

平成 28 年度セルロースナノファイバー性能評価  
事業委託業務 報告書

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

2017 年 3 月 31 日

事業代表者

国立大学法人 静岡大学  
(先端バイオマス利用研究コンソーシアム)

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  
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

(平成 29 年度より参画：学校法人 同志社 同志社大学、岡山県産業労働部、岡山県  
農林水産総合センター森林研究所、静岡県経済産業部、静岡県工業技術研究所)

# 目次

要旨	1
Summary	2
1. 業務の概要	3
1. 1 業務テーマ	3
1. 2 事業の目的	3
1. 3 本業務の実施機関	3
1. 4 本業務に至った背景	3
1. 5 業務の内容	3
(1) 外皮部品における断熱性向上に関する技術開発	
①CNF による断熱性向上技術の検討	
②部品における断熱性検証	
(2) 内装部品における断熱性向上に関する技術開発	
①CNF による断熱性向上技術の検討	
②部品における断熱性検証	
(3) 社会実装に向けた実証	
1. 6 事業実施体制	5
1. 7 本業務終了後の計画	8
2. 業務成果報告	9
(1) 外皮部品における断熱性向上に関する技術開発	
①CNF による断熱性向上技術の検討	
②部品における断熱性検証	
(2) 内装部品における断熱性向上に関する技術開発	
①CNF による断熱性向上技術の検討	
②部品における断熱性検証	
(3) 社会実装に向けた実証	

## 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、CNF の特性を活かした住宅部品（外皮部品、内装部品）の手法を提示するとともに、シミュレーションにより熱還流率を算出、住宅 1 戸あたり年間 15kg 以上の CO2 削減を実証した。

### (1) 外皮部品における断熱性向上に関する技術開発

- ◆CNF の特性を活かした断熱技術において、技術的、実用的面で適性の FS 評価を実施した。
- ◆シミュレーションにより、「外壁部品で  $0.35\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  以下」、「天井部品で  $0.22\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  以下」、「床部品で  $0.33\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  以下」の外皮部品の構造を提示した。
- ◆床部品等一部の部品で実体検証を開始した（平成 29 年度継続テーマ）。

### (2) 内装部品における断熱性向上に関する技術開発

- ◆CNF の特性を活かした断熱技術において、技術的、実用的面で適性の FS 評価を実施した。
- ◆シミュレーションにより、「内壁部品で  $0.29\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  以下」、「浴室壁部品で  $1.86\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  以下」、「浴室天井部品で  $0.57\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  以下」の内装部品の構造を提示した。

### (3) 社会実装に向けた実証

- ◆外皮部品及び内装部品 FS 評価から、住宅利用への導入に向けたロードマップを作成した。

## Summary

A commissioned project on the performance evaluation of the Products using Cellulose nanofiber (2016)

CO<sub>2</sub> reduction by the improvement on the heat transmission capacity of the housing parts with Cellulose nanofiber

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 CO<sub>2</sub> emission.

In this fiscal year, housing parts such as casing or interior using CNF were proposed and heat transmission coefficient of a house built by CNF-added housing parts was simulated. The simulation suggests that more than 15kg of CO<sub>2</sub> will be reduced per year/single house.

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

- ◆ Feasibility study for the heat insulation by using CNF-added housing parts was conducted from the viewpoint of both technical development and practical realization.
- ◆ CNF used casing parts such as exterior wall (under 0.35W/m<sup>2</sup>K), top sheathing (under 0.22W/m<sup>2</sup>K) and floor parts (under 0.33W/m<sup>2</sup>K) were proposed based on the simulation.
- ◆ Evaluation of heat insulation capacity with real floor parts has been conducted.

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

- ◆ Feasibility study for the heat insulation by using CNF-added housing parts was conducted from the viewpoint of both technical development and practical realization.
- ◆ CNF used interior parts such as interior wall (under 0.29W/m<sup>2</sup>K), wall for bathroom (under 1.86W/m<sup>2</sup>K) and top sheathing parts for bathroom (under 0.57W/m<sup>2</sup>K) were proposed based on the simulation.

### (3) Verification for the practical realization

- ◆ A detailed roadmap toward the installation of CNF-added parts to housing was drawn up based on the feasibility study of casing and interior housing parts.

## 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（以下 CNF と略す）を利用した住宅部品高断熱化による CO2 削減

### 1. 2 事業の目的

本事業では、住宅部品の高断熱化の新たな取り組みとして、革新的素材である CNF が有する「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の利用を中心に、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、微細空隙による熱伝導性低下に取り組む。本年度は、CNF を添加した高断熱住宅部品について、主要部品の断熱性向上効果の理論的確認と手法の絞り込みのためのフイージビリティスタディ（FS 検証）を実施するとともに、一部部品における試作を開始する。

### 1. 3 本業務の実施期間

平成 28 年 12 月 22 日から平成 29 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 戸あたり年間 15 kg 以上の CO2 削減が実現できる部品の実証を実施する。本年度は、CNF の「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た住宅部品（外皮部品、内装部品）の手法を提

示するとともに、シミュレーションにより熱還流率を算出、住宅1戸あたり年間15kgのCO2削減を年度目標とし、以下(1)～(3)に示す内容を実施する。

## (1) 外皮部品における断熱性向上に関する技術開発

### ①CNFによる断熱性向上技術の検討

#### ア. 手法における技術適正のFS検証

- ・CNFのサイズ及び形状による空隙量、空隙サイズに及ぼす影響を明らかにする。

#### イ. 利用における市場適正のFS検証

- ・外皮部品において、熱還流率が「外壁部品で $0.35\text{W/m}^2\text{K}$ 以下」、「天井部品で $0.22\text{W/m}^2\text{K}$ 以下」、「床部品で $0.33\text{W/m}^2\text{K}$ 以下」となる部品構成を提案する。

### ②部品における断熱性検証

#### ア. 外壁利用における基礎評価

- ・セルローズ系断熱素材において、CNFネットワーク構造を構築し、空隙の微細化とCNF添加量、形状等の関係を明らかにするとともに、断熱性能への影響を評価する(平成29年度へ継続;平成28年度から評価を開始する)。

#### イ. 天井利用における基礎評価

- ・グラスウール系断熱素材において、CNFネットワーク構造を構築し、空隙の微細化とCNF添加量、形状等の関係を明らかにするとともに、断熱性能への影響を評価する(平成29年度へ継続;平成28年度は、「②ア」の成果から評価計画を作成する)。
- ・CNFグラスウール系断熱素材重量と、天井化粧板のたわみ量の関係から、天井補強板補強の手法を提案する(平成29年度へ継続;平成28年度はシミュレーション評価を開始する)。

#### ウ. 床利用における基礎評価

- ・WPCフローリング素材の発泡層形成におけるCNF添加効果の検証において、CNF添加量及び形状等が断熱性能に及ぼす影響を評価する(平成29年度へ継続;平成28年度は試作評価を開始する)。

#### エ. 開口における基礎評価

- ・樹脂サッシ普及において、CNF利用における技術的課題を明らかにする。

## (2) 内装部品における断熱性向上に関する技術開発

### ①CNFによる断熱性向上技術の検討

#### ア. 手法における技術適正のFS検証

- ・ CNF のサイズ及び形状による空隙量、空隙サイズに及ぼす影響を明らかにする（「（１）①ア」テーマと共同で実施）。
- ・ 各種利用素材が異なる内装部品の実利用において、海外の技術情報等の事前調査をする。

#### イ．利用における市場適正の FS 検証

- ・ 内装部品において、熱還流率が「内壁部品で  $0.29\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  以下」、「浴室壁部品で  $1.86\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  以下」、「浴室天井部品で  $0.57\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  以下」となる部品構成を提案する。

### ②部品における断熱性検証

#### ア．内壁利用における基礎評価

- ・ 発泡無機ボードの発泡層形成における CNF 添加効果の検証において、CNF 添加量及び形状等が断熱性能に及ぼす影響を評価する（29 年度へ継続；28 年度は試作評価を開始する）。

#### イ．浴室壁利用における基礎評価

- ・ ウレタン発泡ボードの発泡層形成における CNF 添加効果の検証において、CNF 添加量及び形状等が断熱性能に及ぼす影響を評価する（29 年度へ継続；28 年度は CNF の相容面における実用性影響評価を開始する）。

#### ウ．浴室天井利用における基礎評価

- ・ 湿式発泡ウレタン吹付断熱素材において、流動におけるネットワーク構造への影響を評価し、空隙を微細化と CNF 添加量、形状等の関係を明らかにするとともに、断熱性能への影響を評価する（29 年度へ継続；28 年度から評価を開始する）。

### （３）社会実装に向けた実証（静岡大学）

- ・ 各部品の FS 評価をもとに実用化に向けたロードマップを作成すること。

## 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、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。表－1. 1 には、各テーマの担当機関を示す。また、図－1. 1 には、実施体制図を示す。

表-1. 1 各テーマの担当機関

テーマ		担当機関		
(1) 外皮部品における断熱性向上に関する技術開発	①CNFによる断熱性向上技術の検討	ア. 手法における技術適正のFS検証	名古屋工業大学	
		イ. 利用における市場適正のFS検証	トクラス	
	②部品における断熱性検証	ア. 外壁利用における基礎評価	静岡大学	
		イ. 天井利用における基礎評価	大阪工業大学	
		ウ. 床利用における基礎評価	トクラス	
		エ. 開口における基礎評価	YKK AP	
	(2) 内装部品における断熱性向上に関する技術開発	①CNFによる断熱性向上技術の検討	ア. 手法における技術適正のFS検証	山口大学
			イ. 利用における市場適正のFS検証	トクラス
②部品における断熱性検証		ア. 内壁利用における基礎評価	ランデス	
		イ. 浴室壁利用における基礎評価	倉敷紡績	
		ウ. 浴室天井利用における基礎評価	トクラス	
(3) 社会実装に向けた実証		静岡大学		

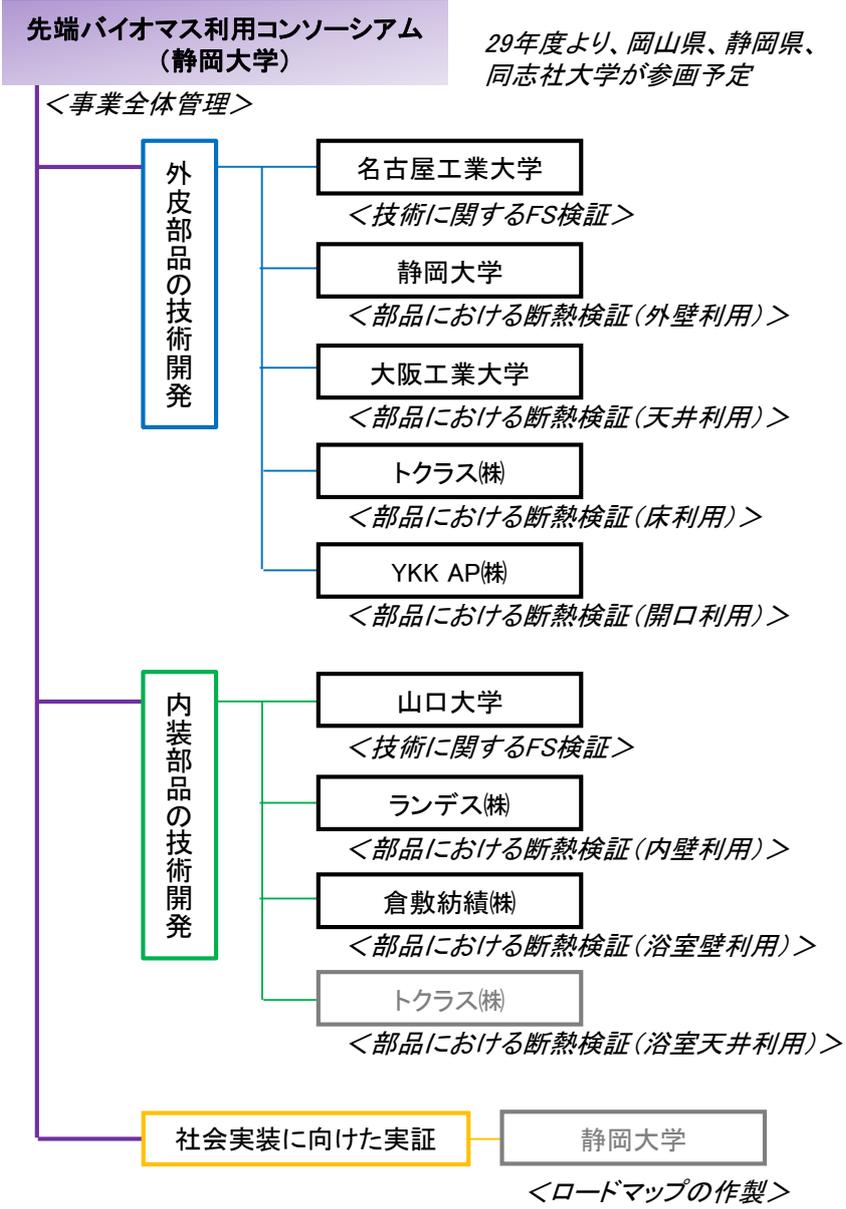


図-1.1 実施体制図

### 1. 7 本業務終了後の計画

本業務成果は、CNF を利用し既存断熱素材を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。一方、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含んだ成果を目指しており、流通側からの活用も早い。このような背景から、本業務終了後、31年度は、供給側の参画機関でコストも踏まえた量産、利用側の参画機関で信頼性・安全性評価も含めた実証評価を開始、公的な認定等を必要としない部品は、32年度より市場展開する。また、認定の必要な部品に関しては32年度中をめどに取得する。したがって、33年度から本格的に市場導入し、35年度にはスタンダード化を目指す。一方、32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。図-1. 2には、この流れのフロー図を示す。



図-1. 2 事業化に向けた流れ

一方、事業化におけるリスクについては、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にあげられる。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。しかしながら、製品販売からのバックアップにも限界がある。そこで、静岡県、岡山県と言う CNF 産業活用には積極的な行政が参画している点は事業化・普及に向けた強みとなる。普及活動には、これら行政機関が積極的に担っていくことになる。これにより、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

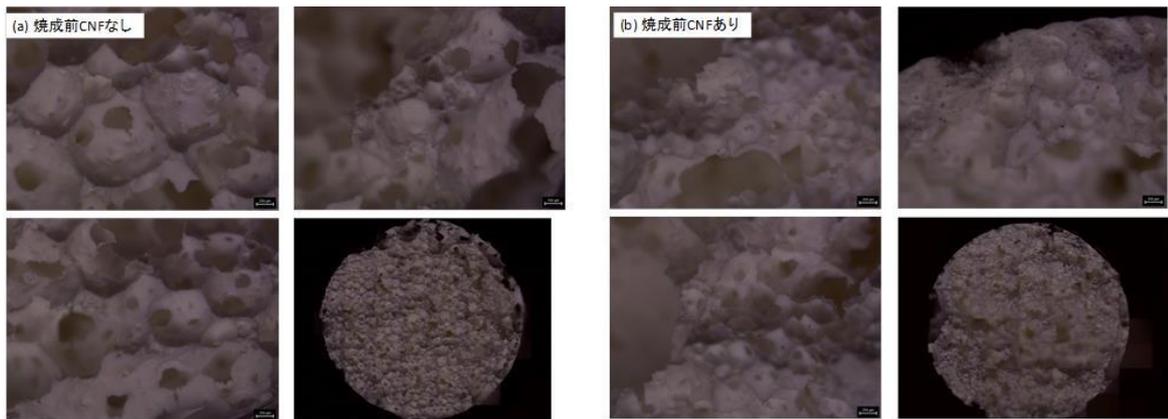
#### ①CNF による断熱性向上技術の検討

##### ア. 手法における技術適正の FS 検証

ここでは、CNF による空隙制御能効果を可視的に確認することで、各テーマへのフィードバックと技術的方向性を定めるため、評価のしやすい水酸化アパタイト (HAp) を用いたゲルキャスト法を用いて評価を行った。

