた複合材料は炭酸カルシウムを用いた複合材料と同程度の引張強さとなった。また、フィラー量が増加するほど引張強さは低下した。よって、リサイクル無機ボード粉を用いた PP 複合材料は、汎用フィラーを用いた複合材料と同等の引張強さ、同様の傾向を示すことが分かった。また、酸変性 CNF 廃材樹脂を使用した条件では、引張強さは大きく向上した。

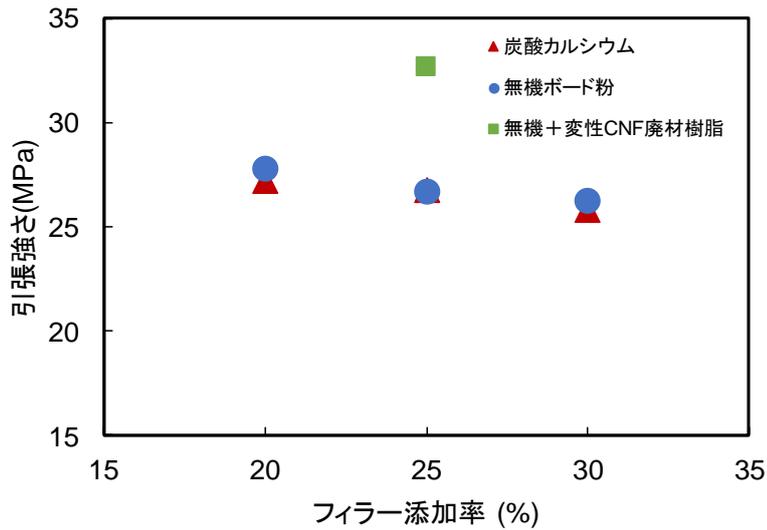


図 231 PP 複合材料の引張強さ

図 232 に PP 複合材料の曲げ強さと曲げ弾性率を示す。無機ボード粉を用いた複合材料は炭酸カルシウムを用いた複合材料と同程度の強度、弾性率となった。フィラー量が増加するほど曲げ強度は低下し、曲げ弾性率は向上する結果となった。その際、フィラー量の増加による強度、弾性率の向上は無機ボード粉のほうが炭酸カルシウムよりも大きかった。また、酸変性 CNF 廃材樹脂を使用した条件では、曲げ強さは大きく向上し、弾性率についても向上が見られた。この傾向は引張強さと同様であった。

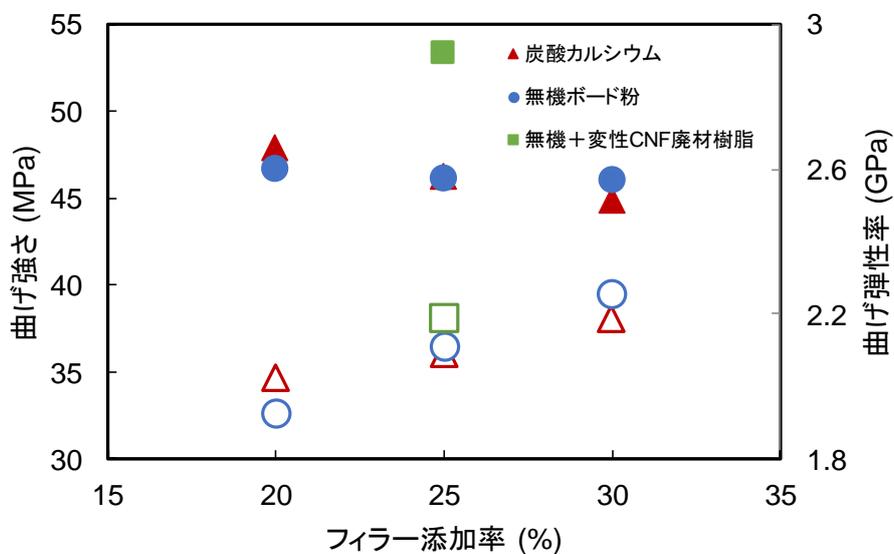


図 232 PP 複合材料の曲げ強さと曲げ弾性率

図 233 に PP 複合材料の衝撃強度を示す。衝撃強度は炭酸カルシウムのほうが無機ボード粉を用いた複合材料よりも明らかに高い強度であった。また、フィラー量が増加するほど強度は低下する傾向にあった。ノッチなしの衝撃強度は大きな粒子サイズのフィラーが増えるほど、フィラー量が増加するほど強度が減少する傾向にあるため、妥当な結果と考えられる。また、他の強度特性と異なり、酸変性 CNF 廃材樹脂の使用による強度向上はみられなかった。CNF 廃材樹脂にはフィラーとして用いた CNF が含まれているため、全体のフィラー量は増加している。そのため、フィラー量の増加による強度低下により、酸変性樹脂による強度向上が相殺された可能性がある。

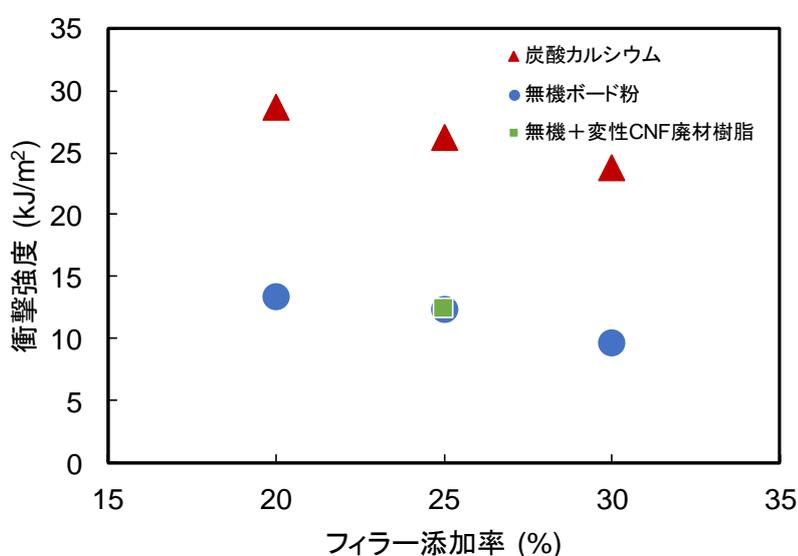


図 233 PP 複合材料の衝撃強度

酸変性 CNF 廃材樹脂を使用した際には、引張、曲げ特性の向上が見られ、衝撃強度についても全体のフィラー量が増えていることを考えると、強度は向上していることが示唆される。よって、“平成 30 年度セルロースナノファイバーリサイクルの性能評価等事業委託業務”により試作した酸変性 CNF 廃材樹脂の添加が、複合材料の機械的特性向上に効果的であることが本事業においても立証された。

