

# 吹込み用繊維質断熱材の長期断熱性能に関する研究

## Study on the Long-term Thermal Performance of Loose-fill Insulation

下ノ菌 慧<sup>1)</sup>、遠藤 卓<sup>2)</sup>、谷口 円<sup>3)</sup>、宮崎 孝司<sup>4)</sup>、岡田 公<sup>5)</sup>、鷺澤 孝夫<sup>6)</sup>、布井 洋二<sup>7)</sup>、  
井上 幹夫<sup>8)</sup>、河合 伸哉<sup>9)</sup>、齋藤 弘<sup>10)</sup>、田畑 薫<sup>11)</sup>、木村 伸一<sup>12)</sup>、吉田 利正<sup>13)</sup>、藤田 隆太<sup>14)</sup>  
Kei Shimonosono<sup>1)</sup>, Suguru Endo<sup>2)</sup>, Madoka Taniguchi<sup>3)</sup>, Koji Miyazaki<sup>4)</sup>, Akira Okada<sup>5)</sup>,  
Takao Uzawa<sup>6)</sup>, Yoji Nunoi<sup>7)</sup>, Mikinari Inoue<sup>8)</sup>, Kawai Shinya<sup>9)</sup>, Hiroshi Saito<sup>10)</sup>, Kaoru Tabata<sup>11)</sup>,  
Shinichi Kimura<sup>12)</sup>, Toshimasa Yoshida<sup>13)</sup> and Ryuta Fujita<sup>14)</sup>

地方独立行政法人北海道立総合研究機構  
建築研究本部  
建築性能試験センター

Building Performance Testing Center

Building Research Department

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization

---

<sup>1)</sup> 建築性能試験センター安全性能部評価試験課研究職員 <sup>2)</sup> 同研究主任 <sup>3)</sup> 北方建築総合研究所建築研究部建築システムグループ研究主幹 <sup>4)</sup> ロックウール工業会 <sup>5)</sup> 日本ロックウール株式会社 <sup>6)</sup> 硝子繊維協会 <sup>7)</sup> 旭ファイバーグラス株式会社 <sup>8)</sup> マグ・イゾベル株式会社 <sup>9)</sup> パラマウント硝子工業株式会社 <sup>10)</sup> 株式会社ワンワールド <sup>11)</sup> 王子製袋株式会社 <sup>12)</sup> 日本製紙木材株式会社 <sup>13)</sup> 吉水商事株式会社 <sup>14)</sup> 株式会社デコス

<sup>1)</sup> Researcher, Performance Testing and Evaluation Section Building Safety Performance Division Building Performance Testing Center <sup>2)</sup> Researcher, Performance Testing and Evaluation Section Building Safety Performance Division Building Performance Testing Center <sup>3)</sup> Senior Research Manager, Building Engineering System Group Building Research Division Northern Regional Building Research Institute <sup>4)</sup> Rock Wool Industrial Association <sup>5)</sup> Nippon Rockwool Corporation <sup>6)</sup> Glass Fiber Association of Japan <sup>7)</sup> ASAHI FIBER GLASS Company Limited <sup>8)</sup> MAG-ISOVER K.K. <sup>9)</sup> Paramount Glass MFG Company Limited <sup>10)</sup> ONE WORLD Corporation <sup>11)</sup> Oji Seitai Company Limited <sup>12)</sup> Nippon Paper Lumber Company Limited <sup>13)</sup> Yoshimizu Syoji Company Limited <sup>14)</sup> Decos Corporation