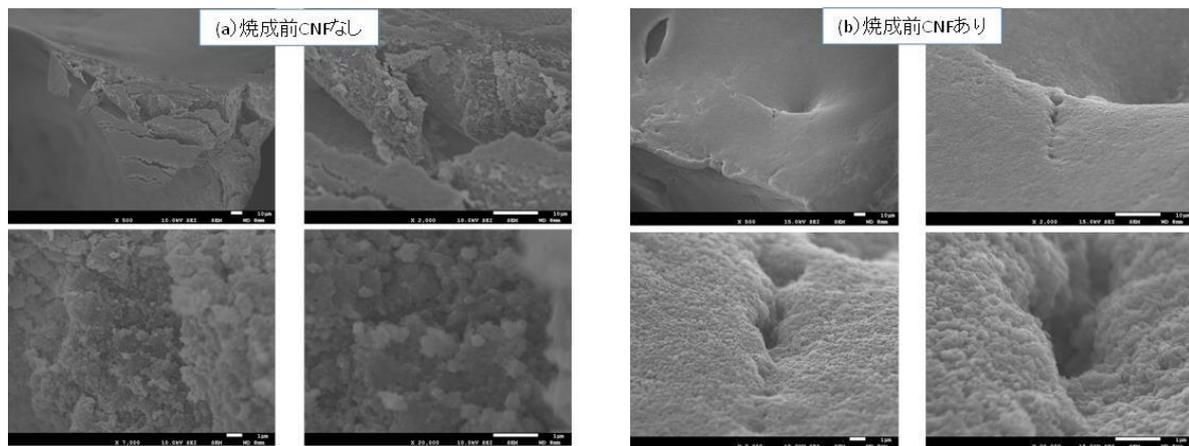
HAp 粉体(太平化学産業)35vol%、蒸留水 65vol%に対し、分散剤セルナ D-305(中京油脂)を 1.5wt%添加した後、分散処理を施した CNF (HG13-G14, 株スギノマシン)を粉体に対し 1wt%添加し、24 時間ボールミルにより CNF 含有 HAp スラリーを作製した。CNF 含有 HAp スラリーに架橋剤として PVA(関東化学)1.14g(1.00g)、Epoxy 樹脂(ナガセケムテック)4.57g(3.98g)を添加し 3 時間ボールミルで混合した。得られたモノマー含有スラリーを真空脱泡した後、硬化剤として TETA1.04g(0.91g)、界面活性剤としてラウリル硫酸ナトリウム(花王)1mass%を加え攪拌時間を 30~180 秒とし、機械ミキサーにて起泡させた。その後、塩化ビニル製の円筒型(φ25mm)に注型し 24 時間室温固化させた。得られた成形体は湿度を 90、80、70、60%と 24 時間ごとに変化させて乾燥した後、80°Cで 24 時間真空乾燥させた。焼成は大気中で 600°C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光学顕微鏡、走査電子顕微鏡 (SEM) によって評価した。

図-2. 1 に焼成前の HAp 多孔質成形体及び CNF 含有 HAp 多孔質成形体の光学顕微鏡写真を示す。本成形条件にて作製した気孔は HAp のみの成形体で平均約 1 mm 程度の気孔を有していることが分かった。またこれら気孔はある程度気孔径の揃った気孔構造になっていることが分かった。一方、CNF を含有させた HAp 多孔質成形体では平均約 0.25mm 程度と、含有していない成形体と比べ 1/4 程度の気孔径となることが分かった。これは機械ミキサーで気泡させる際に、界面活性剤により導入された気泡の界面に CNF が作用し、その固気液界面のバランスを変化させたため、その生成する気泡の大きさが小さくなったと考えられる。また CNF 導入 HAp 多孔質成形体中の気孔径分布は、CNF を含有していないものに比べ、様々な気孔径を持つ気孔構造になっていると示唆された。これは先述の CNF による気泡径変化が、添加した CNF 量が微量であったため、影響を受けた気泡と受けなかった気泡とが混在したためと考えられる。後述するが、ウレタンでの発泡成形においても同様の傾向が認められており、CNF による空隙の均質化は、断熱技術のキーワードとなる。



図－ 2. 1 焼成前の HAp 多孔質成形体(a)及び CNF 含有 HAp 多孔質成形体(b)の光学顕微鏡写真

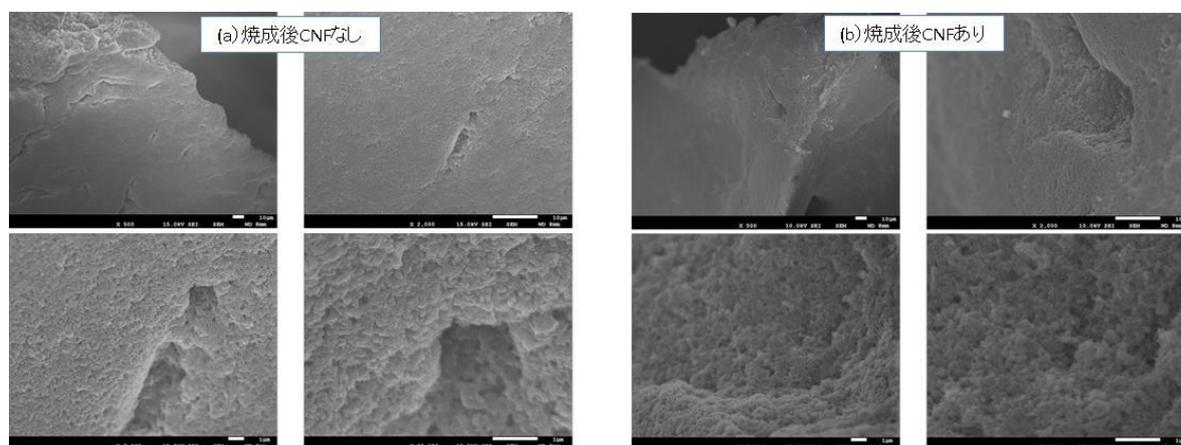
図－ 2. 2 には、焼成前の HAp 多孔質成形体空隙部分の SEM 画像を示す。CNF 無添加の空隙は、ひび割れ状の空隙状態を呈しているのに対し、CNF 添加の空隙は、均質な状態となっている。これは空隙同士が、固化中に、連結するのを CNF が抑制しているためと考えられる。



図－ 2. 2 焼成前の HAp 多孔質成形体(a)及び CNF 含有 HAp 多孔質成形体(b)の SEM 画像

以上の結果から、CNF による空隙微細化、均質化及び形状保持等の空隙制御能が確認された。また、本評価は、無機素材で実施したが、ウレタン等との結果ともリンクしており、加えて、可視的に評価できる手法であることが明らかとなった。CNF はサイズだけでなく、形状等も多岐にわたっており、他テーマの CNF 選定等にも活用できる評価手法であることも次年度につながる成果となっている。

一方、次年度以降の先取り評価となるが、CNF 利用製品のリサイクルとして、炭化や CNF 焼失部分の空隙利用のテーマを想定している。今回の HAp は、セラミック原料であるため、焼成による焼結体評価も可能となる。図－2. 3に、焼結後の SEM 画像を示す。



図－2. 3 焼成後の HAp 多孔質成形体(a)及び CNF 含有 HAp 多孔質成形体(b)の SEM 画像

CNF 無添加は気泡周りの表面が滑らかになったのに対し、CNF 添加の焼結体は粗くなっている。CNF 添加における表面粗さは、CNF が焼失した残孔であると推察される。現時点では予備評価のため、比表面積等は測定していないが、この結果は、CNF 利用製品のリサイクル用途として、焼成による多孔質材（フィルター等の高付加価値用途）への利用等、リサイクルに対する方向性を示している。さらに、無機素材への利用限定とはなるが、CNF のマトリックスへの分散状態を評価するのは非常に難しく、焼結によりその残孔評価で管理できる可能性を示唆している。

#### イ. 利用における市場適正の FS 検証

住宅の外皮を構成している部品は、図－2. 4に示すとおり、屋根、基礎及び居住部の3つで構成されている。これら部品はすべて住宅の断熱性に重要な役割を果たしているが、本事業においては、この中で、シミュレーションと実測部品の性能評価で、相関が正しく評価できる「外壁」、「天井」、「床」及び「開口」をターゲットとした。

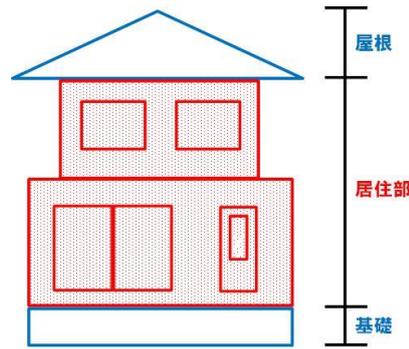


図-2. 4 住宅の外皮を構成している部位

◆外壁部品の FS 検証

外壁において、最外殻のサイディング材と仕切り層の間には、空間があるので（アスファルトシート等の防水層）、ここでは、断熱に関与する外壁部品として、合板/断熱材部/内壁部の構成にて検討した。図-2. 5には、既存部品の構成を示す。



図-2. 5 既存外壁部品の構成

外壁は、室内側の不燃ボード層、屋外側の合板層とその間の断熱材層の3種で構成されている。この部品において、断熱性能を高めるためには、断熱層のアップが簡単な手法であるが、図からも明らかな通り、間柱が配置されており、総厚みを増やすことはできない。また、軸組の木造住宅では筋かいがあるため、ボード系の断熱材は使用できないため、断熱性の高いボード系の断熱材を使用することも困難となる。そこで、外壁部品においては、既存使用部品の熱伝導率を高めることが最適であると判断し、以下に示す各部品にて CNF を活用することで熱伝導率を高める手法の検証を実施した。

合板部分は、熱伝導率が  $0.160\text{W/mk}$  の構造合板が使用されている。合板は、調達性だけでなく加工性等も含め適した材料となっている。合板の代替として、考えられる材料としては、パーティクルボードや MDF が挙げられるが、熱伝導率からすると大きな差は無い。そこで、CNF をバインダーとして利用しているバインダーレスボードの活用を検証した。バインダーレスボードとは、

従来ファイバーや木粉を接着剤で固めたパーティクルボードやMDFの接着剤をCNFに変えたボードである。接着剤の代わりにCNFを活用することで、微細な空隙を残したボードとなる。ここで、生じた空隙層が断熱性能向上に寄与することが期待される。

断熱材部分は、グラスウールやセルロース等の繊維系断熱材が使用されているケースが多い(ボード系断熱材もその効果は高いが、先にも記述したとおり、軸組木造住宅には使用できず汎用性は低い)。これら繊維系の断熱材は、素材自体の断熱性ではなく、繊維同士の間を生じている空隙が断熱に関与している。よって、この空気層が小さくなるほど断熱性能は向上する。実際には、使用する断熱材のかさ密度を高くすること、即ち繊維量を多くすることで、断熱性能が向上する。但し、素材自体の熱伝導率は高いので、繊維量を増やすことは限界がある。そこで、ここでは、繊維系断熱材にて、繊維素材間に生じた空隙をCNFで密にする手法を提案した。濾紙、フィルター等の分野で、CNFによる空隙層緻密化は、実際に検証されている技術であり、同様の効果は、断熱材でも期待できる。

石膏ボード(無機ボード)部分は、不燃素材を使用することが法規で定められている。この部分は、高い強度を求められていないし、ビス等の引き抜き強度も必要としていない(実際に生活するには、あったほうが良いのだが)ため、不燃でかつ安価な石膏ボードが採用されている。したがって、ここに使用する材料は、断熱性能の前に石膏ボード同等の価格帯(=安価)であるか、コストアップするのであれば、アップ分を補てんでできる追加の機能が必要となる。そこで、本事業では、コスト的に近い材料であるコンクリートに着目した。コンクリートは単体では、先行ボードと断熱性能は差がなく、かつ曲げ強度が低い、ひび割れする等でそのままでは、性能的に石膏ボード代替とはならない。そこで、熱伝導率面では、発泡コンクリートを、これを代替できる性能にするために、CNFを補強材として活用する手法を提案する。一方、石膏ボードの表面は厚紙であり、意匠性、使用における耐久はない。したがって、利用には必ず壁紙等の化粧層が必要となってくる。そこで、セラミック系の素材も代替とはなるが、セラミック素材の断熱面においては、石膏ボードに比べ悪くなる。但し、発泡をさせることで、断熱性能は高くなる。さらに、ベースの強度が高いため、通常は無機ボードに比べ、断熱に効果のある空隙を増加することが可能となる。一方、セラミックは焼成するため、製造できるサイズには限界がある。そこで、CNFを利用し焼成することなくセラミックの高強度を確保することで、高発泡の断熱ボード+セラミックの質感により、素地で活用することで化粧工程をなくすことによるコストダウンで無機ボード代替の提案を行った。本事業

では、最終的に軽量コンクリートと無焼成セラミックの複合による材料を実用化する予定である。

以上、CNF利用により、外壁を構成する材料の高断熱化において、表－2.1には、提案した材料と既存部品の熱抵抗値比較を示す。

表－2.1 外壁構成材料の高断熱化による既存部品との比較

現行				CNF利用			
熱抵抗 mK/W	厚み mm	熱伝導率 W/mK	構成部品	構成部品	熱伝導率 W/mK	厚み mm	熱抵抗 mK/W
0.03	5.0	0.160	合板	ハインダレスボード	0.120	5.0	0.04
2.22	100.0	0.040	セルローズ25K	セルローズ+CNF	0.038	100.0	2.63
0.05	12.0	0.220	石膏ボード	軽量コンクリート	0.200	12.0	0.06

ここから、熱貫流率を算出すると、「既存部品=0.37w/m<sup>2</sup> k」に対し、「本事業開発品=0.35w/m<sup>2</sup> k」となり、熱貫流率で、0.02w/m<sup>2</sup> kの削減となった。

#### ◆天井部品のFS検証

天井において、屋根と天井部品との間には、空間があるので（屋根裏スペース）、ここでは、断熱に関与する天井部品として、化粧合板/断熱材部の構成にて検討した。図－2.6には、既存部品の構成を示す。

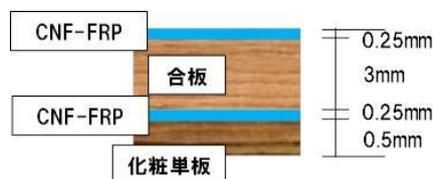


図－2.6 既存天井部品の構成

天井は、室内側の化粧合板層、屋根側の断熱材層の2種で構成されている。この部品において、断熱性能を高めるためには、断熱層のアップが簡単な手法であるが、化粧合板部は薄く、かつ梁のスパンは決まっているので、断熱材を増加すると天井の梁間隔を狭くしないと、たわみが生じてしまう。そこで、天井部品においては、断熱材量を増大させるために、化粧合板剛性を高くすることが最適であると判断し、以下に示す各部品にてCNFを活用することで剛性を高める手法の検証を実施した。

化粧合板部分は、化粧層と合板層から構成されており、この合板層を補強することで、剛性アップは可能である。ここで、剛性を高めるためには、合板厚みを大きくすることが、一番早い方法ではあるが、断熱層も薄くなり、断熱面では、結果的にあまりプラスとならない。したがって、既存の合板の厚みの中

で、補強、即ち、断熱材層の厚みを変えないことがポイントとなる。そこで、ここでは、CNF ペーパーをプリプレグとして利用したサンドイッチ合板を提案した（図－2．7）。



図－2．7 化粧合板層の補強案

ここでは、便宜上 FRP としているが、実際には、接着層と読み替えてもよい。化粧合板を製造する際には、化粧層の貼り付け工程があり、本提案手法では、結果的に加工費はほぼ変わらず、部品部分のコストアップのみとなる。さらに、この構成は、サンドイッチ構造であるため、この合板層をさらに安価なものに変更も可能となる。現時点では、シミュレーション段階であるため、計算上は、合板で進めるが、実用化検証においては、コスト面を配慮した部品構成も考慮する予定である。