④CO₂削減効果の検証

各種部品の試作を通じて得られた実測データをもとに CNF を利用した部材による高断熱化住宅の CO₂ 排出量評価を行った。計算の結果、既存品を用いた住

宅では年間1戸あたり5,310kgであったのに対し、開発品では5,000kgと、年間310kgのCO₂削減効果があることが明らかとなった。以下にその詳細を示す。

A LCA 評価

a 評価範囲および条件

図234に住宅のライフサイクルフロー図を示す。本評価では、試作した開発部品を用いた住宅と、既存品を用いた住宅のライフサイクルにおけるCO₂排出量を各段階、部品ごとに比較した。段階としては、外皮となる外壁、床、天井の原材料調達および製造段階、施工後の使用段階、廃棄輸送および廃棄処理段階を対象とした。なお施工段階はデータの取得が困難なため対象外とした。

機能単位は、外壁・床・天井から構成される住宅1戸、使用期間22年とした。既存品のクロスおよびフロア合板は、使用期間内に1回の交換が必要であるが、その他の部品は、軽微なメンテナンスのみで使用可能とした。

使用段階については、開発品、既存品をそれぞれ用いたモデル住宅におけるエネルギー消費量実測値を使用した。一般地として全国6地域の平均データと寒冷地として4地域の平均データを用いた。エネルギー消費量は、家庭における暖房器具ごとのエネルギー消費割合データ(資源エネルギー庁)により、対応するエネルギー種に振り分けて、評価を行った。

廃棄輸送段階は、開発品、既存品の各重量と、4トントラック平均積載量による50kmの輸送距離と設定した。

廃棄処理段階は、建築物の現場解体の負荷、建築廃棄物の破碎選別の負荷に加え、木くずとしての産廃処理負荷を、開発品、既存品の各重量により積み上げた。また、プラスチック材料の燃焼によるCO₂排出は、廃プラスチックの焼却処理サービス原単位により計上した。

なお、原材料の投入量は、完成品における部材重量比により算出し、製造ロスは考慮していない。また、対象工程から副製品はないとした。

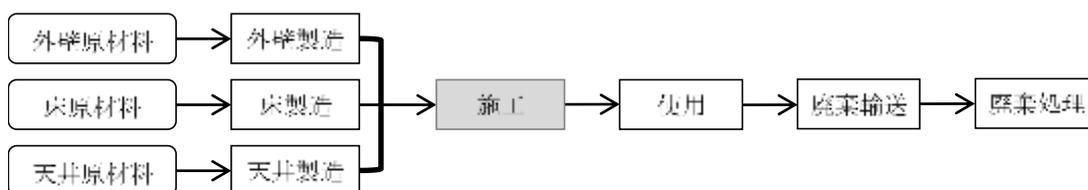


図234 CNF を利用した住宅のライフサイクルフロー

b CO₂ 排出量原単位

バックグラウンドデータとして、CO₂ 排出量原単位データベース IDEAv2.2 (産業技術総合研究所、産業環境管理協会) を使用した。地球温暖化係数としては、IPCC2013、GWP100 年係数を用い、各種温暖化ガスの影響を CO₂ 換算した GHG 排出量により評価した。なお、本報告書では、算出した GHG 排出量を「CO₂ 排出量」と記述する。

使用した原単位は、以下の通りである。

MDF

インシュレーションボード

EP 樹脂

ガラス長繊維・同製品

ガラス短繊維・同製品

けい砂

軽質炭酸カルシウム

シリカゲル

特殊合板

トリレンジイソシアネート

電力、一般電気事業者 10 社平均、2015 年度

普通合板

ポリオール

ポリプロピレン

木材チップ

塩化ビニル樹脂

焼却処理サービス、産業廃棄物、廃プラスチック

石こうボード・同製品

他に分類されない有機化学工業製品

廃棄・建築物現場解体サービス

廃棄・建築物混合廃棄物破碎選別サービス

c 原材料調達および製造段階における CO₂ 排出量の比較

表 63-65、図 235～236 に、原材料調達および部品製造に係る CO₂ 排出量評価結果を示す。開発品の部材のうち最も CO₂ 排出量が多いのは CNF 添加無焼成セラミックで、原材料のシリカ、および製造段階の混合プロセスの影響が大きいことがわかった。ただし、既存品の石膏ボードと比較すると 2/3 程度であり、またクロスの負荷が削減されるため、外壁全体の負荷は減少する結果となった。

また、天井の CNF 添加 FRP と化粧合板の負荷は、既存品の化粧合板と比較し

て低く、また、床の CNF 添加ウレタンボードは既存品の合板と比較して、CNF 添加セルローズ系断熱材は既存品のセルローズ系断熱材と比較して、いずれも CO₂ 排出量は減少した。