# 概要 Abstract

## 吹込み用繊維質断熱材の長期断熱性能に関する研究 Study on the Long-term Thermal Performance of Loose-fill Insulation

下ノ菌 慧<sup>1)</sup>、遠藤 卓<sup>2)</sup>、谷口 円<sup>3)</sup>、宮崎 孝司<sup>4)</sup>、岡田 公<sup>5)</sup>、鶴澤 孝夫<sup>6)</sup>、布井 洋二<sup>7)</sup>、井上 幹夫<sup>8)</sup>、河合 伸哉<sup>9)</sup>、齋藤 弘<sup>10)</sup>、田畑 薫<sup>11)</sup>、木村 伸一<sup>12)</sup>、吉田 利正<sup>13)</sup>、藤田 隆太<sup>14)</sup>  
Kei Shimonosono<sup>1)</sup>, Suguru Endo<sup>2)</sup>, Madoka Taniguchi<sup>3)</sup>, Koji Miyazaki<sup>4)</sup>, Akira Okada<sup>5)</sup>, Takao Uzawa<sup>6)</sup>, Yoji Nunoi<sup>7)</sup>, Mikinari Inoue<sup>8)</sup>, Kawai Shinya<sup>9)</sup>, Hiroshi Saito<sup>10)</sup>, Kaoru Tabata<sup>11)</sup>, Shinichi Kimura<sup>12)</sup>, Toshimasa Yoshida<sup>13)</sup> and Ryuta Fujita<sup>14)</sup>

**キーワード** : 吹込み用繊維質断熱材、長期断熱性能、長期沈降試験、促進試験

**Keywords** : Loose-fill Insulation, Long-term Insulation Performance, Long-term Settlement Test, Accelerating Test

### 1. 研究概要

#### 1) 研究の背景

- ・吹込み用繊維質断熱材は、吹込み施工後時間の経過とともに厚さが減少することが定性的に知られており、H28年度に制定予定のJISにおいて吹き増し率を設けて対応することが示されているが、断熱材周辺温湿度の影響がどの程度あるのかなど明らかになっていない。
- ・施工時に断熱材沈降量の経時変化を考慮して増し打ちするなどの対応がとられているが、各メーカーの経験則に基づくものであり、原材料の種類等による差異を十分に考慮したものではない。
- ・断熱材沈降量の経時変化を測定する方法も海外(EN)には存在するが、高価な試験装置を1サンプルで160日も占有するなど、費用と時間の面から利用しやすいものではない。

#### 2) 研究の目的

本研究は、吹込み用繊維質断熱材の長期沈降性状を測定する簡便な方法を確立し、長期断熱性能の把握に資することを目的とする。

### 2. 研究内容

#### 1) 吹込み用繊維質断熱材の経年変化に関する既往研究等の整理 (H29~H31年度)

- ・ねらい : 既に調査、検討が行われている吹込み用繊維質断熱材の経年変化に関する既往研究、文献、報告書等を整理し、長期沈降性状に影響する要因を明らかにする。
- ・試験項目等 : 文献調査

#### 2) 試験施工による吹込み用繊維質断熱材沈降量の経時変化測定 (H29~H31年度)

- ・ねらい : 長期沈降試験では、温湿度が成り行きである屋外実験棟に試験施工し、実環境下での沈降量の経時変化の要因と傾向を把握する。  
促進試験では、高温・高湿条件下に試験施工し、温湿度が沈降量に与える影響を把握する。
- ・試験項目等 : 沈降量測定、温湿度測定、高温・高湿条件下での促進試験

#### 3) 実態調査による吹込み用繊維質断熱材の経年変化調査 (H29~H31年度)

- ・ねらい : 実際に建設された建物において吹込み用繊維質断熱材の沈降量を観察し、実使用条件における経年変化の様子を把握する。
- ・試験項目等 : 実態調査

#### 4) 吹込み用繊維質断熱材の試験方法の検討 (H29~H31年度)

- ・ねらい : 1)~3)の調査を基に吹込み用繊維質断熱材の沈降性状に関する試験方法の検討を行う。
- ・試験項目等 : 試験方法の作成

<sup>1)</sup> 建築性能試験センター安全性能部評価試験課研究職員 <sup>2)</sup> 同研究主任 <sup>3)</sup> 北方建築総合研究所建築研究部建築システムグループ研究主幹 <sup>4)</sup> ロックウール工業会 <sup>5)</sup> 日本ロックウール株式会社 <sup>6)</sup> 硝子繊維協会 <sup>7)</sup> 旭ファイバーグラス株式会社 <sup>8)</sup> マグ・イゾペール株式会社 <sup>9)</sup> パラマウント硝子工業株式会社 <sup>10)</sup> 株式会社ワンワールド <sup>11)</sup> 王子製袋株式会社 <sup>12)</sup> 日本製紙木材株式会社 <sup>13)</sup> 吉水商事株式会社 <sup>14)</sup> 株式会社デコス