以上、CNF 利用により、天井を構成する材料の高剛性において高重量断熱材使用を図ることで、表－2．2に示す構成が実現する。

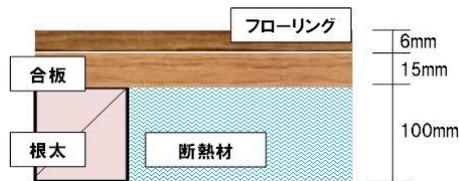
表－2．2 天井構成材料の高剛性化による既存部品との比較

現行				CNF利用			
熱抵抗 mK/W	厚み mm	熱伝導率 W/mK	構成部品	構成部品	熱伝導率 W/mK	厚み mm	熱抵抗 mK/W
0.03	4.0	0.160	銘木合板	CNF補強銘木合板	0.120	4.0	0.03
4.00	200.0	0.050	グラスウール10K	グラスウール16K	0.045	200.0	4.44

ここから、熱貫流率を算出すると、「既存部品＝0.24w/m<sup>2</sup> k」に対し、「本事業開発品＝0.22w/m<sup>2</sup> k」となり、熱貫流率で、0.02w/m<sup>2</sup> kの削減となった。

#### ◆床部品のFS 検証

床においては、表層のフローリング層、床面を支持する合板層及び断熱層で構成されている。図－2．8には、既存部品の構成を示す。



図－２．８ 既存天井部品の構成

この部品構成において、断熱性能を高めるためには、断熱層のアップが簡単な手法であるが、図からも明らかな通り、根太が配ざれており、外壁同様、総厚みを増やすことはできない。また、フローリング層単体では、全体剛性、遮音性等床に求められる特性を担保することができないため、15mmの合板層が必要となっている。そこで、断熱層上部に21mmのスペースがある点に着目し、この部品の断熱性能を高めることを検証した。同時に、床の場合、ボード系の断熱材使用も可能となることから、この部分も、CNFによる高断熱化の手法も併せて検証した。

フローリング＋合板部分は、意匠と剛性が必要となってくる。そこで、この双方を兼ね備えた素材としてウッドプラスチックに着目した。ウッドプラスチックは押出成形で製造されるため、中空成形の中空部に発泡層を付与することは可能である（図－２．９）。



図－２．９ 中空部に発泡層を設けたウッドプラスチックフロア

しかしながら、木粉が入ることで、流動性に不均一性が起こることから、高い発泡も困難である。そこで、CNFを添加することで、流動安定化を維持させ、高い発泡層を有したウッドプラスチックフロアの提案を行った。また、単純に、既存のフローリング＋合板と発泡ウッドプラスチックの材料コストを比較するとウッドプラスチックフロアの方が高くなってしまふ。しかし、フローリング層と合板層が一体となっていることから、施工が簡略化される点、押出成形であるため、長尺使用が実現できる点、加えて、メンテナンス性が高くなる点を加味すると、材料費におけるコストアップ分は十分に解消できる（施工面、メンテナンス面で、トータルメリットが生まれる点は、デッキ材等のエクステリア分野で実証済みである）。

断熱部においては、ボード系断熱材が用いられる場合が多いので、ここでは、ボード系断熱材で検証を行った。ボード系の断熱材では、スチレン系とウレタン系が主である。ここでは、水分散の CNF をダイレクトで活用できる、即ち、実用化しやすいウレタン系断熱材が最適であると判断した。また、CNF に期待する効果としては、図-2. 10 にモデル図で示した通り、発泡層の微細化（理想としては、80nm 以下の空隙を形成することで真空断熱に近づける）、及び発泡セルの補強による空隙率のアップを目標とする。

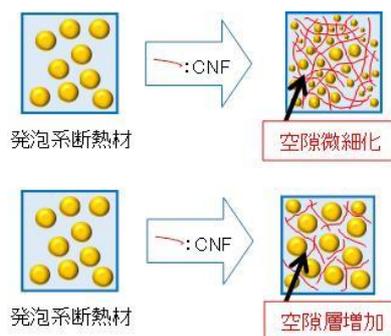


図-2. 10 CNF を利用した高断熱化効果

以上、CNF 利用により、床を構成する材料の高断熱化を図ることで、表-2. 3 に示す構成が実現する。

表-2. 3 床構成材料の高断熱化による既存部品との比較

現行				CNF利用			
熱抵抗 mK/W	厚み mm	熱伝導率 W/mK	構成部品	構成部品	熱伝導率 W/mK	厚み mm	熱抵抗 mK/W
0.04	6.0	0.160	フローリング	CNF発泡WPC	0.120	10.0	0.08
0.09	15.0	0.160	合板	ウレタン+CNF	0.033	11.0	0.33
2.22	100.0	0.040	セルロース25K	セルロース+CNF	0.038	100.0	2.63

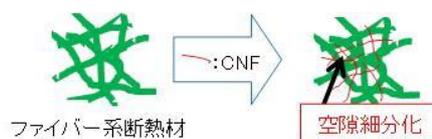
ここから、熱貫流率を算出すると、「既存部品=0.33w/m<sup>2</sup> k」に対し、「本事業開発品=0.38w/m<sup>2</sup> k」となり、熱貫流率で、0.05w/m<sup>2</sup> k の削減となった。

以上の結果より、外皮部品において、熱還流率が「外壁部品で 0.35W/m<sup>2</sup> K 以下」、「天井部品で 0.22 W/m<sup>2</sup> K 以下」、「床部品で 0.33 W/m<sup>2</sup> K 以下」となる部品構成を提案した。この熱貫流率を目標値とし、各種部材の試作に移行した。

## ②部品における断熱性検証

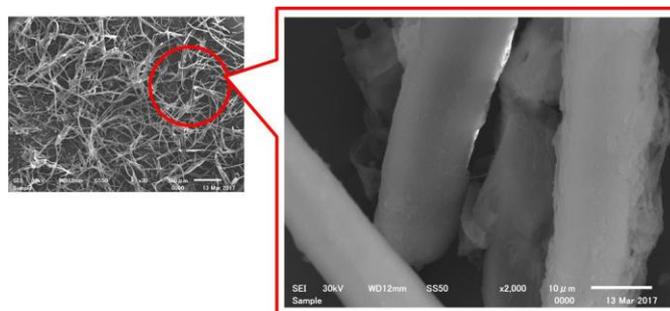
### ア. 外壁利用における基礎評価

本年度は、本課題における評価着手として、繊維系断熱材に CNF を添加することで空隙部の細分化手法を検証した（図－ 2. 1 1）。



図－ 2. 1 1 CNF を利用した空隙の細分化

繊維系の断熱材は、綿状になって市場に提供されるため、今回は、綿状の繊維系断熱材に対し後処理の CNF 添加を検証した。評価は、セルロース系断熱材に対し、CNF 濃度を変えた水溶液を噴霧し、その空隙状態を観察した。図－ 2. 1 2 には、CNF 無添加の繊維系断熱材の SEM 画像を示す。



図－ 2. 1 2 繊維系断熱材の SEM 画像

当然ではあるが、ミクロンサイズの繊維の間が空隙となっている。図－ 2. 1 3 には、この繊維系断熱材に対し、濃度の異なる CNF 水溶液を噴霧したときの空隙状態を示す。CNF の濃度が僅か 0.1% で空隙部分の微細化が認められた。逆に、0.5% を超えると膜のような状態となっている。この結果から、CNF 添加量を高くしなくても空隙の細分化は可能であることが確認され、最も懸念していた、コスト的な課題はクリアできる可能性を示唆している。一方、水溶液濃度 0.5% の画像を見ると、CNF 凝集物の間（上）に微細な CNF ネットワーク構造が形成されていることが確認されている。この結果から、繊維系断熱材にいきなり CNF 水溶液を噴霧するのではなく、徐々に微細な水溶液を噴霧することで、空隙制御の可能性が見えてきた。この評価は次年度となるが、比較的容易な手段でネットワーク構造を形成できた点は、今年度の成果であると言える。

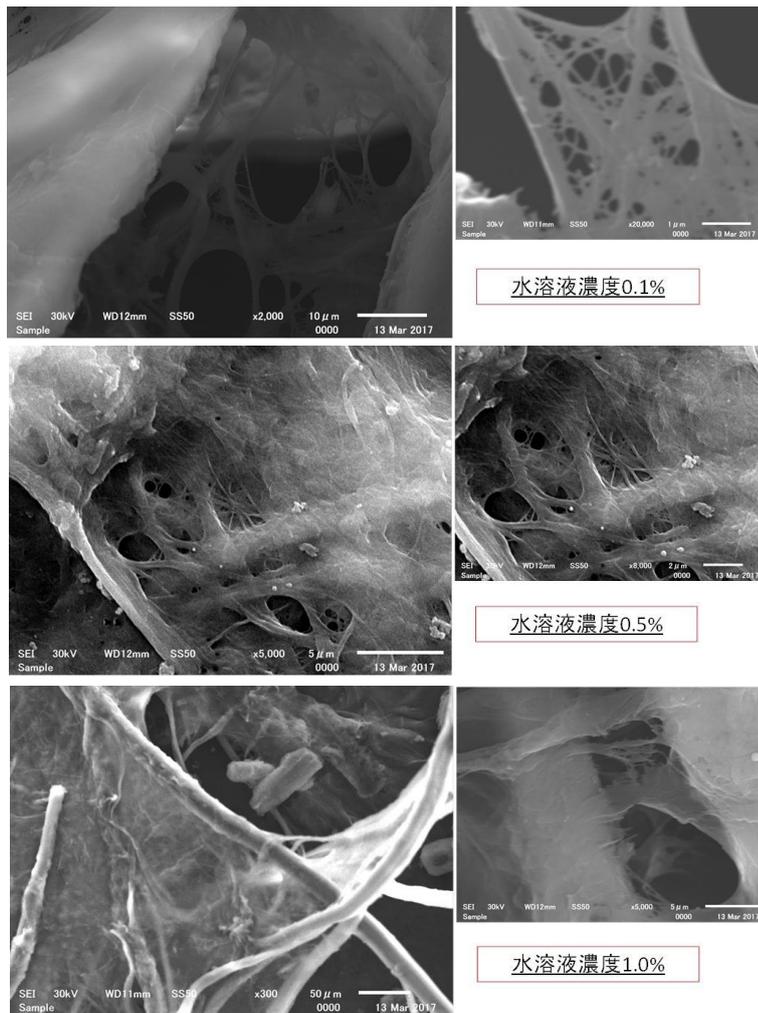


図-2. 13 各 CNF 噴霧濃度における繊維系断熱材の空隙構造

以上の結果から、セルロース系断熱素材において、CNF ネットワーク構造を構築し、CNF 添加量で空隙の細分化制御ができる可能性を見出した。

#### イ. 天井利用における基礎評価

グラスウール系断熱材は、相当密度により、熱伝導率が大きく異なってくる(表-2. 4)。

表-2. 4 グラスウール断熱材における密度と断熱性能

相当密度 (kg/m <sup>3</sup> )	熱伝導率 W/mK
10	0.050
16	0.045
24	0.038
32	0.036

グラスウール断熱材の相当密度が高くなるほど断熱性能も高くなる。これは、単純にグラスウール量が増えることで、空隙が小さくなったためであり、グラスウール量が、直接断熱性に貢献している訳ではない。表-2. 4からも明らかなように、相対密度と熱伝導率の関係は一次式にはなっていない。元来、ガラスの熱伝導率は、 $0.55\sim 0.75\text{W/mk}$  であり、重量が増えるとその熱伝導率に支配されてくる。一方、セルロースは、 $0.10\text{W/mk}$  程度であり、前述したセルロース系断熱材への CNF 利用と同様の手法を用いてもグラスウール増加に比べれば明らかにマイナス効果は少ない。したがって、CNF による空隙の細分化効果は期待できる。また、漆喰等からも明らかなように、セルロースとガラス原料であるシリカは相性が良いため、セルロース系断熱材で用いた手法と同様な手法でもネットワーク構造は形成できると推察する。よって、当初懸念していた、天井断熱材の重量アップが少なくなる可能性はある（化粧合板剛性アップの補強素材使用量を削減できる可能性を示唆）。しかしながら、グラスウールと CNF の長期密着性となると、その知見は少ない。そこで、次年度以降から、グラスウール断熱材利用に関しては、前述したセルロース系断熱材と同様の手法で評価検証するとともに、密着性の評価も実施する。

グラスウールの評価では、CNF を利用することで、目標とする熱伝導率を確保できるグラスウールの重量削減が示唆されたが、ここでは、単純にグラスウールを増加したときに必要となる合板の弾性率をシミュレーションした。

図-2. 14に対象とする天井化粧板の理論計算モデルを示す。天井化粧板は、長さ  $l$ 、厚さ  $t$ 、幅  $b$  である単純支持はりとして仮定した。

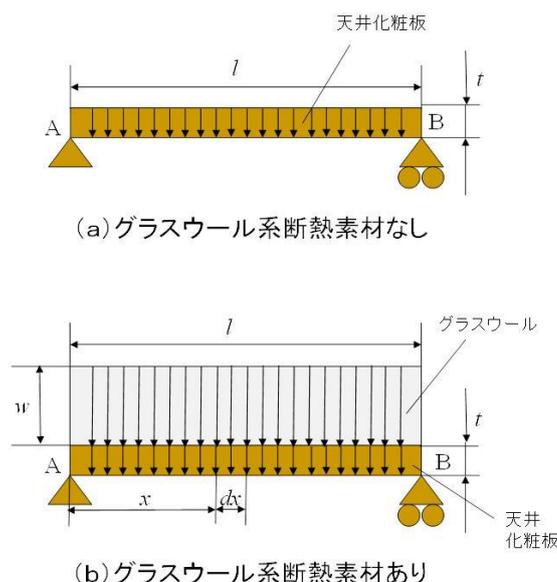


図-2. 14 天井化粧板の理論計算モデル

グラスウール系断熱素材がない場合、(a)に示すように天井化粧板の自重を単位長さあたり  $p$  の等分布荷重として取り扱う。天井化粧板の密度を  $\rho$ 、重力加速度を  $g$  とすれば、等分布荷重  $p$  は次式のように与えられる。

$$p = \frac{\rho \times lb \times g}{l} = \rho tbg \quad (1)$$

一方、厚さ  $w$ 、密度  $\rho'$  であるグラスウール系断熱素材がある場合、天井化粧板と断熱素材の自重を等分布荷重として取り扱う。等分布荷重  $p$  は

$$p = \rho tbg + \frac{\rho' \times lwb \times g}{l} = (\rho t + \rho' w)bg \quad (2)$$

のように与えられる。なお、グラスウール系断熱素材の剛性は無視できるものとする。

上下方向の力の釣合いおよび点 A まわりのモーメントの釣合いより、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \int_0^l p dx - R_A - R_B &= 0 \\ \int_0^l x p dx - R_B l &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

これより支持力  $R_A$ 、 $R_B$  が次のように求まる。

$$R_A = R_B = \frac{pl}{2} \quad (4)$$

点 A から  $x$  の位置にある横断面に作用するせん断力を  $F$ 、曲げモーメントを  $M$  とし、横断面の左側にある自由体を考えると、上下方向の力の釣合いおよび点  $x$  まわりのモーメントの釣合いより、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} F - R_A + \int_0^x p d\xi &= 0 \\ R_A x - M - \int_0^x p(x - \xi) d\xi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

これよりせん断力  $F$ 、曲げモーメント  $M$  が次のように求まる。

$$\left. \begin{aligned} F &= R_A - [px]_0^x = \frac{pl}{2} - px = \frac{p}{2}(l - 2x) \\ M &= R_A x - p \left[ x\xi - \frac{\xi^2}{2} \right]_0^x = \frac{pl}{2}x - \frac{p}{2}x^2 = \frac{px}{2}(l - x) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