一方で、CNF 添加グラスウール、および CNF 添加発泡 WPC は、既存品のグラスウール、およびフロア合板と比較してそれぞれ 1.4 倍、2.3 倍、と CO₂ 排出量は増加する結果となった。グラスウールの場合は、1kg あたりの負荷は減少しているが、部材の密度が変わったために使用量が増加したことが影響している。CNF 添加発泡 WPC の場合は、PP の負荷、および WPC 成形エネルギーの負荷が影響しているが、CO₂ 排出量の増加は、WPC の厚みが合板フローリングと比べて厚いために使用量が増加していることが要因となっている。これらの影響で、天井と床については、CO₂ 排出量が増加する結果となった。

表 63 開発品の原材料調達による CO₂ 排出量評価結果

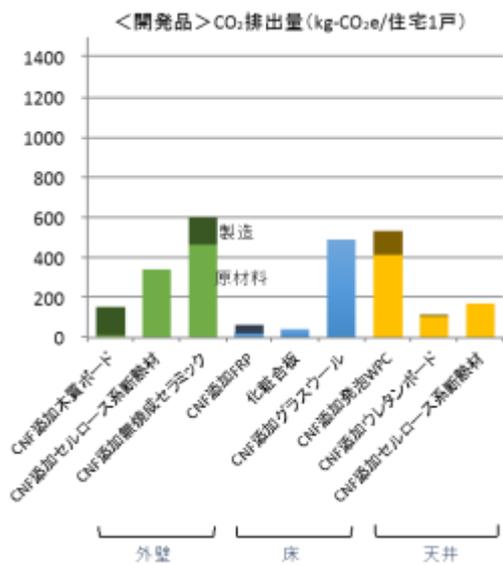
部品	部素材	原材料	投入量 (kg) (1kg 作成あたり)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e/kg)	モデル住宅 換算重量 (t)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e/1 戸)
外壁	CNF 添加木質ボード	木繊維	0.85	0.05		
		CNF	0.15	0.04		
		計	1	0.09	0.13	11.75
	CNF 添加セルローズ系断熱材	インシュレーションボード	0.90	0.88		
		CNF	0.10	0.03		
		計	1	0.90	0.38	339.52
	CNF 添加無焼成セラミック	シリカ	0.34	0.57		
		石英粉	0.43	0.01		
		炭酸カルシウム	0.22	0.19		
		CNF	0.01	0.00		
		計	1	0.77	0.60	461.07
	計			1.77		812.34
	天井	CNF 添加 FRP	ガラス不織布	0.35	0.97	
CNF			0.10	0.03		
EP			0.55	3.33		
計			1	4.33	0.01	22.53
化粧合板		化粧合板	1.00	0.44		
			1	0.44	0.09	41.44
CNF 添加グラスウール		グラスウール 16K	0.99	2.75		
		CNF	0.01	0.00		
		計	1	2.75	0.18	488.81
計				7.52		552.77
床	CNF 添加発泡 WPC	WPC コンパウンド	0.43	0.47		
		PP	0.57	1.09		
		計	1	1.56	0.31	483.96
	CNF 添加ウレタンボード	CNF 添加ポリオール	0.34	1.72		
		イソシアネート	0.51	1.73		
		難燃剤	0.07	0.13		
		発泡剤	0.09	0.18		
		計	1	3.76	0.03	102.66
	CNF 添加セルローズ系断熱材	インシュレーションボード	0.90	0.88		
		CNF	0.10	0.03		
		計	1	0.90	0.19	168.62
	計			6.22		755.24

表 64 開発品の部品製造における CO₂ 排出量評価結果

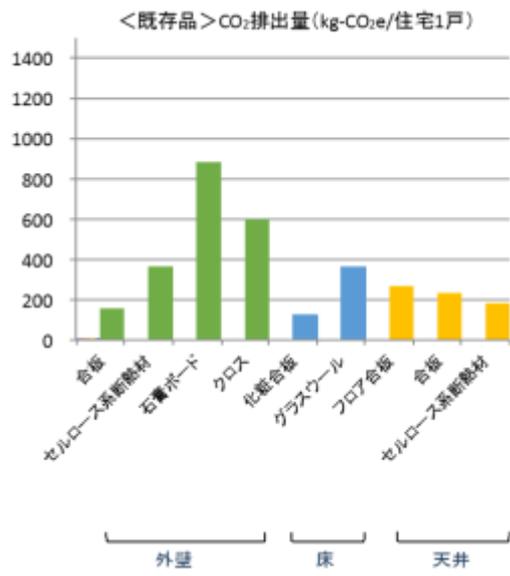
部品	部素材	原材料	投入量 (kWh) (1kg 作成あたり)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e/kg)	モデル住宅 換算重量 (t)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e/1 戸)
外壁	CNF 添加木質ボード	混合	0.02	0.01		
		ボード成形	1.83	1.06		
		加工	0.09	0.05		
		計		1.12	0.13	140.39
	CNF 添加無焼成セラミック	混合	0.24	0.14		
		混練	0.01	0.00		
		鑄込成形	0.00	0.00		
		固化	0.02	0.01		
		乾燥	0.13	0.08		
		計		0.23	0.60	140.29
計			1.36		280.69	
天井	CNF 添加 FRP	含浸	0.02	0.01		
		プリプレグ化	0.42	0.25		
		FRP 化	5.07	2.94		
		計		3.20	0.01	16.64
床	CNF 添加発泡 WPC	WPC 成形	0.65	0.38		
		計		0.38	0.31	117.06
	CNF 添加ウレタンボード	成形	0.02	0.01		
			0.04	0.02		
		計		0.04	0.03	0.98
計			0.41		118.04	