<sup>1)</sup> Researcher, Performance Testing and Evaluation Section Building Safety Performance Division Building Performance Testing Center <sup>2)</sup> Researcher, Performance Testing and Evaluation Section Building Safety Performance Division Building Performance Testing Center <sup>3)</sup> Senior Research Manager, Building Engineering System Group Building Research Division Northern Regional Building Research Institute <sup>4)</sup> Rock Wool Industrial Association <sup>5)</sup> Nippon Rockwool Corporation <sup>6)</sup> Glass Fiber Association of Japan <sup>7)</sup> ASAHI FIBER GLASS Company Limited <sup>8)</sup> MAG-ISOVER K.K. <sup>9)</sup> Paramount Glass MFG Company Limited <sup>10)</sup> ONE WORLD Corporation <sup>11)</sup> Oji Seitai Company Limited <sup>12)</sup> Nippon Paper Lumber Company Limited <sup>13)</sup> Yoshimizu Syoji Company Limited <sup>14)</sup> Decos Corporation

### 3. 研究成果

#### 1) 吹込み用繊維質断熱材の経年変化に関する既往研究等の整理

既往の吹込み用繊維質断熱材の沈降試験に係る国内外の規格を確認するとともに、吹込み用繊維質断熱材の長期断熱性能評価に係る論文を整理した。既往の規格・研究論文では、「断熱材周辺温湿度」に着目した事例が少ないことと、沈降前の計測方法など再現性の観点に不十分な点があることが判明した。

#### 2) 試験施工による吹込み用繊維質断熱材沈降量の経時変化測定

吹込み用繊維質断熱材の沈降量測定のために(1)長期沈降試験、(2)促進試験を実施した。(1)長期沈降試験では、1週間に1回程度の頻度で971日間、沈降量を測定した(図1)。セルローズファイバーの沈降量には季節変動があり、夏期の絶対湿度が高くなる条件下で沈降量が大きくなることを明らかにした。(2)促進試験では、①恒温恒湿条件、②振動条件、③(高温高湿+振動)条件の3つの促進試験を実施した(図2)。ロックウールとグラスウールは振動、セルローズファイバーは温湿度と振動のどちらにも影響され沈降することを明らかにした。(表1)

#### 3) 実態調査による吹込み用繊維質断熱材の経年変化調査

長期沈降試験結果の妥当性確認のためにロックウールとグラスウールを施工した住宅各1件ずつ調査した。施工時の吹込み断熱材厚さの写真と調査時の吹込み断熱材厚さを比較し、長期沈降試験での沈降量と概ね同程度であることを確認した。

#### 4) 吹込み用繊維質断熱材の試験方法の検討

以上の検討を踏まえ、吹込み用繊維質断熱材の沈降量を簡便に計測できる試験方法を提案した。試験用容器や測定方法などを検討(図4)し、再現性があり、試験体のばらつきを考慮した試験方法を提案した。

< 具体的データ >

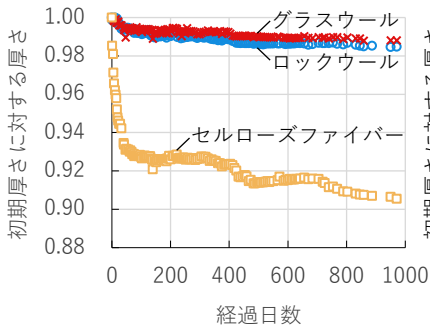
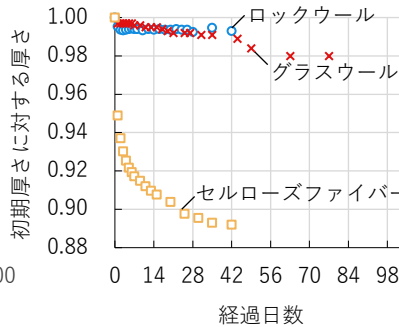
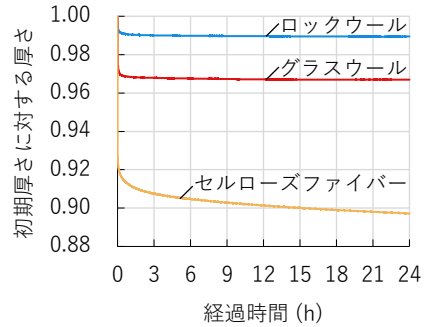