得られたせん断力  $F$  と曲げモーメント  $M$  を図示すれば、図-2. 15となる。これより曲げモーメント  $M$  は板の中央  $x=l/2$  において最大となり、その最大値は

$$M_{\max} = \frac{pl^2}{8} \quad (7)$$

と定まる。

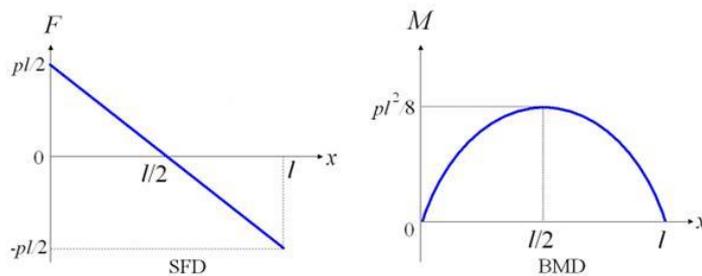


図-2. 15 等分布荷重を受ける単純支持はりのせん断力図と曲げモーメント図

式(6)で与えられる曲げモーメント  $M$  をたわみの基礎式に代入し、順次積分すれば

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M}{EI_z} = -\frac{p}{2EI_z}(lx - x^2) \quad (8)$$

$$i = \frac{dv}{dx} = -\frac{p}{2EI_z} \left( \frac{l}{2}x^2 - \frac{1}{3}x^3 + c_1 \right) \quad (9)$$

$$v = -\frac{p}{2EI_z} \left( \frac{l}{6}x^3 - \frac{1}{12}x^4 + c_1x + c_2 \right) \quad (10)$$

を得る。ここで、 $E$  は天井化粧板の縦弾性係数、 $I_z$  は断面2次モーメントを意味し、次式より与えられる。

$$I_z = \frac{bt^3}{12} \quad (11)$$

式(9)および(10)に単純支持の支持条件

$$(v)_{x=0} = 0, \quad (v)_{x=l} = 0 \quad (12)$$

を適用すれば、積分定数  $c_1$  と  $c_2$  を未知量とする次の連立方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} (v)_{x=0} &= -\frac{p}{2EI_z} \left( \frac{l}{6} \times 0^3 - \frac{1}{12} \times 0^4 + c_1 \times 0 + c_2 \right) = 0 \\ (v)_{x=l} &= -\frac{p}{2EI_z} \left( \frac{l}{6} \times l^3 - \frac{1}{12} \times l^4 + c_1 \times l + c_2 \right) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(13)を  $c_1$ 、 $c_2$  について解けば、

$$c_1 = -\frac{l^3}{12}, \quad c_2 = 0 \quad (14)$$

したがって、たわみ角とたわみは

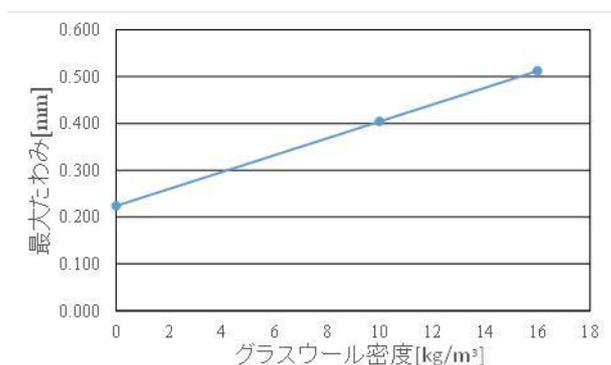
$$\left. \begin{aligned} i &= \frac{dv}{dx} = \frac{p}{24EI_z} (4x^3 - 6lx^2 + l^3) \\ v &= \frac{p}{24EI_z} (x^4 - 2lx^3 + l^3x) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

となる。最大たわみ  $v_{\max}$  はより中央  $x=l/2$  で生じ、次のようになる。

$$v_{\max} = (v)_{x=l/2} = \frac{5pl^4}{384EI_z} \quad (16)$$

一例として、長さを  $l=450\text{mm}$ 、厚さを  $t=4\text{mm}$ 、幅を  $b=1\text{mm}$  とした天井化粧板の場合について、最大たわみに及ぼすグラスウール系断熱素材重量の影響を計算する。天井化粧板には銘木合板を想定し、縦弾性係数を  $E=10.9\text{GPa}$ 、密度を  $\rho=620\text{kg/m}^3$  に設定した。グラスウール系断熱素材がない場合、天井化粧板に作用する等分布荷重は  $p=2.44 \times 10^{-5}\text{N/mm}$  となり、式(16)より中央  $x=l/2$  に発生する最大たわみは  $v_{\max}=0.224\text{mm}$  となる。一方、10K のグラスウールを断熱材として使用した場合、等分布荷重は  $p=4.40 \times 10^{-5}\text{N/mm}$  となり、中央での最大たわみは  $v_{\max}=0.404\text{mm}$  となる。また、断熱効果を高めるため 16K のグラスウールを使用した場合、等分布荷重は  $p=5.58 \times 10^{-5}\text{N/mm}$  となり、中央での最大たわみは  $v_{\max}=0.512\text{mm}$  となる。これらの計算値より天井化粧板の最大たわみとグラスウールの密度の関係は、図-2. 16 のようになる。断熱効果の改善に伴うグラスウールの密度増加は 26.7% のたわみ増加をもたらし、改善前と同程度のたわみに止

めるためには、天井化粧板の曲げ剛性を 26.7%増加させることが必要である。



図－２． 1 6 天井化粧板の最大たわみとグラスウール密度の関係

以上の結果より、CNF グラスウール系断熱素材重量と、天井化粧板のたわみ量の関係を明らかにした。この結果をベースに、29 年度は、合板部分の補強方法を検証する。

#### ウ．床利用における基礎評価

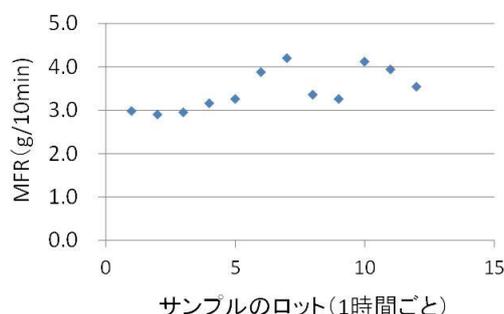
発泡成形の可能性を評価するため、CNF 添加の WPC において、発泡射出成形を実施、図－２． 1 7 に示す発泡成形の実現を実証した。」



図－２． 1 7 CNF 添加発泡成形試作品

発泡成形試作により、CNF が WPC 発泡成形に利用できること（少なくともマイナスでないこと）が確認できた。この上で、発泡成形において最も重要なファクターである熔融粘度（MFR）の評価を実施した。まずは、押出成形用のレシピにてコンパウンド生産検証を実施し、発泡成形が可能と想定される目標値である MFR5g/10min は確保できた。そこで、次に連続生産における MFR の安定性を検証した。図－２． 1 8 には、現時点で発泡成形として想定するレシピにて、1 2

時間コンパウンドを成形したときの 1 時間ごとの MFR 変化を示す。



図－ 2. 1 8 12 時間成形における MFR の経時変化

概ね 3～4g/10min の中で安定している。次ステップとしては、このコンパウンドの MFR 変化が発泡安定に及ぼす影響を評価する予定である。実際本結果は、量産時評価における安定したときのデータを取得しているが、CNF が WPC コンパウンドにおける影響に関しては、供給性が課題であった。CNF によりかさ高くなっているため、成形スクリーへの食い込みが低下する現象が認められている。これは、混練前の一次コンパウンドによって改善はされたが、今後レシピを変更する必要が生じた際は、また、課題点となる可能性はある。したがって、現在経時観察の中で、別件 WPC 生産の際に、各種想定される本レシピ改良品を混在させ、課題点を抽出中である。しかしながら、先に述べたとおり、生産性への課題はあるものの、発泡に影響を及ぼす熔融粘度 (MFR) に対する生産性の影響はほとんどない (概ね MFR で $\pm 1.0\text{g}/10\text{min}$ ) の範囲で安定している。

#### エ. 開口における基礎評価

CNF の利用による住宅の断熱性強化について、利用分野を探索した。住宅のエネルギー消費として大きな部分を占める冷暖房に注目し、窓からの熱の出入りに着目して、その断熱性能を強化するための部品の性能向上を検討した。また、高断熱性窓枠の材料として使用される硬質 PVC への添加について考察した。

住宅における最大のエネルギー消費は冷暖房であるが、外界からの熱の流出入の大部分は開口部からであり、冬場では 52%が開口部から外部へ熱が逃げており、夏には外部からの熱流入の 74%は開口部からである。室内を快適に保つために、これらの熱の流出入に相当するエネルギーを暖房、冷房として消費している。

また、室内環境が健康に影響を与えることが知られており、ヒートショックによる高齢者の死亡は浴室の室温が影響しており、熱中症についても住宅内で発症する頻度が高くなっている。住宅の断熱性を向上することはエネルギー消費を抑

えるだけでなく、健康へも好影響を与えると考えられている。

窓に求められる性能は断熱性の他に図-2. 19に示す項目がある。断熱性にかかわる項目は図-2. 19の黄色で示した部分であるが、耐風圧を確保するために鉄製の補強材が使用すると、断熱性が犠牲になる。断熱性のために気密性を上げると、遮音性がそれに伴って向上する。窓の断熱性に大きな影響を与えるのは窓ガラスである。すでにガラスは複層ガラスが一般的となっているが、さらに断熱性の高いガラスとして図-2. 20に示すように多層ガラスが用いられる。窓の断熱性に与えるガラスと窓枠の影響は面積の大きなガラスの性能が支配的で、窓枠の影響度は10%に満たない。住宅の断熱性、エネルギー消費を低減するためにはガラスの性能向上が最も重要な要素となる。



図-2. 19 窓の性能

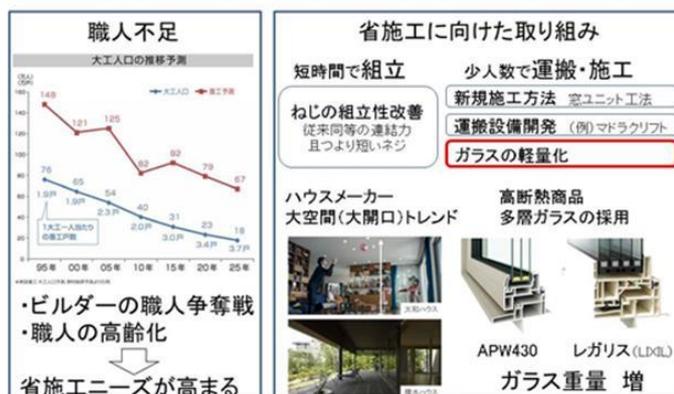
図-2. 20に示すトリプルガラスの内側には空気、アルゴンガス、クリプトンガスが充填され、内面にLow-E金属コーティングが施され、断熱性能を高めている。寒冷地で日射がある地域では窓の方向によって、昼の日差しを取り込むみ、暖房負荷を低減する事ができる。そのような用途には日射取得型のガラスが用いられる。一方で、夏場の冷房負荷が大きい地域であれば、熱線を室内に入れずに明るさのみを取り組むために、日射遮蔽型のガラスが用いられる。

複層ガラスの断熱性能は表裏の2枚のガラスに挟まれた中間層によるものである。中間層の数を増やすと断熱性が向上するが、ガラスの枚数が増え、重量が増加する。高齢化に伴い、開閉力の低減のために、障子重量の軽量化が求められる。特に引違窓の場合には力の弱い高齢者にとっては開閉が重く感じられる。



図－２．２０ 多層ガラス

多層ガラスの課題を図－２．２１にまとめた。建設作業就業者の数そのものが減少しており、職人不足が建設現場で大きな課題となっている。さらに、社会全体の高齢化に伴って、職人の高齢化が進んでおり、重量物の施工が難しくなっている。窓のユニット化、施工方法の簡素化、重量の低減等が求められている。窓ガラスの多層化は重量の増加を伴うため、建設現場の要請に逆行する。



図－２．２１ 多層ガラスの課題

前述した重量に関する課題を解決するために、仕切のガラスを樹脂製のフィルムに置き換える方法が提案されている。図－２．２２に示すように、複層ガラスの単一の間層を仕切って、3層ガラスとすることで断熱性が向上する。しかし、重量も仕切ガラスの分だけ増加する。中間のガラスを樹脂フィルムとすることで、仕切の数を増やししながら、重量の増加を抑制する事ができる。このようなガラスが市販されているが、課題も多く、広く使用されるには至っていない。

中間に樹脂フィルムを用いる際の課題はフィルムの熱膨張率がガラスの熱膨張率と異なり、ガラスの温度上昇に伴って、フィルムに弛みが生じる事である。通常

の複層ガラスに用いられるフロートガラスの熱膨張率は室温付近で  $8.5 \sim 9.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  であり、ポリエステル  $20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、アクリル  $60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、PVC  $70 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  と通常の樹脂材料の熱膨張率はガラスの熱膨張率に比べて 1 桁大きな熱膨張率となっている。

■断熱性能・重量比較

各充填ガスにおける断熱性能(U値):  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$   
重量:  $\text{kg}/\text{m}^2$

ガラス構成		ガラス総厚22mm 中空層16mm 3mmガラス 3mmガラス	ガラス総厚22mm 中空層7mm 6mm 3mmガラス 3mmガラス 3mmガラス	ガラス総厚22mm 中空層7.95mm 7.95mm 3mmガラス 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1.42/cm<sup>3</sup>)の場合</small>

図-2. 2.2 多層ガラスの性能と重量 (Low-E 金属コーティング無し)

中間膜に樹脂フィルムを用いる場合にはガラスの熱膨張率と同じ程度の熱膨張率を持つフィルムが望ましい。しかし、通常の樹脂フィルムはガラスに比べて大きな熱膨張率を持つため、ガラスの中間層の温度が上昇するとフィルムの熱膨張率がガラスより大きいため、弛みが生じてしまう。CNFを用いた透明フィルムであればガラス以下の熱膨張率となり、温度変化による寸法差が生じないため、弛みの発生が少ないと考えられる。

CNFを中間膜として用いる場合には以下の懸念点について、明確にする必要がある。特に、CNFフィルムの耐候性が明確でないため、寿命や着色について、検討が必要となる。

◆耐酸化性能

中間層に用いられる気体として空気、アルゴン、キセノンが考えられ、空気の場合に、長期、高温にさらされるとどの程度の酸化を受けるか評価が必要となる。寿命として20年以上を確保するためには耐酸化性能が必要となる。

◆耐紫外線

ガラス越しとなるため紫外線はかなり緩和されるが、紫外線による劣化が明確でない。評価が必要であり、有効な紫外線対策が必要である。

◆価格

フィルムの価格が他の樹脂フィルムに比べて高価であり、価格の低下が必要である。

窓の断熱性はそのほとんどが窓ガラスによって決まるが、快適性は窓枠の影響が大きい。窓枠の断熱性が低いと、枠への結露が起こり、カーテンを濡らし、カビの発生などの障害がある。アルミニウム製の窓枠が広く普及しているが、硬質PVC製の窓枠は10%を超えるシェアを占めるに至っている。これはアルミニウムに比べて熱伝導率が低く、室内側の温度を高くとることができ、結露しにくいためである。特に枠材の内部を壁で仕切ることにより、空気層を作り、熱貫流率を下げる事ができる。

硬質PVC製の窓枠はアルミニウムに比べて剛性率が低く、大きな力のかかる部位には内部に金属製の補強材を必要とする。補強材の使用により内部の空間がふさがれるため、断熱性の低下を伴う。

PVCの熱変形温度は83℃とされるが、実際には75℃付近から弾性率の低下が起こり、荷重を支えられなくなる。表面が白色であれば最高温度は68℃程度に収まるが、着色した場合、80℃を超える高温となり、変形が起こる。

硬質PVCへのCNFの添加で期待される効果は上記のように、剛性率の向上と耐熱温度の上昇である。PVCのような非晶性樹脂に繊維製の補強材を添加した場合、剛性率、熱膨張率の向上が期待されるが、耐熱温度の上昇は10℃程度に留まると考えられる。窓枠に必要とされる耐熱温度は90℃程度で、この程度あればかなりの部分で温度による問題を解決できる。