表 65 既存品の原材料調達および部品製造による CO₂ 排出量評価結果

部品	部素材	原材料	投入量 (kg) (1kg 作成あたり)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e/kg)	モデル住宅 換算重量 (t)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e/1 戸)
外壁	合板	合板	1	0.44		
		計	1	0.44	0.35	155.48
	セルロース系断熱材	インシュレーションボード	1	0.97		
		計	1	0.97	0.38	365.78
	石膏ボード	石膏ボード	1	0.65		
		計	1	0.65	1.35	880.42
	クロス	塩化ビニル壁紙	1	3.43		
		計	1	3.43	0.18	600.08
計			5.50		2001.76	
天井	化粧合板	化粧合板	1	0.97		
		計	1	0.97	0.12	120.65
	グラスウール	グラスウール 10K	1	3.25		
		計	1	3.25	0.11	361.08
計			4.22		481.72	
床	フロア合板	合板フローリング	1	1.28		
		計	1	1.28	0.21	267.12
	合板	合板	1	0.44		
		計	1	0.44	0.52	231.65
	セルロース系断熱材	インシュレーションボード	1	0.97		
		計	1	0.97	0.19	181.66
計			2.70		680.44	



(a)



(b)

図 235 外皮部材ごとの CO₂ 排出量評価 (a) 開発品 (b) 既存品

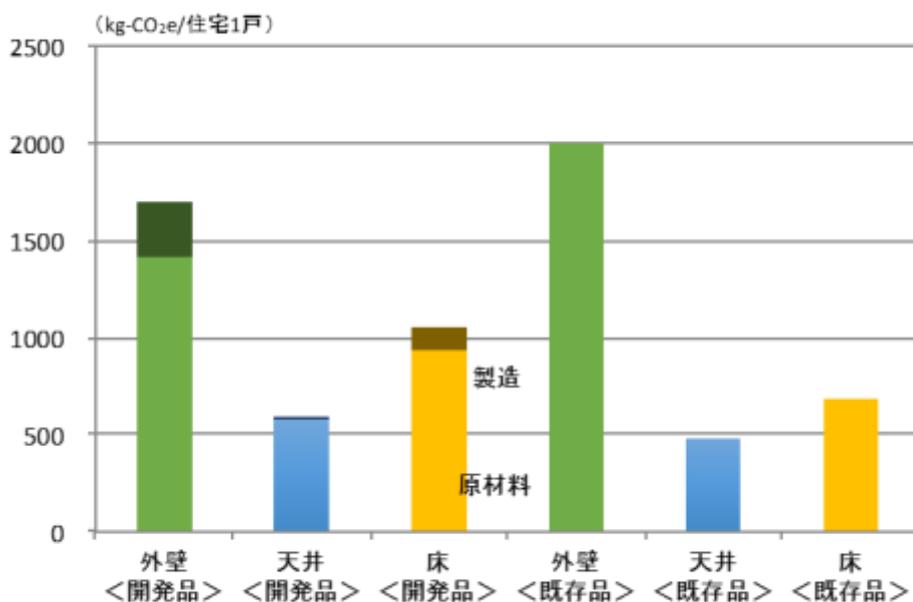


図 236 各部品の原材料調達および製造における CO₂ 排出量

d 使用段階における CO₂ 排出量の比較

表 66、67 に、開発品、および既存品の寒冷地 4 地域における使用段階の CO₂ 排出量評価結果を、また表 68 には、両者の差分を示した。一次エネルギーの差は、住宅 1 戸、1 年間で 2,000MJ であり、暖房器具のエネルギー消費割合の統計値から各燃料の使用量に振り分けて評価すると、開発品は既存品と比較して 224kg の CO₂ 削減が見込まれることが分かった。

表 66 4 地域における使用段階の CO₂ 排出量評価結果【開発品】

●開発品 (4 地域)	暖冷房関連 エネルギー 消費割合	機器別 一次エネルギー (MJ)	燃料	燃料別 一次エネルギー (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e)
石油ファンヒーター	30.1%	12912	灯油	24157.28	1857.29
石油ストーブ	26.2%	11246	灯油		
エアコン	17.0%	7289	電気	18117.96	2918.59
電気カーペット	4.9%	2083	電気		
その他	20.4%	8747	電気		
ガスストーブ	1.5%	625	ガス	624.76	39.21
暖房合計	100.0%	42900		42900	4815.09

表 67 4 地域における使用段階の CO₂ 排出量評価結果【既存品】

●既存品 (4 地域)	暖冷房関連 エネルギー 消費割合	機器別 一次エネルギー (MJ)	燃料	燃料別 一次エネルギー (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e)
石油ファンヒーター	30.1%	13514	灯油	25283.50	1943.88
石油ストーブ	26.2%	11770	灯油		
エアコン	17.0%	7629	電気	18962.62	3054.66
電気カーペット	4.9%	2180	電気		
その他	20.4%	9154	電気		
ガスストーブ	1.5%	654	ガス	653.88	41.04
暖房合計	100.0%	44900		44900.00	5039.57

表 68 4 地域における使用段階の CO₂ 排出量評価結果【削減量】

●削減量 (4 地域)	暖冷房関連 エネルギー 消費割合	機器別 一次エネルギー (MJ)	燃料	燃料別 一次エネルギー (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e)
石油ファンヒーター	30.1%	602	灯油	1126.21	86.59
石油ストーブ	26.2%	524	灯油		
エアコン	17.0%	340	電気	844.66	136.07
電気カーペット	4.9%	97	電気		
その他	20.4%	408	電気		
ガスストーブ	1.5%	29	ガス	29.13	1.83
暖房合計	100.0%	2000		2000.00	224.48

表 69、70 に、開発品、および既存品の一般 6 地域における使用段階の CO₂ 排出量評価結果を、また表 71 には、両者の差分を示した。一次エネルギーの差は、住宅 1 戸、1 年間で 700MJ であり、暖房器具のエネルギー消費割合の統計値から各燃料の使用量に振り分けて評価すると、開発品は既存品と比較して 79kg の CO₂ 削減が見込まれることが分かった。

表 69 一般 6 地域における使用段階の CO₂ 排出量評価結果【開発品】

●開発品 (6 地域)	暖冷房関連 エネルギー 消費割合	機器別 一次エネルギー (MJ)	燃料	燃料別 一次エネルギ ー (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e)
石油ファンヒーター	30.1%	5929	灯油	11093.20	852.88
石油ストーブ	26.2%	5164	灯油		
エアコン	17.0%	3347	電気	8319.90	1340.24
電気カーペット	4.9%	956	電気		
その他	20.4%	4017	電気		
ガスストーブ	1.5%	287	ガス	286.89	18.00
暖房合計	100.0%	19700		19700.00	2211.13