図1 長期沈降試験結果 (2体の平均値)



(a) 高温高湿試験(75°C80%RH)



(b) 振動試験

図2 促進試験結果 (3体の平均値)

表1 各試験結果の比較

※変色・変質が生じたため参考値

	ロックウール	グラスウール	セルローズファイバー
(1)長期沈降試験	1.5%	1.2%	9.5%
(2)促進試験	①恒温恒湿(75°C80%RH)	0.7%	2.1%※
	②振動	1.2%	2.7%
	③(高温高湿+振動)	1.2%	34.5%※
			10.8%
			10.5%
			10.9%



6年経過しても大きく沈降しておらず、長期沈降試験と同等の結果となっていた。

施工時 調査時

図3 実態調査(ロックウール)

	高温高湿試験	振動試験
試験用容器	メッシュ状の容器 300mm以上 300mm以上	変形しない木製容器 600mm以上 600mm以上 300mm以上
試験体施工	試験体数は3以上とする。	
試験条件	75°C80%RH	周波数 25Hz、加速度 2.03G
試験時間	直近3回の変動が0.5%以下となるまで継続する。	24時間
測定位置	中心1点	容器外周面から150mm以上離れた位置で5点
沈降量	沈降量の標準偏差も考慮した沈降量を算出する。	
適用	セルローズファイバー	すべての材料

図4 試験方法の提案

### 4. 今後の見通し

本研究で提案した試験方法は共同研究先の団体においてデータを蓄積した上で、JIS改定時に試験法としての採用を目指す。

# 目次

1. はじめに	
(1) 研究の背景と目的	1
(2) 研究フロー	1
2. 吹込み断熱材の沈降量に関する既往研究・既往試験規格の調査	
(1) 目的	2
(2) 既往研究調査	2
(3) 既往試験規格調査	3
(4) 小括	3
3. 実環境下における吹込み断熱材の沈降量測定・調査	
(1) 目的	4
(2) 試験・調査概要	4
(3) 長期沈降試験	4
(4) 実住宅調査	7
(5) 小括	8
4. 吹込み断熱材の沈降に影響を及ぼす環境条件の検証	
(1) 目的	9
(2) 試験概要	9
(3) 恒温恒湿試験	9
(4) 振動試験	12
(5) (高温高湿+振動) 試験	13
(6) 小括	14
5. 吹込み断熱材の沈降量測定のための試験方法の提案	
(1) 目的	15
(2) 試験方法(案)	15
6. まとめ	18

## 1. はじめに

### (1) 研究の背景と目的

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は IPCC 第 5 次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約<sup>[1-1]</sup>を公表しており、1880 年から 2012 年の期間に地表面温度が 0.85℃上昇していることが報告されている。工業化以降、人為起源の温室効果ガス（GHG）の排出は大気中の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）、メタン（CH<sub>4</sub>）、一酸化二窒素（N<sub>2</sub>O）の濃度を大きく増加しており、これが主な気候変動の原因となっている。これを受け、我が国においては、2020 年以降の新たな温室効果ガス排出削減目標として、CO<sub>2</sub>排出量を 2030 年度に 2013 年度比で 26%削減する目標が掲げられている。