以上より、CNFの窓への応用においては、多層窓ガラスの中間膜としてのCNFフィルム、PVCの繊維補強としてのCNFの可能性が示唆された。

## (2) 内装部品における断熱性向上に関する技術開発

### ①CNFによる断熱性向上技術の検討

#### ア. 手法における技術適正のFS検証

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（有限要素解析）によって以下に示す通り、明らか

にした。

#### ◆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

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

なる形で表わされる。ここで、 $m$  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で表わされることもある。

$$\frac{S}{S_0} = \exp(-b\varepsilon) \quad (2)$$

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、式(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(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。Mackenzie によると、気孔の形状が完全な球で対象とする固体材料が均質等方性ならば、相対弾性率  $E/E_0$  と気孔率  $\varepsilon$  の関係は  $\varepsilon < 30\%$  において近似的に次のように表わすことができる。

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

ここで、 $E$  は焼結体の弾性率、 $E_0$ 、 $\nu_0$  はそれぞれ緻密材の弾性率、ポアソン比である。式(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

$$\frac{E}{E_0} \approx 1 - 2\varepsilon \quad (4)$$

が成り立つ。式(4)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。

図-2. 23は、エクセルのソルバー機能を使い、 $\varepsilon < 40\%$  の範囲で式(4)のプロット点に合うように式(1)(2)を適合させた弾性率—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。両者を比較すると式(1)のべき乗則がより線形的にふるまい、式(4)をより近似できることがわかる。ここで式(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が、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評価した。

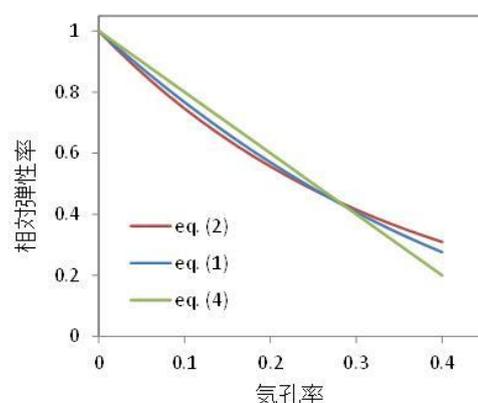


図-2. 23 経験式(eqs.(1)(2))および理論モデル(eq.(4))による気孔率と相対弾性率の関係

#### ◆有限要素法による相対弾性率の予測

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前述したが、実際には空隙の形状や位置の分布が様々に変化することから、形状が球であり、かつ分布の位置を一様に仮定した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。当該年度では最初のアプローチとして、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、平面応力に基づく2次元弾性FEM解析により理論モデルおよび経験式との適合性を検証する。

図-2. 24、25にFEMモデルの境界条件および要素分割を示す。用いた要素は定ひずみ三角形要素であり、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、また厚さは0.01mmとした。上述のように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 $\phi$ がそれぞれ1、2、4、9、16および25%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。

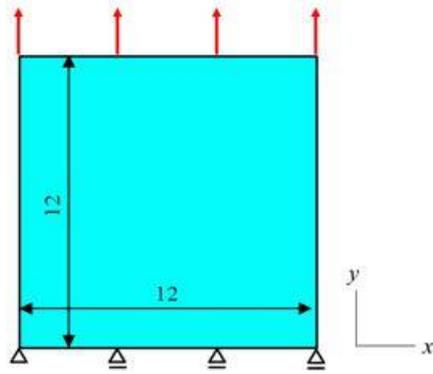


図-2. 24 FEMモデルの境界条件

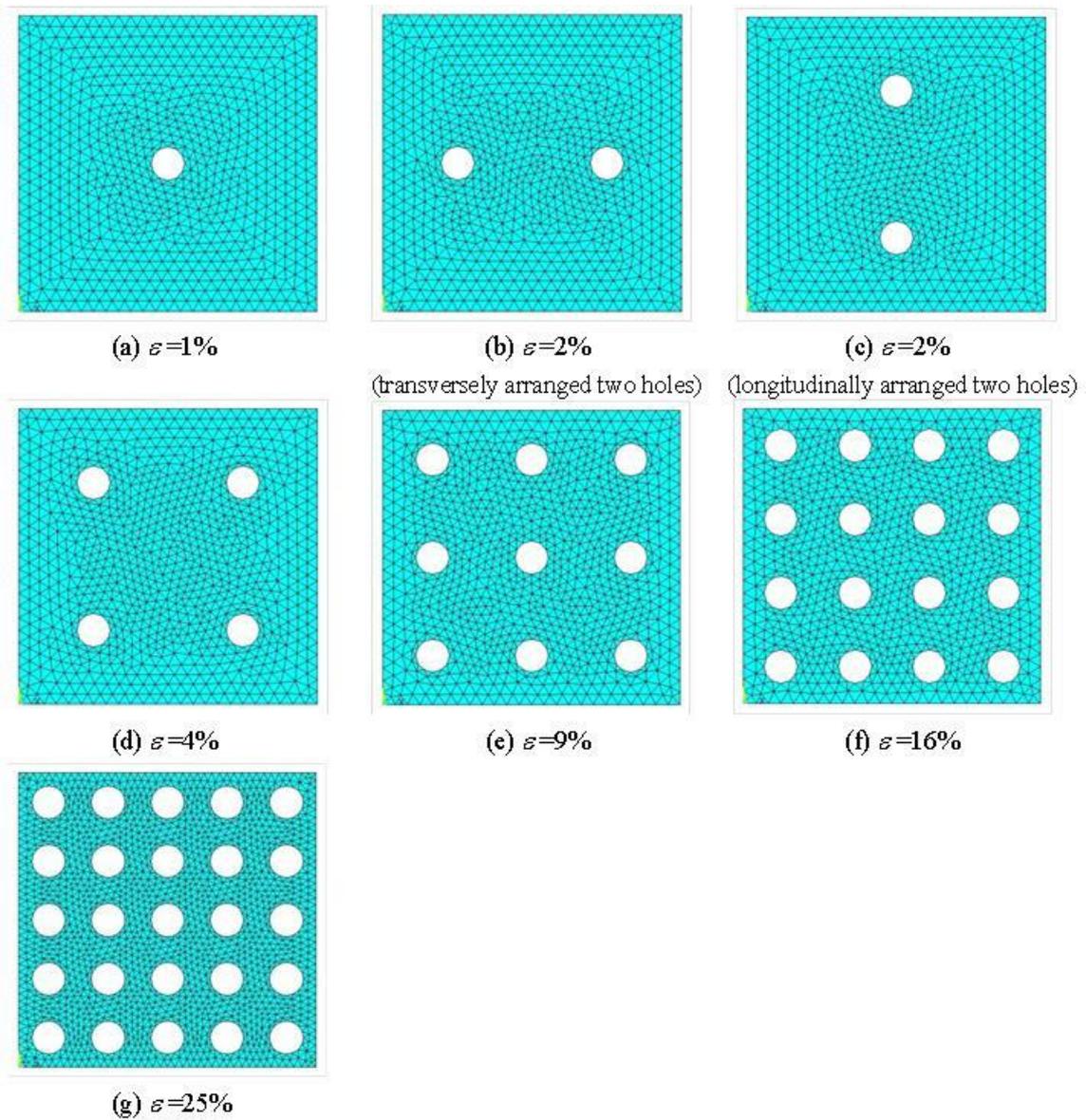


図-2. 25 様々な気孔率を有する有限要素モデル

FEM による弾性率の予測結果を表-2.5に示す。また前節で示した経験式等と比較するため、表-2.5の結果を相対弾性率に変換したグラフを図-2.26に示す。これから、FEM による解析結果は25%までの範囲で直線的に減少するのではなく、むしろ下側に凸の形状で減少する傾向を示す。経験式との比較では、式(2)による指数関数の形状に近いことがわかる。

表-2.5 FEM 解析による相対弾性率の予測

2\*: 2% with transversely arranged two holes, 2#: 2% with longitudinally arranged two holes

気孔率 [%]	1	2*	2#	4	9	16	25
弾性率 [GPa]	4.85	4.71	4.73	4.46	3.92	3.32	2.72

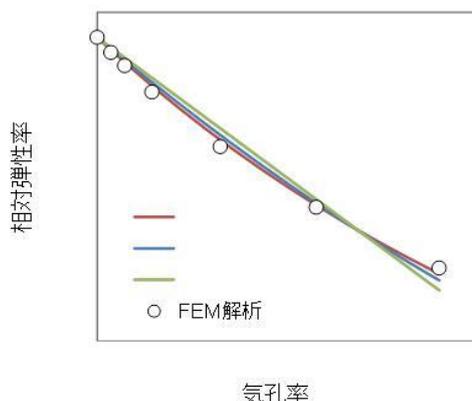


図-2.26 FEM 解析による相対弾性率と経験式との比較 (2%は-2.21(b)、(c)の平均値をプロット)

次に、弾性率に及ぼす気孔寸法の影響を検討した。ここでは図-2.27に示すように、円孔面積のみを図-2.25(a)の2倍および1/2倍とし、気孔率をどの場合も $\square\square=2\%$ と等しくするために円孔数をそれぞれ1個および4個としたFEMモデルを用いた。得られた結果を表-2.6に示す。これから、両者の弾性率は表-2.5の気孔率2\*%および2#%の平均値とほぼ等しく、円孔面積を変えても弾性率にほとんど影響を及ぼさないことがわかる。前節で示した経験式や理論モデルにおいても弾性率は気孔寸法の関数ではないことから、FEM 解析結果が従来と同等な傾向を示すことが判明した。

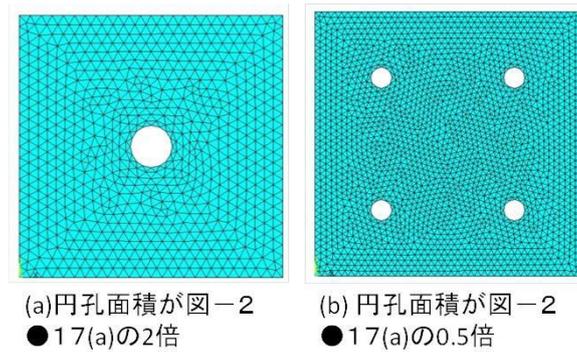


図-2. 27 気孔寸法のみ変えた有限要素モデル (ともに□□=2%)

表-2. 6 気孔寸法のみ変えた FEM 解析による弾性率

\*1 図 3(a)を基準

\*2 円孔面積 1 は表 1 の気孔率 2\*%および 2#%の平均値

円孔面積*1	0.5	1*2	2
弾性率 [GPa]	4.72	4.72	4.71

#### ◆CNF を使った複合発泡体の海外における研究技術動向

一般に多孔質セラミックは脆性であり、また熱硬化性プラスチックによる多孔質体も低靱性を示す。気孔率の高い多孔質材料にいかにか高靱性を付与するかが材料創製技術のキーポイントであり、これまで、セルロースや無機質系ナノ材料を使用した高靱性多孔質材料が注目を浴びている。例えば、Clay/cellulose whisker<sup>1)</sup>、epoxy/clay<sup>2)</sup>、polymer/silica<sup>3, 4)</sup>、polymer/clay<sup>5)</sup>、polymer/clay/nanotube<sup>6)</sup>、regenerated cellulose precipitated from solvent<sup>7, 8)</sup>において高靱性を持ち合わせた多孔質材料が報告されている。

このうち、CNF を使った複合発泡体研究<sup>9-12)</sup>は、スウェーデン王立工科大学の Lars A. Berglund 教授の研究室で精力的に進められている。開発された複合材料は CNF とキシログルカン (ヘミセルロース) から成る複合発泡体であり、結晶構造がセルロース I を維持することが特徴である。図-2. 28 に得られた複合発泡体一例を示す。気孔率は 93.1% から 99.5% であり、極めて大きな範囲のものが開発されている。図中、密度 7、35、79 kg/m<sup>3</sup> は気孔率にしてそれぞれ 99.5、97.7、94.7% に相当する。これらのヤング率はそれぞれ 56、1360、4450 kPa、降伏応力は 7.8、92.7、273 kPa であり、破断ひずみも 80~100% と大きく変形する。図-2. 29 にそれぞれの応力-ひずみ線図を示す。一般に、開気孔を有する高分子発泡体のヤング率  $E$  と降伏応力  $\sigma_y$  は密度  $\rho$  とそれぞれ以下のように関係付けられる。

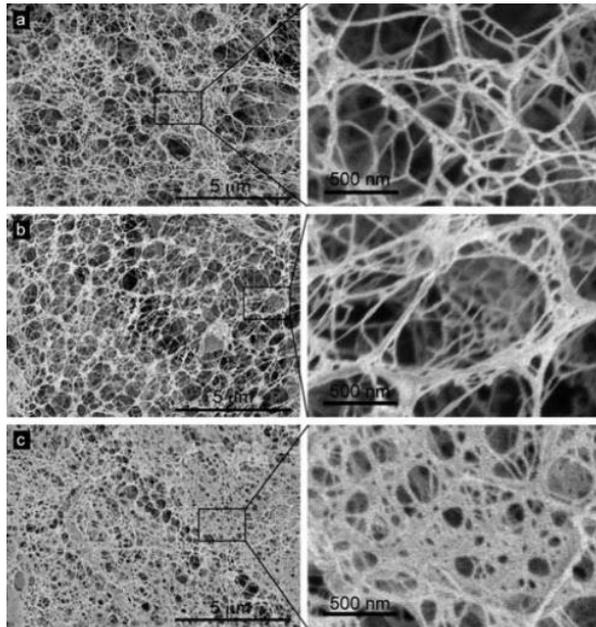


図-2. 28 CNF/キシログルカン複合発泡体の SEM 写真密度は(a)  $7 \text{ kg/m}^3$  (b)  $35 \text{ kg/m}^3$  (c)  $79 \text{ kg/m}^3$

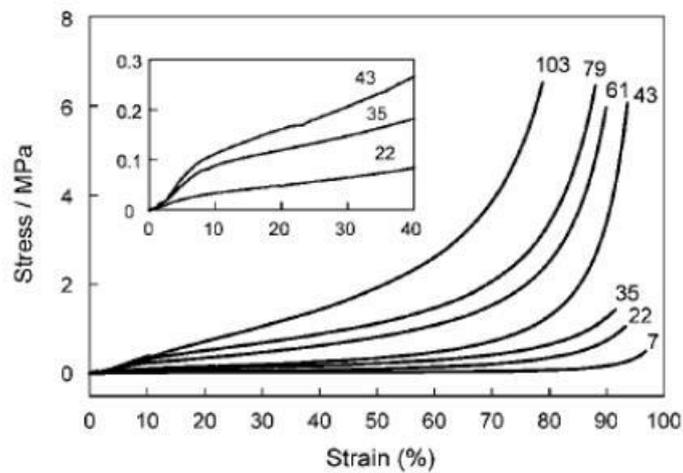


図-2. 29 開発された複合発泡体の応力-ひずみ線図 (各数値は密度を示す. 単位:  $\text{kg/m}^3$ )

$$\frac{E}{E_0} \propto \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^2 \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{y0}} \propto \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1.5} \quad (2)$$

ここで、 $E_0$ 、 $\sigma_{y0}$ 、 $\rho_0$ はそれぞれ緻密体のヤング率、降伏応力および密度である。上述の得られた複合発泡体のヤング率と降伏応力も式(1)(2)でそれぞれ取り扱

いが可能であることが証明されている。対象となった複合発泡体も柔軟に変形することから構造材料としては不向きであるが、その他の様々な用途が検討されている。

その他の CNF を使った多孔質複合材料を扱った例として、木質系繊維内のセルロースマイクロフィブリル構造の凝集をナノオーダーの空隙とみなし、これをエポキシ樹脂と複合化させて多孔質材とする報告<sup>13)</sup>や、溶解させたセルロースをエレクトロスピンによってナノファイバー化させ、ホットプレスにより固体化（オールセルロース化）する報告<sup>14)</sup>がみられる。後者はナノファイバーのネットワーク構造化により多孔質となる。しかし、これらは積極的に多孔質化を目的としたものではなく、強度・剛性を増加させるための CNF の有効性を論じたものである。

#### 参考文献

- 1) M. D. Gawryla, O. van den Berg, C. Weder and D. A. Schiraldi, Clay aerogel/cellulose whisker nanocomposites: a nanoscale wattle and daub, *J. Mater. Chem.*, Vol. 19 (2009) pp. 2118–2124.
- 2) E. M. Arndt, M. D. Gawryla and D. A. Schiraldi, Elastic, low density epoxy/clay aerogel composites, *J. Mater. Chem.*, Vol. 17 (2007) pp. 3525–3529.
- 3) D. J. Boday, R. J. Stover, B. Muriithi, M. W. Keller, J. T. Wertz, K. A. D. Obrey and D. A. Loy, Strong, Low-Density Nanocomposites by Chemical Vapor Deposition and Polymerization of Cyanoacrylates on Aminated Silica Aerogels, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 1 (2009) pp. 1364–1369.
- 4) L. C. Li, B. Yalcin, B. N. Nguyen, M. A. B. Meador and M. Cakmak, Flexible Nanofiber-Reinforced Aerogel (Xerogel) Synthesis, Manufacture, and Characterization, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 1 (2009) pp. 2491–2501.
- 5) J. R. Johnson, J. Spikowski and D. A. Schiraldi, Mineralization of Clay/Polymer Aerogels: A Bioinspired Approach to Composite Reinforcement, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 1 (2009) pp. 1305–1309.