表 70 一般 6 地域における使用段階の CO₂ 排出量評価結果【既存品】

●既存品 (6 地域)	暖冷房関連 エネルギー 消費割合	機器別 一次エネルギー (MJ)	燃料	燃料別 一次エネルギ ー (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e)
石油ファンヒーター	30.1%	6140	灯油	11487.38	883.19
石油ストーブ	26.2%	5348	灯油		
エアコン	17.0%	3466	電気	8615.53	1387.86
電気カーペット	4.9%	990	電気		
その他	20.4%	4159	電気		
ガスストーブ	1.5%	297	ガス	297.09	18.64
暖房合計	100.0%	20400		20400.00	2289.70

表 71 一般 6 地域における使用段階の CO₂ 排出量評価結果【削減量】

●削減量 (6 地域)	暖冷房関連 エネルギー 消費割合	機器別 一次エネルギー (MJ)	燃料	燃料別 一次エネルギー (MJ)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e)
石油ファンヒーター	30.1%	211	灯油	394.17	30.31
石油ストーブ	26.2%	183	灯油		
エアコン	17.0%	119	電気	295.63	47.62
電気カーペット	4.9%	34	電気		
その他	20.4%	143	電気		
ガスのストーブ	1.5%	10	ガス	10.19	0.64
暖房合計	100.0%	700		700.00	78.57

e 廃棄輸送および処理における CO₂ 排出量の比較

表 72 に、廃棄輸送における開発品および既存品の CO₂ 排出量評価結果を示した。開発品は 1 戸あたりの全体の重量が既存品と比較して 59%まで減少しているため、輸送の負荷も同等の削減となっている。

表 72 廃棄輸送の CO₂ 排出量評価結果

	使用量 (kg/住宅1戸あたり)	輸送距離 (km)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ e)
開発品	1902	50	28.10
既存品	3228	50	47.68

表 73、および図 237 には、廃棄輸送から解体、処理までの CO₂ 排出量評価結果を示した。全体の中では、解体、および廃プラスチックの焼却処理の負荷が大きい。解体の負荷は、床面積あたりで評価しているため、既存品と開発品で差は現れていない。一方で廃棄処理の負荷は重量あたりの評価であるため、開発品は既存品よりも CO₂ 排出量が減少する結果となった。廃プラの焼却処理では、廃プラの使用量が開発品でやや増加しているため、CO₂ 排出量も増加したが、廃棄輸送および廃棄処理のトータルでは、やや開発品が低い結果となった。

表 73 廃棄処理における CO₂ 排出量評価結果 (kg-CO₂e/住宅 1 戸)

	輸送	解体	破碎選別	処理 (外壁)	処理 (天井)	処理 (床)	合計	廃プラ 焼却処理
開発品	28.10	777.22	37.16	38.26	9.59	18.19	908.52	619.46
既存品	47.68	777.22	63.06	78.11	8.17	31.81	1006.05	446.02

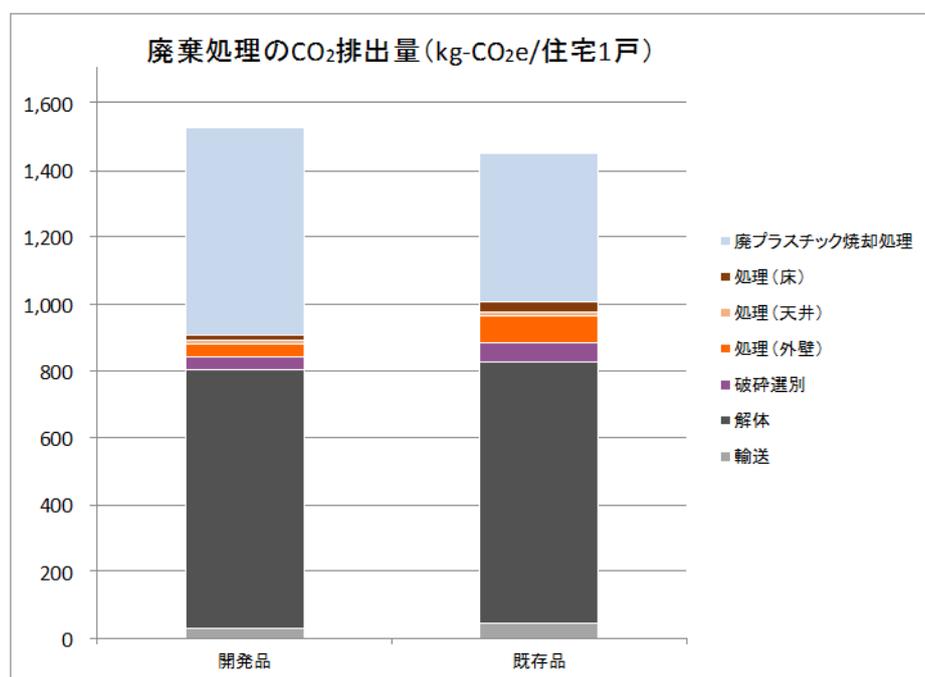


図 237 廃棄輸送段階および廃棄処理段階の CO₂ 排出量評価結果

f 住宅 1 戸、1 年あたりの CO₂ 排出量の比較

図 238 に、開発品と既存品の、外皮の原材料調達、製造、使用、交換、廃棄輸送、廃棄処理、廃プラスチック焼却処理の 1 戸、1 年あたりの CO₂ 排出量を示した。住宅 1 戸、1 年あたりで見ると、開発品は、既存品より 310 (kg-CO₂e/住宅 1 戸、1 年) の削減となった。使用段階は全体の 96% (開発品の場合) を占め、使用段階のみでは、開発品は既存品より 224 (kg-CO₂e/住宅 1 戸、1 年) の削減となった。