我が国のエネルギー需給は特に東日本大震災以降一層ひっ迫しており、国民生活や経済活動への支障が懸念されている。他部門（産業・運輸）のエネルギー消費量が減少・微増する中、業務部門・家庭部門のエネルギー消費量が大きく増加し、現在では全エネルギー消費量の約 3 割を占めている<sup>[1-2]</sup>。このような社会情勢を踏まえ、建築物における省エネルギー対策の抜本的強化が必要不可欠であると言われている。平成 29 年度には建築物省エネ法が改正され、2,000m<sup>2</sup>以上の建築物に対して省エネ基準適合義務、300m<sup>2</sup>以上の住宅・建築物に対して省エネ計画の着工前の届出義務が新設され、一層の省エネが期待されている。

寒冷な気候の北海道では、住宅における断熱性能の重要性が早くから認知されており、木造戸建住宅の天井断熱に吹込み用繊維質断熱材（以降、吹込み

断熱材）が多く採用されている。吹込み断熱材は複雑な形状の小屋裏空間にも施工性が高く、吹込み厚さの調節で所定の断熱性能を確保することが可能である。一方で、吹込み断熱材は施工後、吹込み厚さが経時的に沈降する性質があることが知られている。そのため、所定の断熱性能を発揮するためには、沈降量を見込んだ吹き増し率を設定する必要がある。2016 年に改正された日本工業規格（JIS）<sup>[1-3]</sup>において、吹き増し率は断熱材製造業者が指定することになった。しかし、断熱材種別や周辺環境に応じた沈降量に関するデータがこれまで十分に整備されておらず、各メーカーの経験則等に基づき、吹き増し率が設定されてきた。

そこで、本研究では、吹込み断熱材の沈降量に関するデータを蓄積し、適切な吹き増し率設定のための試験方法を提案することを目的とする。

### (2) 研究フロー

研究フローを図 1-1 に示す。第 2 章では、吹込み断熱材の沈降量に関する既往研究・既往試験規格を調査・整理する。第 3 章では、吹込み断熱材を試験施工し、温湿度が制御されていない空間における沈降量（長期沈降試験）を測定する。また、長期沈降試験結果の妥当性確認のために、吹込み断熱材を施工した実住宅を調査する。第 4 章では、一定温湿度条件下・振動条件下における沈降量（促進試験）を測定し、吹込み断熱材の沈降量に関するデータを蓄積する。これら結果を基に、第 5 章では、吹込み断熱材の沈降量を簡便に測定できる試験方法を提案する。