#### イ．利用における市場適正の FS 検証

住宅の内装を構成している部品は、多岐に渡っている。この中で断熱に影響する部品としては、各部屋を間仕切っている内壁となる（図－2. 30）。

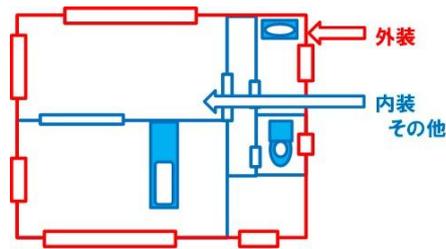


図-2. 30 住宅室内イメージ図

また、住宅で使用されるエネルギーでは、室内の冷暖房も大きいですが、浴室に占める割合も重要となってくる。この中で、浴槽断熱により、給湯エネルギー削減に関する取組みは飛躍的に進んでいる。一方、近年、浴室の寒暖差における健康被害も報告されており、新築住宅を中心とした浴室暖房も普及している。浴室は閉鎖空間ではあるが、空間における外皮部分（壁、床、天井）の占める割合が高く、この浴室外皮部分の断熱が不十分であると浴室暖房エネルギー損失は見逃せない課題となる。このような背景の中から、本事業では、「内壁」と「浴室壁」及び「浴室天井」をターゲットとしている。内壁の効果に関しては、間取り等により大きく変わるので、既存部品との対比でその効果を検証し、浴室に関しては、実際にユニットとして試作して、評価を実施する。

◆内壁部品のFS検証

前述した通り、内壁は部屋と部屋を間仕切る部品であるため、対称形となっている。一般的には、図-2. 31に示すような、断熱材を石膏ボードでサンドイッチした構造になっている。柱との取り合いで、サイズはさまざまであるが、ここでは、総厚124mmの構造でシミュレーションを実施した。

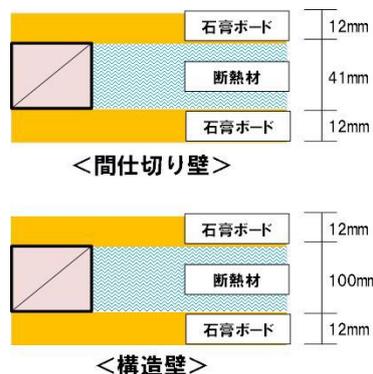


図-2. 31 既存内壁部品の構成

この部品において、断熱性能を高めるためには、断熱層のアップが簡単な手法であるが、外壁同様、間柱が配ざれており、さらに、厚みを増やすことは、居室空間を狭くすることとなり、総厚みを増やすことは好ましくない。

内壁における断熱材部分は、ボード系の断熱材を想定し、ここでは、ボード系で一般であるウレタン系断熱材をターゲットとした。手法としては、「(1)①イ」の床部品で提案した手法を用いるため、ここでは、詳細を割愛する。

また、外層の石膏ボードに関しては、同様に「(1)①イ」の外壁部品で提案した無機系の発泡ボードを用いるため、断熱材同様、詳細は重複するので割愛した。

以上、CNF 利用により、内壁を構成する材料の高断熱化において、表-2.6 には、提案した材料と既存部品の熱抵抗値比較を示す。ここから、熱貫流率を算出すると、「既存部品=0.31w/m<sup>2</sup>k」に対し、「本事業開発品=0.29w/m<sup>2</sup>k」となり、熱貫流率で、0.02w/m<sup>2</sup>k の削減となった。

表-2.6 内壁構成材料の高断熱化による既存部品との比較

現行				CNF利用			
熱抵抗 mK/W	厚み mm	熱伝導率 W/mK	構成部品	構成部品	熱伝導率 W/mK	厚み mm	熱抵抗 mK/W
0.05	12.0	0.220	石膏ボード	軽量コンクリート	0.200	12.0	0.06
2.94	100.0	0.040	ウレタンボード	ウレタン+CNF	0.033	100.0	3.13
0.05	12.0	0.220	石膏ボード	軽量コンクリート	0.200	12.0	0.06

#### ◆浴室壁部品の FS 検証

浴室壁部品においては、住宅設備メーカー独自の仕様もあるが、各社汎用製品として最も多いバリエーションが鋼板壁と言われる構造である（図-2.32）。



図-2.32 既存浴室壁（汎用タイプ）部品の構成

この構成で、鋼板は構造的な役割と意匠性の双方を担っており、石膏ボードは、壁全体の面剛性確保が役割となっている。鋼板部は、熱伝導率は高いものの、厚みが薄いため、断熱化による効果はほぼないと見てよい。したがって、

ターゲットとなるのは、石膏ボード部と断熱材部となる。一方、浴室壁は、住宅構造部分との取り合いがあるため、総厚にも制限がある。一般的には、25mm以下とされているが、ここでは、シミュレーション評価のため、総厚 18mm で比較を行った。

石膏ボード部及び断熱部は、内壁材同様「(1)①イ」の手法を流用するため詳細は割愛するが、石膏ボード厚みが薄くなるため、剛性確保(石膏ボード同等の合成)は必須となる。方向性としては、「(1)①イ」で示すコンクリートとセメント技術の融合におけるセラミックよりの要素を強くすることで薄くする、即ち、断熱材使用量の増大は期待できるが、厚みが 5mm の中での削減のため、こちらも、全体の断熱性には大きく寄与してこないため、開発速度を重視し、「(1)①イ」の手法を活用する。

以上、CNF 利用により、浴室壁を構成する材料の高断熱化において、表-2.7 には、提案した材料と既存部品の熱抵抗値比較を示す。ここから、熱貫流率を算出すると、「既存部品=1.90w/m<sup>2</sup>k」に対し、「本事業開発品=1.86w/m<sup>2</sup>k」となり、熱貫流率で、0.04w/m<sup>2</sup>k の削減となった。

表-2.7 浴室壁構成材料の高断熱化による既存部品との比較

現行				CNF利用			
熱抵抗 mK/W	厚み mm	熱伝導率 W/mK	構成部品	構成部品	熱伝導率 W/mK	厚み mm	熱抵抗 mK/W
0.00	1.0	83.500	銅板	銅板	0.200	1.0	0.00
0.35	12.0	0.034	ウレタンボード	ウレタン + CNF	0.033	12.0	0.36
0.02	5.0	0.220	石膏ボード	軽量コンクリート	0.200	5.0	0.03

#### ◆浴室天井部品の FS 検証

浴室天井も前述した浴室壁同様、住宅設備メーカーによって、様々な素材、形状が使用されている。この中で、型もの、いわゆる射出成形やブロー成形にて製造されたものが多いが、ここでは、社会実装の早期実現を鑑み、導入時のリスクが低い FRP 素材を用いた仕様で検証をした。図-2.33 には、FRP をベースとした浴室天井構成を示す。

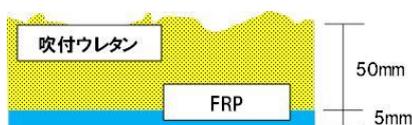


図-2.33 既存浴室天井部品の構成

ここでの構成においては、断熱層が大きなウェイトを占めるため、断熱材の高断熱化が最も効果的となる。ここで、浴室天井は複雑な形状をしているので、断熱材は、吹付系の断熱材が好ましくなる。そこで、ボード系でも提案しているが、CNF 利用による気泡の微細化と空隙シェルの高強度化による空隙率の増加による手法を提案した。特に吹付系断熱材は、スプレー等によるせん断状態で施工するため、シェル部分の強化、即ちできる限り独立気泡に近づけることは、高断熱化において重要なファクターとなる。加えて、「(1)①イ」で提案した FRP による高剛性化手法を応用することで、若干であるが、断熱層を増加させることも付与した。

以上、CNF 利用により、浴室天井を構成する断熱材の高断熱化において、表-2.8 には、提案した材料と既存部品の熱抵抗値比較を示す。ここから、熱貫流率を算出すると、「既存部品=0.75w/m<sup>2</sup> k」に対し、「本事業開発品=0.57w/m<sup>2</sup> k」となり、熱貫流率で、0.18w/m<sup>2</sup> k の削減となった。

表-2.8 浴室天井構成材料の高断熱化による既存部品との比較

現行				CNF利用			
熱抵抗 mK/W	厚み mm	熱伝導率 W/mK	構成部品	構成部品	熱伝導率 W/mK	厚み mm	熱抵抗 mK/W
0.02	5.0	0.240	FRP	FRP+CNF	0.240	2.0	0.01
1.16	50.0	0.043	発泡スチロール	CNFウレタン吹付	0.033	53.0	1.61

以上の結果より、内装部品において、熱貫流率が「内壁部品で 0.29W/m<sup>2</sup> K 以下」、「浴室壁部品で 1.86 W/m<sup>2</sup> K 以下」、「浴室天井部品で 0.57 W/m<sup>2</sup> K 以下」となる部品構成を提案した。この熱貫流率を目標値とし、各種部材の試作に移行した。

## ②部品における断熱性検証

### ア. 内壁利用における基礎評価

本年度は、内壁に用いる発泡無機ボードへの CNF 利用に関する効果の評価を実施した。尚、これら成果は、他の無機ボード素材を利用しているテーマにも適応させる。

#### ◆CNF 添加による補強効果の検証

無機ボードは発泡させることで、強度は低下する。そこで、空隙付与に用いる CNF において、補強の効果が認められるかを評価した。

マトリックスとして非晶質シリカ粒子(平均粒子径 500 nm)、CNF (KY-100S、固形分 25%、ダイセルファインケム社製)、反応溶液として水酸化カリウム

(KOH)水溶液 3 M を用いた。ここで、反応溶液として KOH を用いた理由としては、CNF をシリカマトリックスに均一に分散させるためである。図-2. 3 4 (a)には、CNF を蒸留水に加え、超音波分散処理を施し、ガラスシャーレ上に滴下し乾燥後、光学顕微鏡を用いて観察した画像を示す。

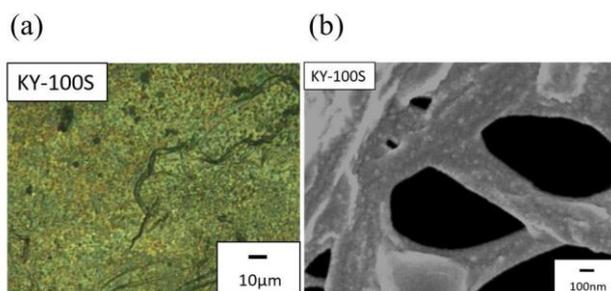


図-2. 3 4 CNF の顕微鏡写真(a)光学顕微鏡、(b)FE-SEM 観察画像

CNF は微小な繊維が束になっていることが確認できた。繊維長は 20-100 $\mu\text{m}$  であった。同様のサンプルをマイクログリッド上に滴下、150  $^{\circ}\text{C}$ 、24 hrs 真空乾燥し、オスミウムコーターを用いてコーティング後、電界放出型走査型電子顕微鏡により観察した。印加電圧は 1.5 kV で観察した二次電子像を図-2. 3 4 (b)に示す。CNF は微細な網目構造を有していることが分かる。微視的な繊維径は 50-200 nm であった。

CNF と 3 M KOH 水溶液を卓上型ニーダー中で 30 min から 24 hrs 混錬後、10 g 採取し 100 ml 蒸留水で希釈、超音波分散器を用いて 5 min 分散処理を施した分散液を作製した。混錬時間ごとにレーザー回折・散乱式の粒度分布測定装置を用いて評価し、図-2. 3 5 に示す。混錬時間 30 min で確認された 300  $\mu\text{m}$  程度の凝集体が 90 min 後には消失し、繊維がほぐれていることが推測される。さらに時間を増やすと、5 hrs 後には再度ピークが現れ、再凝集していることが予測される。シリカマトリックスと混錬する前に、CNF を KOH 水溶液に加え、ニーダーにより処理することが CNF 分散に一定の効果があることがわかった。

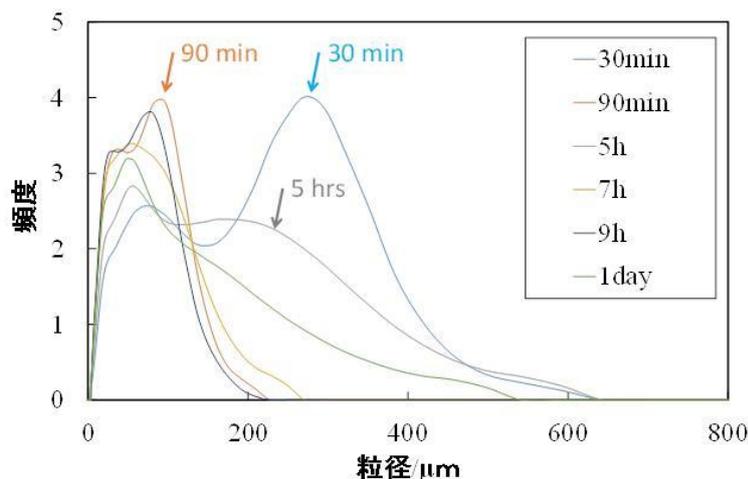
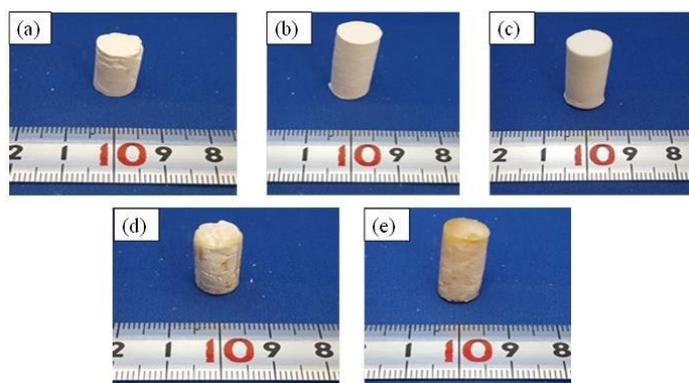


図-2. 35 ニーダー混錬時間の違いによる KOH 水溶液中 CNF 分散性評価

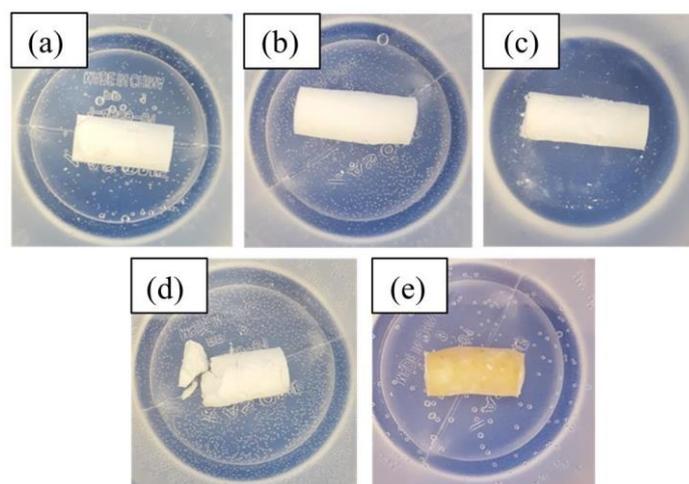
性能を評価する成形体作成は、以下の通り作成した。原料粉体である非晶質シリカ粒子に遊星ボールミルを用い、メカノケミカル処理を 15 min 行った。また、3 M KOH 水溶液に CNF を加え、卓上型ニーダー内で混錬した。処理後のシリカ粒子と混錬後の CNF-KOH 混合物を、自転公転ミキサーを用いて 1000 rpm、1013hPa、30 s の条件で予備混合した。その後、卓上型ニーダーを用い、出力周波数 30 Hz、圧力 0.01 MPa、10 min 混錬、自転公転ミキサーを用い上記と同じ条件で脱泡、10mmφ×20mm 高の円筒型に注型した。80°C、5 hrs の乾燥機に静置（固化促進）後、脱型し、60°C、12 時間乾燥させ、成形体とした。