使用段階以外で、住宅 1 戸、1 年あたりの CO₂ 排出量を見ると (図 239)、外皮部材の原材料調達および製造段階、廃棄処理段階で CO₂ 排出量の削減が見られた。また既存品では使用期間中にクロスとフロア合板の交換が必要であるが、開発品では交換の必要な部品がないため、その分の削減も見込まれることが分かった。

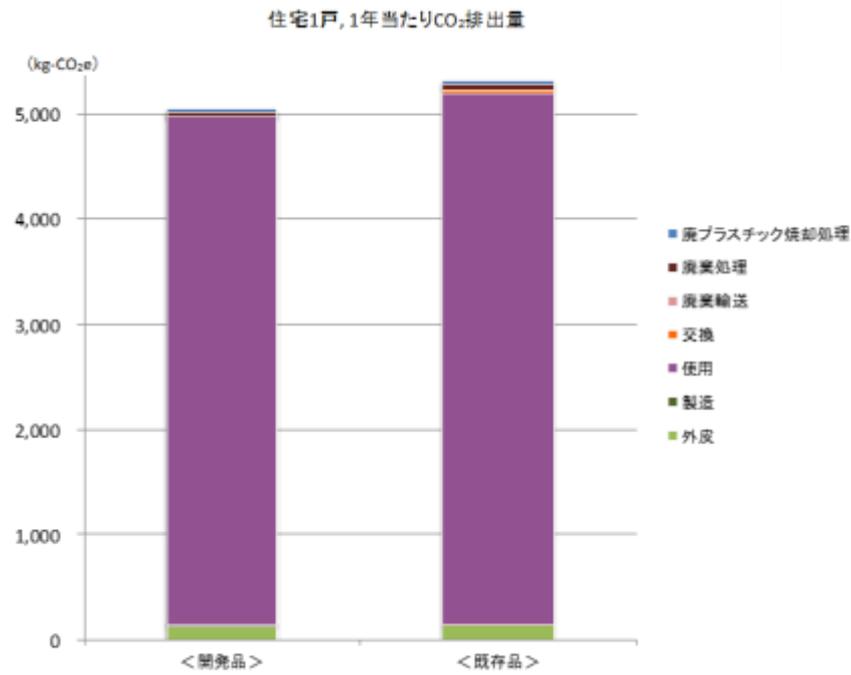


図 238 住宅 1 戸、1 年あたりの CO₂ 排出量評価結果

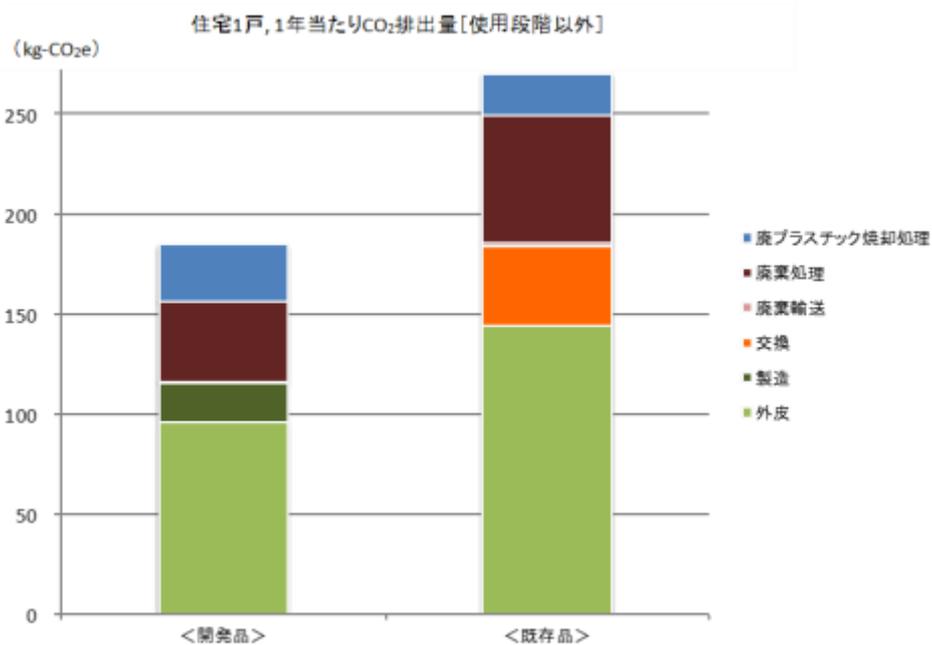


図 239 住宅 1 戸、1 年あたりの CO₂ 排出量評価結果 (使用段階以外)

B システムバスでの評価

CNF を利用した浴室壁および浴室天井の試作部品を用いシステムバスに施工し、実測評価を実施したところ、既存部品に対し、環境温度 10°C、浴室暖房の温度設定 25°Cにおいて 25.5%の CO₂削減効果を実現した。

詳細は (2) -②-イ-2) -B を参照のこと。

C まとめ

各種部品の試作を通じて得られた実測データをもとに、CNF を利用した部材による高断熱化住宅の CO₂排出量評価を行った。原材料および製造段階、使用段階、廃棄輸送・処理のそれぞれの段階において、CO₂排出量の削減が見られた。住宅1戸、1年あたりで見ると、全体として 310 kg の CO₂削減が見込まれ、そのうち使用段階による削減は、224 kg であった。

各種部材に CNF を添加することで、原材料調達および製造負荷は削減される傾向が多く見られたが、CNF 添加グラスウールと、CNF 添加発泡 WPC の負荷は既存品よりも大きくなっているため、使用量を減らすこと、製造エネルギーを軽減することについて、今後も検討が必要である。