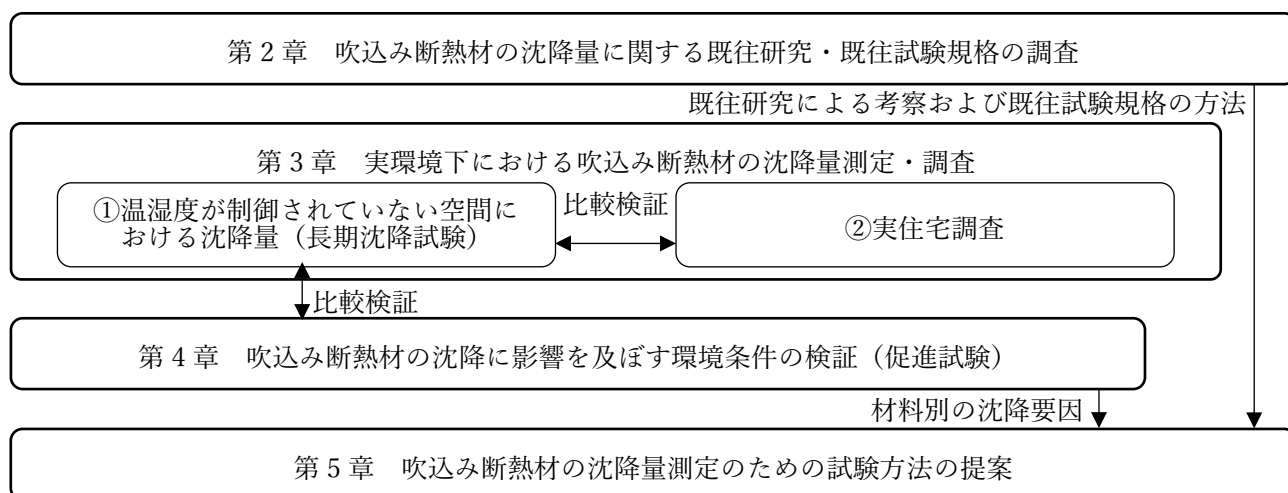


図 1-1 研究フロー

## 2. 吹込み断熱材の沈降量に関する既往研究・既往試験規格の調査

### (1) 目的

本章では、国内および国外において、既に調査、検討が行われている吹込み断熱材の沈降量に関する既往研究・既往試験規格を調査・整理し、長期沈降性状に影響する要因を明らかにする。

### (2) 既往研究調査

#### 1) 実住宅における吹込み断熱材の調査

調査①：吹込み断熱材を施工した住宅における断熱材厚さおよび密度を調査した報告 (Penney et al., 1991)<sup>[2-1]</sup>がある。ロックウール (以降、RW) およびグラスウール (以降、GW) が施工された住宅を対象として、アメリカのジョージア州の住宅を数百件以上調査している。1mmの精度を有する金属測定スケールを用いて各住宅5点の厚さを測定し、密度を推計している。密度と熱抵抗値の関係からR値を推計し、約半数の住宅でR値が設計値以下となっていることを明らかにしている。

調査②：スウェーデンでは、1つの住宅において吹込み断熱材を施工後、7年経過したときの吹込み断熱材厚さを測定した報告 (Svennerstedt, 1993)<sup>[2-2]</sup>がある。本調査では、RW、GW、セルローズファイバー (以降、CF) を対象に測定している。施工後1年ではRWとGWは4%、CFは13%沈降しており、施工後7年ではRWとGWは4%、CFは17%沈降していた。断熱材密度、屋根裏の気候条件、建物の振動が吹込み断熱材の沈降量に影響を与えることを明らかにしている。なお、CFは小さな材料片で構成されており、それらが互いに固定されていないことが他の2つの材料と比較して沈降する主要因と推察されている。また、本実測を用いて、30年後の沈降量を予測する要素線形粘弾性モデルを提案し、RWとGWは6%、CFは27%沈降することを予測している研究例もある (Svennerstedt, 1995)<sup>[2-3]</sup>。

#### 2) 実験室における吹込み断熱材の沈降量測定

測定①：吹込み断熱材を一定温湿度に保管し、相対湿度が沈降量に及ぼす影響を試験している例

(Svennerstedt, 1993)<sup>[2-2]</sup>がある。その研究では、2週間おきに23°C50%RHと23°C90%RHを繰り返し、8週間沈降量を測定している。また、建物の常時微動を模擬した振動を0.15m/s<sup>2</sup>または0.30m/s<sup>2</sup>として与えるほか、一時的な大きな振動 (Shock)

を1m/s<sup>2</sup>または2m/s<sup>2</sup>として1週間に1回与えている。RWは常時振動0.15m/s<sup>2</sup>でShockを与えない場合に0.8%の沈降であったが、常時振動0.30m/s<sup>2</sup>でShock1.0m/s<sup>2</sup>のときに1.9%の沈降であった。一方で、CFは常時振動0.15m/s<sup>2</sup>でShockを与えない場合 (密度32.0kg/m<sup>3</sup>)に13.5%の沈降、常時振動0.30m/s<sup>2</sup>でShock1.0m/s<sup>2</sup>の場合 (密度36.3kg/m<sup>3</sup>)に7.7%の沈降であった。これらの結果より、RWとGWは振動が主要因で沈降し、CFは気候が主要因で沈降することを明らかにしている。また、試験体の密度も沈降量に影響し、高密度な試験体ほど沈降量が小さいことを明らかにしている。

測定②：振動および衝撃を与えた場合の沈降密度を測定している例 (Yarbrough et al., 1983)<sup>[2-4]</sup>がある。その研究では横振動と縦振動 (落下衝撃) を与える2種類の実験を行っており、沈降密度を測定している。横振動は振幅2.5mm、周波数10Hzの振動を1800秒 (30分) 与える方法であり、試験前の密度に対する試験後の密度の比 (密度比) はRWが1.11、GWが1.18、CFが1.03であった。落下衝撃は19mmの高さから200回落下させる方法であり、密度比はRWが1.75、GWが1.45、CFが1.27であった。