シリカマトリックスに対し、CNF が 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 wt% となるよう加えた成形体の外観写真を図-2. 36 に示す。すべての条件で成形体の作製が可能であった。CNF 量の増加に伴い、茶色く変色しているが、これはおそらく CNF 中に残っているリグニンの熱劣化によるものと考えられる。



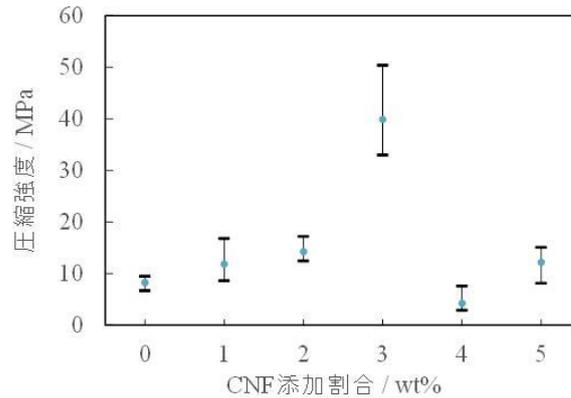
図－2．36 CNF添加量がシリカに対し(a)1.0、(b)2.0、(c)3.0、(d)4.0、(e)5.0 wt%となるよう加えた成形体の外観写真

図－2．37に、これらの成形体を蒸留水中に浸漬し、簡易的に崩壊実験を行った。固化体は、水中に浸漬しても崩壊は見られなかった。4.0 wt%で見られた部分的な崩壊は、混練不十分のためと考えられる。

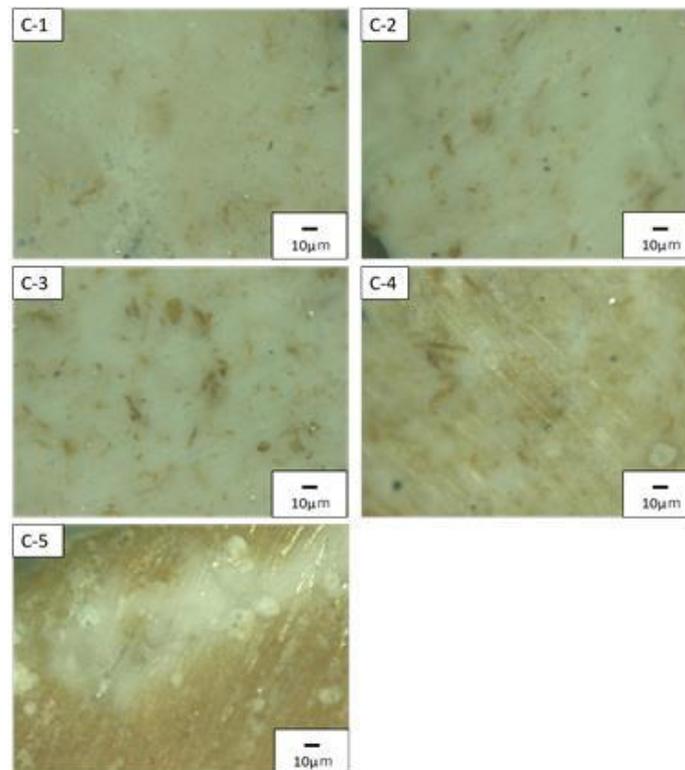


図－2．37 各成形体の崩壊試験

図－2．38に、圧縮強度試験の結果を示す。CNF添加量の増加とともに圧縮強度が増加し、3.0 wt%で最大値約40 MPaを示した。さらにCNF添加量を増やすと強度は低下した。図－2．39に、各成形体断面の光学顕微鏡写真を示す。茶色く見える部分がCNFの凝集した束である。CNF添加が、成形体強度改善に大きく寄与していることが明らかとなった。シリカマトリックス中のCNF分散状態をさらに向上させることで、さらなる強度向上が可能となると考えられる。



図－ 2. 3 8 各成形体の圧縮強度試験



図－ 2. 3 9 各成形体の光学顕微鏡写真

以上より、CNF を KOH 中で処理することで分散性を向上させることが可能であることが示された。また、CNF を加えることで成形体の強度向上が確認できた。シリカマトリックス中の CNF 分散状態をさらに向上させることで、さらなる強度向上が可能となり、強度のばらつきも改善が可能であると考えている。

◆CNF 添加による補強効果の検証

ここでは、CNF による空隙制御能を定量する基礎的評価手法として、気孔形

成材を用いた評価を実施した。

CNF として、セルロース原料由来のナノファイバー(BinFi-s、WMA-10002、2.0 wt%水分散液、スギノマシン製)を用いた。マトリックスとしてシリカ小(平均粒子径 250 nm)、シリカ大(0.2-0.05 mm)、気孔形成材として炭酸カルシウム(平均粒子径 150 nm)を用いた。また、成形体は、以下の方法で製造した。シリカ小、シリカ大、炭酸カルシウム 30%を乾式混合し、セルロース分散液を加え、樹脂製ヘラを用い混合した。その後、10 M KOH 水溶液を加え、再度ヘラで混合した。得られた混合物を、振動を加えながら 40 mm×40 mm×10 mm 高さの亚克力型に注型し、密閉して 60 °C に設定した乾燥機内で 3 d 静置し、固化反応を促進させた。その後脱型し、80 °C に設定した乾燥機内で 24 hrs 乾燥した。得られた成形体は、蒸留水中に浸漬し簡易崩壊試験を行った。また、成形体の断熱評価を行った。

得られた成形体の外観写真を図-2.40に示す。簡易崩壊試験によって固化を確認した。炭酸カルシウムの添加量を、シリカ大小に対し、30 vol%となるように加えた成形体の熱伝導率測定結果を表-2.9に示す。塩酸処理前後で成形体の熱伝導率は 0.223 W/mK から 0.214 W/mK と減少し、断熱性の向上が見られた。塩酸処理をしたことで炭酸カルシウムが溶解し、ナノ孔を形成したため熱伝導率が下がったといえる。以上より、CNF の空隙能を評価するために気孔材を見陥る手法は有用であることが確認された。

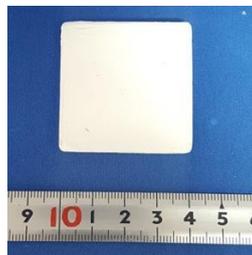


図-2.40 成形体外観写真

表-2.9 成形体熱伝導率測定結果

炭カル添加量(vol%)		30
熱伝導率 (W/mK)	塩酸処理前	0.223
	塩酸処理後	0.214

以上の結果より、発泡無機ボードの発泡評価における CNF 添加効果及びその評価手法の方向性は確認された。この結果を踏まえ、29 年度から、実際の部品展開

への適応を検証する。

#### イ. 浴室壁利用における基礎評価

本年度は、浴室壁部品に用いるボード系ウレタン発泡材への CNF 利用に関する効果の評価を実施した。尚、これら成果は、他のボード系ウレタン発泡材を利用しているテーマにも適応させる。

##### ◆CNF を添加したボード系ウレタン発泡材の試作

ベースの配合としては、ポリオール、イソシアネートに対し、35 倍発泡となるよう水を添加し（水分率 2.0%）、スギノマシン社製 CNF を水に添加、ポリオールと遊星式攪拌脱泡装置で分散後（図-2. 4 1）、イソシアネートとハンドミキサにて混合、200×200×200mm のボックスでフリー発泡の注型成形を行った。図-2. 4 2 には、CNF 添加率の異なる発泡体の写真を示す。



図-2. 4 1 CNF 添加ポリオール

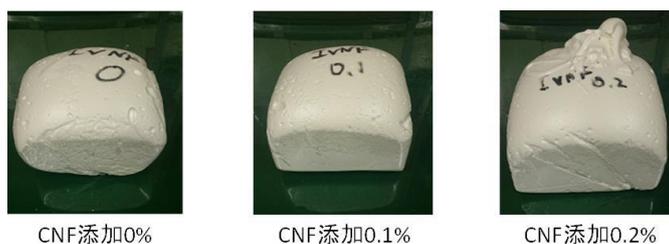


図-2. 4 2 CNF 添加ウレタン発泡体

発泡体成形においては、CNF の有無による影響は認められず、CNF 添加のボード成形への影響はないと判断された。

##### ◆CNF を添加したボード系ウレタン発泡材の評価

図-2. 4 3 には、CNF 添加量とウレタン成形体のコア密度の関係を示す。

CNF を添加することで、密度が小さくなっている。今回、添加した水の量は同量であるため、理論的にはコア密度は同じとなると予想された。この結果から、CNF により発泡した空隙を閉じ込めた可能性が示唆される。図-2.44には、各 CNF 添加量における成形体の断面 SEM 画像を示す。CNF を添加することで、大きな空隙が減少し、均質化されたことが確認された。この結果から、CNF を添加することで、気泡の均質化、大きな空隙の生成を制御することが確認された。

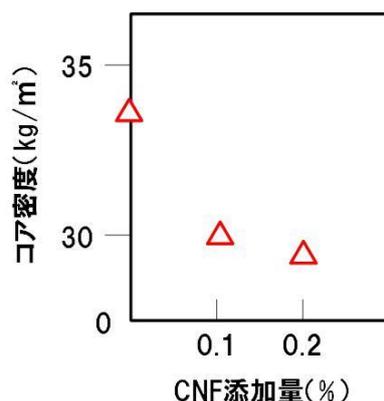


図-2.43 CNF 添加ウレタン発泡体における CNF 添加量とコア密度の関係

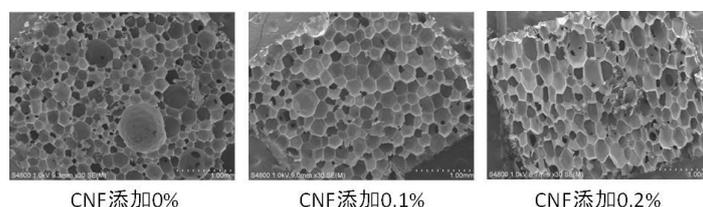


図-2.44 各 CNF 添加ウレタン発泡体断面の SEM 画像

◆CNF を添加したボード系ウレタン発泡材の実用化に向けて

本結果を踏まえて、ボード系ウレタン断熱材の成形においては、大きな課題は生じなかった。但し、発泡倍率が低いボード系の場合、添加する水分が少ないので、CNF 添加量を増大できない点は課題となる。次年度以降、まずは、乾燥 CNF にて添加量増大の効果を検証し、添加量によるさらなる効果が認められた場合は、ポリオール等への置換等 CNF 自体の前処理等の検証も実施する。また、今回のウレタン断面からは、CNF 凝集等は見当たらないことから、分散は問題ないと判断できるが、強度自体は、CNF の有無による差は無かった。添加量が少ないことも影響している可能性はあるため、先の添加量を増加した実験における比較を見て、相容化剤利用等の判断を実施する。

## ウ. 浴室天井利用における基礎評価

本年度は、浴室天井部品に用いる吹付系ウレタン発泡材への CNF 利用に関する効果の評価を実施した。

### ◆CNF を添加した吹付系ウレタン発泡材の試作

ベースの配合としては、ボード系同様、ポリオール、イソシアネートに対し、吹付の場合は、100 倍発泡となるよう水を添加し（水分率 6.5%）、スギノマシン社製 CNF を水に添加、ポリオールと遊星式攪拌脱泡装置で分散後（図-2.37）、イソシアネートとハンドミキサにて混合、200×200×200mm のボックスでフリー発泡の注型成形を行った。図-2.45 には、CNF 添加率の異なる発泡体の写真を示す。

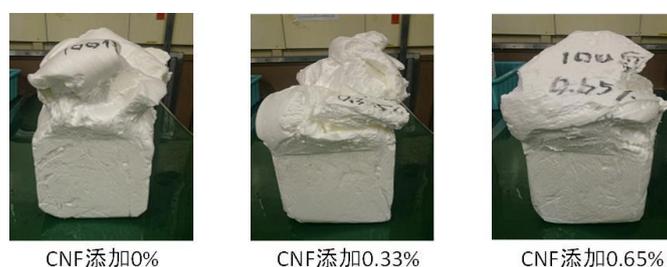


図-2.45 CNF 添加ウレタン発泡体

ボード系同様、発泡体成形においては、CNF の有無による影響は認められず、CNF 添加の成形への影響はないと判断された。

### ◆CNF を添加した吹付系ウレタン発泡材の評価

吹付系ウレタン発泡材は、発泡倍率が高いことが起因すると予想されるが、コア密度に差は生じなかった。図-2.46 には、各 CNF 添加量における成形体の断面 SEM 画像を示す。

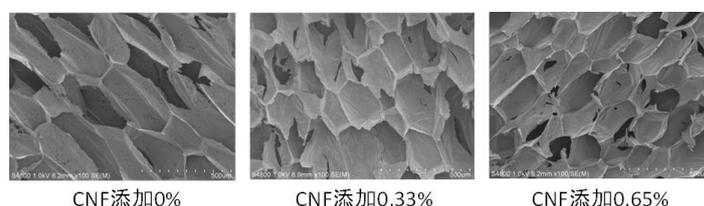


図-2.42 各 CNF 添加ウレタン発泡体断面の SEM 画像

CNF 添加により、空隙のサイズが小さくなる傾向は認められた。ボード系ウレタン発泡材に比べ傾向が認められたのは、CNF 量の違いによる可能性は否定

できない。図-2. 47には、CNF 添加有無の発泡セルの拡大写真を示す。CNF が添加されていないセルには、微細な気孔が生じている。一方、CNF が添加されることで、この気孔は認められなくなっている。CNF を添加した福つけ系ウレタン発泡材のセル中に CNF と思われる繊維状のネットワーク構造が確認されている。この結果から、ウレタン断熱材利用における CNF による補強効果は、有効であると判断できる。

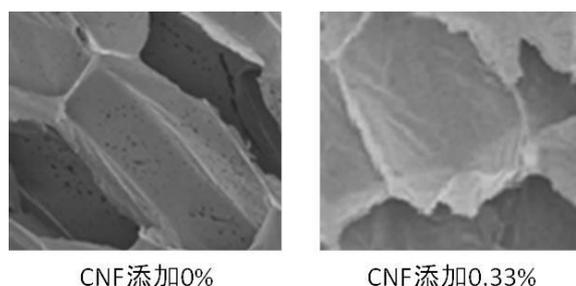


図-2. 47 CNF 有無によるウレタン発泡セルの SEM 画像

### (3) 社会実装に向けた実証

表-2. 10には、FS 検証をベースに算出した住宅外皮における熱還流率と既存部品の熱貫流率を示す。この結果より、既存部品に比べ、住宅の熱貫流率としては、 $0.01\text{w}/\text{m}^2\text{k}$  削減となった。この削減数値から、建築研究所省エネ基準計算に基づいて、暖房エネルギーとして算出すると、住宅1戸当たり年間  $0.2\text{GJ}$  暖房エネルギーが削減される。