⑤今後の事業計画

本事業においての実試作・実利用を踏まえ、本開発品の実用化に向けた課題、対策等を明らかにして、実用化計画を策定した。以下には、その詳細を示す。

A 実用化に向けた課題とその対策

図 240 には、住宅産業の業界シェアを示す。住宅シェアの 80%以上が工務店等のビルダーである。即ち、本事業成果を実用化させるためには、これら工務店等のビルダーへの普及がポイントとなる。一方、住宅産業における新規技術の導入は、太陽光発電等の事例からも明らかのように、工務店等のビルダーからスタートしている。しかしながら、工務店等のビルダーは、本技術成果のような素材系部品の評価ができる機能（評価装置等の設備）を有していない。

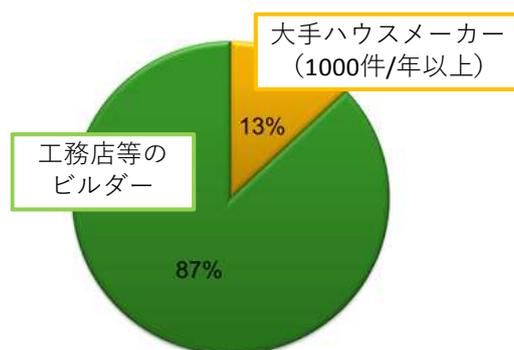


図 240 住宅産業における事業規模別シェア (2008 年度)

住宅部品に視点を移すと、住宅部品には、システムバスやサッシ等の完成品を工務店等ビルダーで使用する部品と、外壁、天井、床等の住宅部素材を工務店等ビルダーがアッセンブリして完成させる部品に分けられる（図 241）。後者には、住宅部品メーカーが存在しておらず、これらの機能性評価は、住宅を施工するメーカー側が実施しなければならない。しかし、工務店等ビルダーでの評価は困難である点は前述したとおりである。また、各部素材メーカーも単体の評価は実施しているが、部品としての評価は実施していない。さらに、住宅部素材は、後述する法規制や業界基準、加えて、流通が確立しており、ダウントレンドの住宅業界において、劇的な素材の変化は、困難である。加えて、既存の住宅部素材の品質担保は、長期にわたって大きな変更はなく、実績が品質を担保しており、新しい素材を受け入れる規格等の体制ができていない。

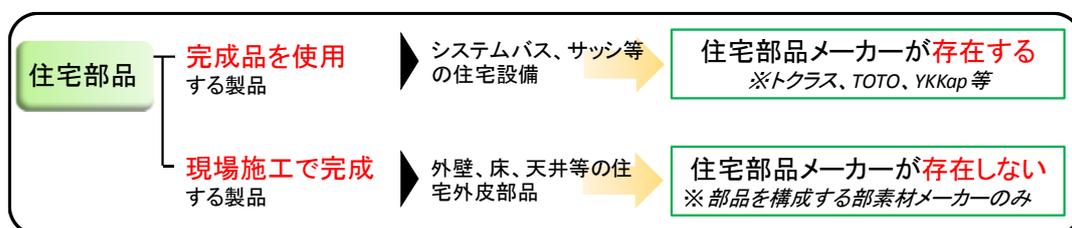
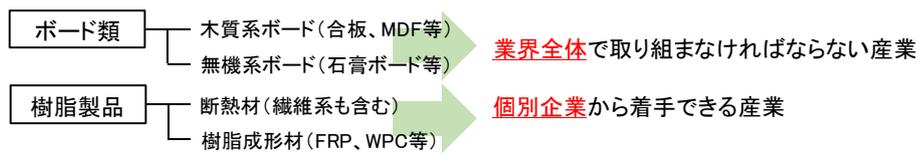


図 241 住宅部品の形態

そこで、本事業における部素材は、これら業界の実情に則した形で開発を実施した。即ち、可能な限り大きな素材変更をせず、仕様変更型の部素材としている。言い換えれば、断熱性能以外は、既存部品の実績で品質が担保できる形の部素材で市場導入できる改良で開発を実現した。また、各部素材メーカーにおいても、ボード類のように、業界が確立しており、業界全体で取り組まなければならない部素材と、樹脂製品のように業界が競合しており、個別企業での着手ができる部素材に分けられる。このような業界背景を踏まえ、本事業では、部素材業界に合わせたスキームで開発を実施した（図 242）。

ボード類に対しては、すべての開発情報を公開し、業界全体を公正にサポートできる学術機関が中心となり、樹脂製品に対しては、個別企業からスタートし、業界全体が競争し普及拡大できるスキームで開発を行った。さらに、各部品において、可能な限り部素材の共通化を図り、使用する工務店等ビルダーの負荷を軽減している（表 74）。また、モデルルームでの実評価により、施工面での実績提示と利用面での効果を提示できるアウトプットまで至っている。



対象となる産業界に合わせた開発スキーム



図 242 各部素材産業に適合した開発スキーム

表 74 部品と部素材の関係

			部素材				
			木質ボード	無機ボード	繊維系断熱材	樹脂系断熱材	樹脂成形材
部品	外皮部品	外壁	○	○	○		
		天井	○		○		○
		床	○			○	○
	内装部品	内壁		○		○	
		浴室壁				○	○
		浴室天井				○	○

B 事業化計画

前述したとおり、多くの部品は施工現場でのアッセンブリ型で、部品メーカーが存在しない点を課題としたが、アッセンブリ商品であるが故、普及が早いという利点も兼ね備えている。これは、既存部素材との組み合わせでも部品が成立する点である。図 243、244 には、既存部品と本事業成果部品の構成図を示すが、部素材の構成はほとんど同じであることがわかる。即ち、早く完成した部素材から逐次導入することが可能となる。住宅は、長期使用する製品であり、安全や品質の担保は重要で、多くの規格基準がある(表 75)。これら規格基準によっては、部素材が完成しても、市場導入までに時間を要するものもある。したがって、部品用部素材のすべての規格基準合格を待つことなく、できたものから市場投入できる点は、規格基準への対応にもつながる。

部品	既存部品構成	CNF活用部品構成
外壁	<ul style="list-style-type: none"> 合板 セルロース系断熱材 石膏ボード 	<ul style="list-style-type: none"> CNF添加木質ボード CNF添加セルロース系断熱材 CNF添加無機ボード <p>空隙制御による断熱性向上</p>
天井	<ul style="list-style-type: none"> グラスウール 10K 銘木合板 	<ul style="list-style-type: none"> グラスウール 16K CNF/FRP補強銘木合板 <p>補強効果による高断熱材利用</p>
床	<ul style="list-style-type: none"> フローリング 合板 セルロース系断熱材 	<ul style="list-style-type: none"> CNF添加発泡WPC CNF添加ウレタン系断熱材 CNF添加セルロース系断熱材 <p>空隙制御による断熱性向上</p>

図 243 外皮部品の構成比較

部品	既存部品構成	CNF活用部品構成
内壁	<ul style="list-style-type: none"> 石膏ボード ウレタン系断熱材 石膏ボード 	<ul style="list-style-type: none"> CNF添加無機ボード CNF添加ウレタン系断熱材 CNF添加無機ボード <p>空隙制御による断熱性向上</p>
浴室壁	<ul style="list-style-type: none"> ウレタン系断熱材 石膏ボード 化粧鋼板 	<ul style="list-style-type: none"> CNF添加ウレタン系断熱材 CNF添加FRP 化粧鋼板 <p>補強効果による断熱材増量 + 空隙制御による断熱性向上</p>
浴室天井	<ul style="list-style-type: none"> 発泡スチロール FRP 	<ul style="list-style-type: none"> CNF添加ウレタン系断熱材 CNF/FRP <p>補強効果による断熱材増量 + 空隙制御による断熱性向上</p>

図 244 内装部品の構成比較

表 75 各種部素材に対応する規格基準

部品	部素材	規格・基準	認定先	計画	備考
外壁	CNF添加木質ボード	製品等級(JIS規格に準拠)	日本繊維版工業会	32～33年度	新規分類の可能性有り
		ホルムアルデヒド放散等級	大臣認定	32年度	
		4VOC放散表示	日本繊維版工業会	32年度	
	CNF添加セルロース系断熱材	JIS認証	認証機関	31年度	吹込み用
		製品等級(JIS規格に準拠)	日本繊維版工業会	32年度	ボード用
	CNF添加無機ボード	不燃(準不燃)	大臣認定	32年度	
		Q-CAT認定	タイル業協会	32年度	
部品	外壁防火構造	大臣認定	34年度	非防火から着手	
天井	CNF/FRP補強合板	JAS認定	合板検査協会他	32～33年度	工場認定
床	CNF添加発泡WPC	JIS認証	認証機関	34年度	
	CNF添加ウレタン	不燃(準不燃)	大臣認定	32年度	
	外壁「CNF添加セルロース系断熱材」と同じ				
内壁	外壁「CNF添加無機ボード」と同じ				
	床「CNF添加ウレタン」と同じ				
浴室 壁・ 天井	CNF/FRP	特になし			
	床「CNF添加ウレタン」と同じ				
	部品	業界基準	キッチンバス工業会		基準内で展開

これらを踏まえ、図 245 には、事業終了後の実用化計画を示す。2019 年度は、モデルルーム等を通じ、実証評価を引き続き実施する（特に冷房効果の確認）。つづいて、2020 年度には、実際に体験できるモデルハウスを施工し、普及活動を行う。同時に 2019 年度安全性や供給の観点から最終スペックを確立し、2020 年度から、規格基準に対し、必要な認定取得を実施する。一方、本技術は、リフォームや集合住宅の部品にも活用できる。リフォームに関しては、工務店等ビルダーの得意分野でもあり、これらの市場展開もコンソーシアムメンバーを中心に推進する。また、無機ボードやフロアのようにメンテナンスにおいて、メリットのある商材を中心に、集合住宅への展開も同時に図る。これらは、工務店等ビルダーからスタートするが、実績と市場認知から、断熱性向上をニーズから必然にすることで、大手ハウスメーカーや保守的な工務店等ビルダー等の業界全体を動かすことで、CNF 利用高断熱部品（部素材）利用を当たり前にし、各種規格基準をクリアし、2023 年度には一部部材で先行的にスタンダード化したい。

3. 総括

本年度は、各種断熱住宅部品における構成素材の量産試作を行い、各種性能評価を実施するとともに、これをモデルルームに施工し、暖房消費エネルギーを比較した。また、開発品を用いた住宅における LCA 評価を実施し、既存の部品を使用した場合と比較して、住宅 1 戸あたり 1 年で 310kg 以上の CO₂ 削減が可能であることを実証した。経済性の評価においては、イニシャルコストが既存品に比べて掛かるものの、暖房エネルギーコストとメンテナンスコストを加味すれば、3 年以下でコスト回収が可能であることが示された。量産化試作により、既存の生産設備を大きく変更することなく開発品が生産可能であること、住宅施工会社に対するヒアリングにより、既存品と施工性に大きな差がないことを確認できたため、材料費を除けば開発品を導入するメリットが大きいことが明らかとなった。事業化においては、作り手側、使い手側双方のリスクヘッジが可能な部品開発を実現したことにより、普及拡大においても大きな障壁はないと考える。

参考文献

- 1)徳永, 金属学会会報, Vol. 11, No. 5 (1972), pp. 353-367
- 2)J. K. Mackenzie, Proc. Phys. Soc., Vol. 63 (1950), p. 2
- 3)三浦, 坂本, 徳永, 粉体および粉末冶金, Vol. 27, No.3 (1980), pp. 82-87

この印刷物は、グリーン購入法に基づく基本方針における「印刷」に係る判断の基準にしたがい、印刷用の紙へのリサイクルに適した材料[A ランク]のみを用いて作成しています。