表－２． １０ 住宅外皮における熱貫流率比較

(a)既存部品を利用した住宅の熱貫流率

		外皮面積	熱貫流率	温度差係数	熱損失量
天井	無断熱	12.42	4.66	1.00	57.88
	断熱	55.55	0.24	1.00	13.33
階層		15.02	2.52	1.00	37.85
壁		125.06	0.37	1.00	46.27
窓		28.71	6.62	1.00	190.06
ドア		3.51	4.07	1.00	14.29
床	無断熱	3.31	1.59	0.70	3.68
	断熱	62.11	0.38	0.70	16.52
基礎を除く熱損失合計					379.88
基礎等					9.74
熱損失量合計					389.62
外皮面積					308.12
外気平均熱貫流率					1.26

(b)本開発部品を利用した住宅の熱貫流率

		外皮面積	熱貫流率	温度差係数	熱損失量
天井	無断熱	12.42	4.66	1.00	57.88
	断熱	55.55	0.22	1.00	12.22
階層		15.02	2.52	1.00	37.85
壁		125.06	0.35	1.00	43.77
窓		28.71	6.62	1.00	190.06
ドア		3.51	4.07	1.00	14.29
床	無断熱	3.31	1.59	0.70	3.68
	断熱	62.11	0.33	0.70	14.35
基礎を除く熱損失合計					374.10
基礎等					9.74
熱損失量合計					383.84
外皮面積					308.12
外気平均熱貫流率					1.25

表－２． １１には、この暖房エネルギー削減量から算出した CO2 排出量及び削減効果を示す。電力エネルギー換算のみで、住宅 1 戸あたり年間 32.6 kg、エネルギー消費割合を勘案しても、22.0 kgの CO2 削減となり、本事業の目標である 15 kg以上の削減はクリアしている。

表－２． １ １ 本事業開発品利用時における CO2 排出量及び削減効果

●既存住宅部品

		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	燃料別 一次エネルギー (住宅データ)MJ	電力量換算 kWh	CO2 排出原単位	CO2排出量 kg-CO2
A	暖冷房	20.6%		20600	電気	20600	5694.44	0.587	3342.64
B	石油ファンヒーター	6.2%	30.1%	6169.909	灯油	11543.689		0.0712	821.91
	石油ストーブ	5.4%	26.2%	5373.786	灯油				
	エアコン	3.5%	17.0%	3483.010	電気	8657.767	2404.94	0.587	1411.70
	電気カーペット	1.0%	4.9%	995.146	電気				
	ガスストーブ	0.3%	1.5%	298.544	ガス	298.544		0.0602	17.97
	その他	4.2%	20.4%	4179.612	電気				
		20.6%	100.0%	20600		0.2			2251.58

●本事業開発住宅部品

		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	燃料別 一次エネルギー (住宅データ)MJ	電力量換算 kWh	CO2 排出原単位	CO2排出量 kg-CO2
A	暖冷房	20.6%		20300	電気	20300	5638.89	0.587	3310.03
B	石油ファンヒーター	6.2%	30.1%	6109.709	灯油	11431.068		0.0712	813.89
	石油ストーブ	5.4%	26.2%	5321.359	灯油				
	エアコン	3.5%	17.0%	3449.029	電気	8573.301	2381.47	0.587	1397.92
	電気カーペット	1.0%	4.9%	985.437	電気				
	ガスストーブ	0.3%	1.5%	295.631	ガス	295.631		0.0602	17.80
	その他	4.2%	20.4%	4138.835	電気				
		20.6%	100.0%	20300.000		0.2			2229.61

●削減量

		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	燃料別 一次エネルギー (住宅データ)MJ	電力量換算 kWh	CO2 排出原単位	CO2排出量 kg-CO2
A	暖冷房	20.6%		200	電気	200	55.56	0.587	32.61
B	石油ファンヒーター	6.2%	30.1%	601.94	灯油	112.621		0.0712	8.02
	石油ストーブ	5.4%	26.2%	52.427	灯油				
	エアコン	3.5%	17.0%	33.981	電気	84.466	23.46	0.587	13.77
	電気カーペット	1.0%	4.9%	9.709	電気				
	ガスストーブ	0.3%	1.5%	2.913	ガス	2.913		0.0602	0.18
	その他	4.2%	20.4%	40.777	電気				
		20.6%	100.0%	200.000		0.2			21.97

住宅において、部品の最終決定権は、エンドユーザーでないケースがほとんどである。即ち、住宅メーカーが進めた（取り扱っている）部品を利用している。したがって、社会実装するためには、住宅メーカーが取り扱うことが必須となる。住宅メーカーが採用するためには、住宅メーカーにメリットがあり、かつ標準化されている必要となる。住宅メーカーにおけるメリットは、エンドユーザーに進めやすいセールストークであり、コストや使い勝手が従来品と大きく変わらなければ、CO2削減は、エンドユーザーにとっても省エネ（ランニングコストの削減）につながり、十分にセールストークとなる。一方、標準化は、エンドユーザーへの遡求ができれば普及し、普及すれば自ずと標準化されてくる。ここで、最も重要なのが、コストと使い勝手となる。このコストと使い勝手を提供するのは、部品メーカーとなり、動機づけが必要となってくる。部品メーカーへの動機づけの面でも、CO2削減は十分効果があるが、本事業開発品は、CNFと言う新規技術を導入するものの、代替部品である。言い換えれば、低リスクであり、この技術を導入することで事業が発展（例えば、住宅部品以外にも展開できる）することにつながれば、部品メーカーが積極的に住宅メーカーに働きかけ、社会実装が加速化される。そこで、低リスクと事業発展の観点から考察を行った。

◆事業リスクの低い住宅部品

部品メーカーにおける事業リスクとしては、「製品的なリスク」、「資源的なリ

スク」の2点である。「製品的なリスク」としては、品質面が最も憂慮される。そこで、本事業開発品の多くは、既存技術（製品）に CNF を添加する、即ち、仕様変更レベルで対応できる形で提案した。したがって、現状製品の品質知見範囲内で品質を管理することが可能となり、品質面でのリスクは少ない。次に大きな懸念事項は、コストである。CNF 自体は安価な素材ではないため、活用することで、原材料費はアップする。このコストアップ分を CO2 削減による省エネ効果で吸収すると言う捉え方もあるが、部品メーカー対住宅メーカーの関係では、あまり考慮されない。これは、住宅メーカーにとって、新規部品を導入するリスクのバーターとして、省エネ効果は、住宅メーカー自体がエンドユーザーに対する利益分として確保したいと考えているためである。そこで、CO2 削減効果（＝断熱）以外にメリットが必要となってくる。表－2. 12には、本事業開発品の断熱以外のメリットを示す。

表－2. 12 本事業開発品の断熱以外のメリット

(a) 外皮部品における断熱以外のメリット

部品	素材	断熱以外の効果
外壁	バインダレスボード	軽量による運搬性、施工性
	CNF+セルローズ断熱材	吸音、耐久性
	無機発泡ボード	高意匠化による化粧レス
天井	CNF補強銘木合板	補強棧の削減
	グラスウール16K	既存部品を利用
床	CNF発泡WPC	施工性の向上、メンテナンスの軽減
	CNF添加ウレタンボード	防音、防振
	CNF+セルローズ断熱材	吸音、耐久性

(b) 内装部品における断熱以外のメリット

部品	素材	断熱以外の効果
内壁	無機発泡ボード	高意匠化による化粧レス
	CNF添加ウレタンボード	防音
浴室壁	CNF添加ウレタンボード	熱反りの軽減
	無機発泡ボード	ビス補強部品の削減
浴室天井	CNF補強FRP	結露防止
	CNF添加吹付ウレタン	施工性

本事業開発品においては、事業課題推進の中で、これらメリットを提示できる形で開発を進める。最後に、市場浸透、製品化スピードも部品メーカーにおける社会実装では課題となる。FS 評価等で示した本事業開発品を構成する素材は、性能評価（保証）からサプライチェーン、さらには法規制（認定等の取得）まで含めると、実用化にはタイムラグがある。そこで、本事業開発品は、既存部品とまったく同じ構成とした。つまり、部品を構成素材が完成（市場供給可能）した時点で、既存の

構成部品と組み合わせて部品化できる提案とした。これにより、全ての構成部品の市場供給完了を待って部品導入開始ではなく、完成した技術で随時、市場展開できることとなり、部品メーカーにとっても、製品化スピードが速くなる。

「資源的なリスク」としては、人材投資、設備投資と原材料の安定調達が主となる。人的資源は、言い換えれば開発パワーである。これに対して本事業では、図-2. 48に示す産学官連携したコンソーシアム体制を進めており、部品メーカー側をサポートできる体制は確立している。

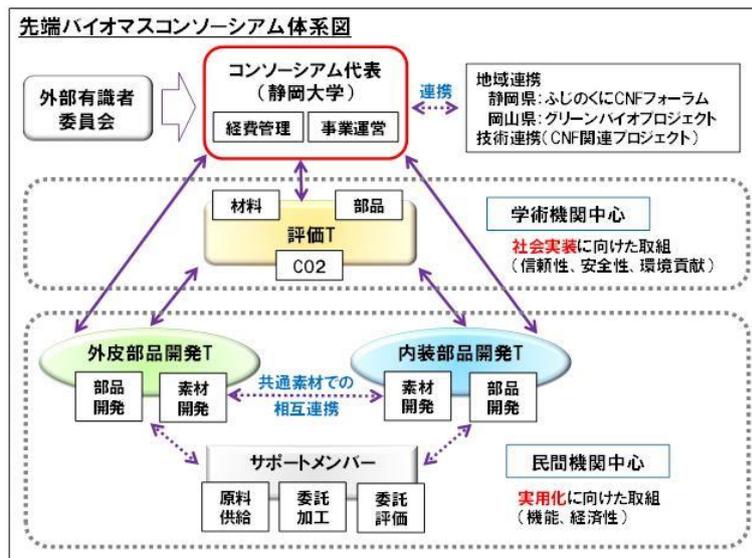


図-2. 48 本コンソーシアム全体の体制図

一方、本事業開発品は、代替製品の位置づけと前述したが、代替製品である以上、売り上げ増大が大幅に見込めない限り、部品メーカーにとって、大きな設備投資は困難となる。そこで、本事業では、可能な限り既存設備を応用することで製品化できる素材構成を提案した。最後に、原材料調達面であるが、前述したとおり、CNF以外は既存原料を利用する形で進めるので、検証しなければならないのは、CNFだけである。本年度はまだ、部品試作評価は着手段階であるため、詳細報告は次年度以降になるが、国内で調達できる CNF をいくつか用いて、複数社購買しても製品化できる仕様を検証していく。

#### ◆事業発展につながる住宅部品

今後、住宅着工件数は、大幅に増大することは期待できない。したがって、前述した「製品のリスク」が懸念されるのであり、本住宅部品が他用途へ展開できれば、部品メーカーの開発も加速する。一方、本事業開発品は戸建新築住宅をターゲットとしているが、部品であるため、リフォームや集合住宅への展開は想定している。

しかしながら、リフォームや集合住宅を含めても住宅市場は拡大市場ではない。そこで、各部品を構成している素材において、他用途への展開の可能性を検証した。表－2. 13には、各部品構成素材と他用途展開の可能性を示すが、本事業開発品は、これらに対応できる形で提案した。

表－2. 13 本事業開発品の他用途展開

構成素材	住宅(本提案以外)	自動車	家電	日用品	その他
ハインダレスボード	屋根材、浴室裏打ち	ダッシュボードカバー等		ホームセンター	家具等
CNF+セルローズ断熱材		FRP用機材		布団等の綿製品	紙製品、衣類
無機発泡ボード	外壁材、化粧タイル			水回り製品	タイル
CNF添加発泡WPC	エクステリア	軽量内装部品	樹脂部品		玩具
CNF添加ウレタン	配管ライニング	間仕切り裏打ち	冷蔵庫		土木工事
CNF補強FRP	キッチン	FRP製品代替	ブレード、外層		土木工事

以上の各種社会実装に向けた検証から、本事業各種開発品の平成35年度スタンダード化に向けたロードマップを作製した(図－2. 49)。ここからも明らかなように、部分展開することで成果の部品展開時期は早い。また、部品展開初期は、コンソーシアムメンバーが中心となるが、平成34年度以降からは、全ての部品メーカーで取り扱える製品へと発展させる。そのためには、研究会等の設立は不可欠で、非営利団体を通じ、規格基準等の標準化を進める。次年度以降は、このロードマップに適合するように部品使用から生産手法まで実証レベルで検証を行う。

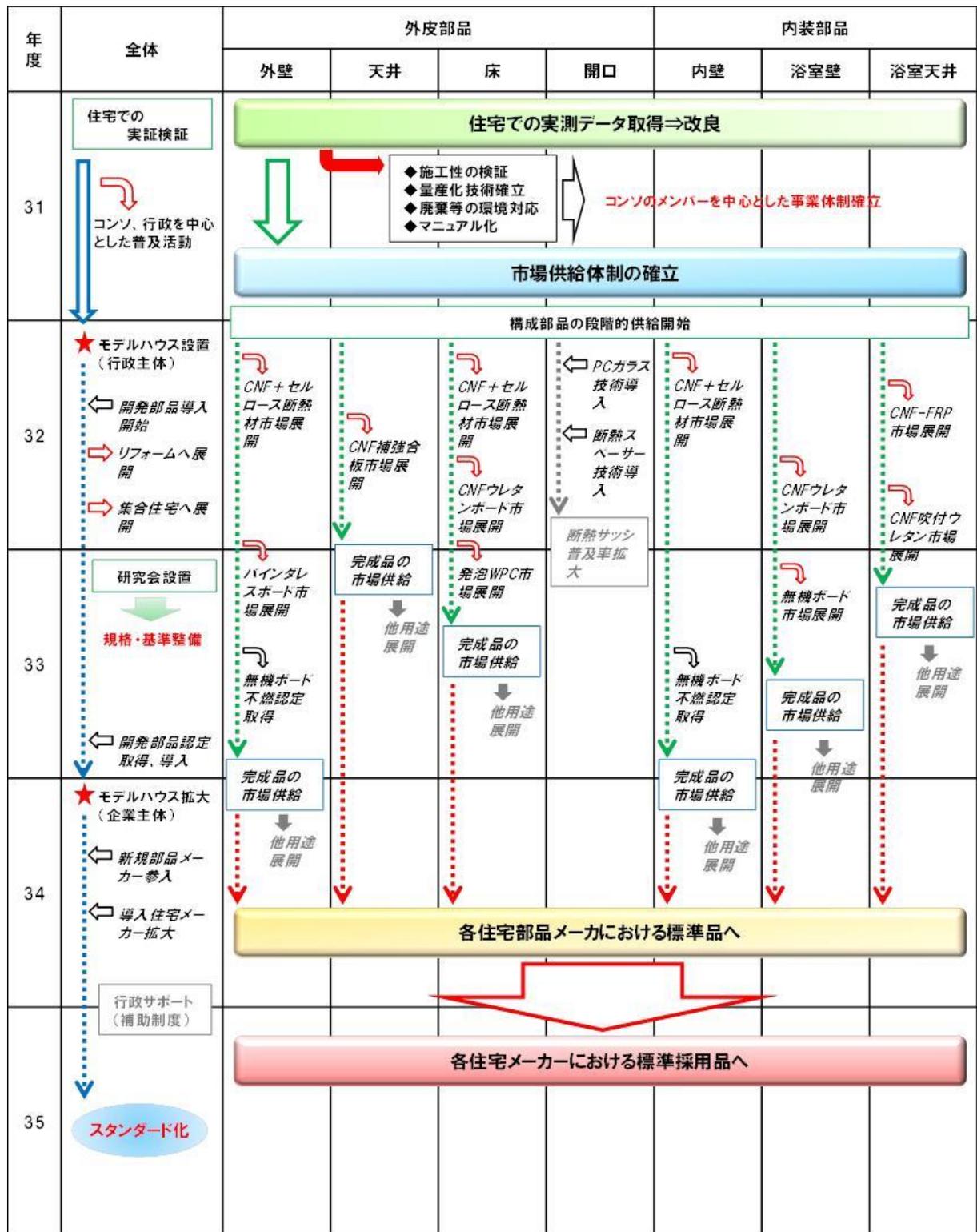


図-2. 49 社会実装に向けたロードマップ