測定③：CFのみに着目し、長期沈降挙動を標準気候、屋外気候、振動の3つの条件下において調査している例 (Bock et al., 2015)<sup>[2-5]</sup>がある。本調査では、穴あきメタルボックス (300mm[w]×300mm[l]×400mm[h])にCFを施工 (30kg/m<sup>3</sup>と45kg/m<sup>3</sup>)し、標準気候 (20°C65%RH) 屋外気候、振動 (周波数68Hz、加速度18.63m/s<sup>2</sup>) で沈降量を測定している。最も沈降したのは屋外気候であり、振動、標準気候の順であった。なお、屋外気候のときに約100mm、振動を与えたときに約40mm、標準気候のときに約30mm沈降していた。

#### 3) その他

その他の研究として、材料の構造が沈降挙動に与える影響を評価する研究 (Tremi et al., 2012)<sup>[2-6]</sup>や、吹込み断熱材の沈降特性を表す簡易式の提案 (Svennerstedt, 2001)<sup>[2-7]</sup>などもある。また、外壁部を対象とした吹込み断熱材の沈降特性を明らかにした研究例 (Rasmussen, 2005)<sup>[2-8]</sup>などもあるため、必要に応じて参照されたい。

### (3) 既往試験規格調査

本節では、吹込み断熱材の沈降量を測定するための既往試験規格を調査する。沈降を促進するための条件、試験用容器、試験期間を主に調査する。

#### 1) 国際標準化規格 (ISO) <sup>[2-9]</sup>

本規格は 2012 年に規定されている。屋根および天井部を対象としているものであり、温湿度による促進試験方法である。試験用容器は穴あきメタルボックスであり、穴の面積は 4mm<sup>2</sup>、グリッド厚さは 1mm と決められている。また、容器の大きさは縦 800mm (±10mm)、横 700mm (±10mm)、高さ 300mm (+20mm) である。恒温恒湿槽は 5 (±1) °C~60 (±1) °C、50 (±5) %RH~85 (±5) %RH に制御できる製品を使用し、吹込み断熱材の厚さは 9 点で測定する。

試験体を施工後、最低 6 時間は 23°C50%RH に保管した後に、以下の 4 サイクルを実施する。

- ① : ②~④を 12 時間サイクル (40 日間)
- ② : 23°C85%RH (40 日間)
- ③ : 60°C5%RH (40 日間)
- ④ : 26°C85%RH (40 日間)

これらのサイクル前後の 9 点の平均厚さを測定値とし、沈降量を測定するものであるが、沈降量のデータを取得するために 160 日間要する。

#### 2) 英国規格 (BS) <sup>[2-10]</sup>

本規格は 1989 年に規定されており、振動による促進試験方法である。試験用容器は内表面が滑らかな木製で構成し、容器の大きさは縦 600mm、横 300mm、高さ 900mm である。

試験体を施工後、周波数 24Hz、振幅 1mm の振動を 16 時間与え、沈降率を ([試験前厚さ] - [試験後厚さ]) / (試験前厚さ) により算出する。

#### 3) 建築省エネルギー機構 (IBEC) <sup>[2-11]</sup>

本規格は振動による促進試験方法である。試験用容器は 910mm×910mm×200mm の変形しない容器を用いている。試験は周波数 25Hz、試験体枠の 1 辺の中央部付近で約 125dB の振動を 24 時間与えるもの

である。これは東京の交通振動 20 年分に相当するものである (東京都環境白書 2004 による計測値を採用している)。測定前後の沈降量はノギスで 5 点測定するものであるが、ノギスによる測定方法は再現性の点で改善の余地があると考えられる。

なお、2020 年 3 月現在、本規格は存在していない。

### (4) 小括

本章では、吹込み断熱材の沈降量に関する既往研究・既往試験規格を調査・整理した。

既往研究の調査では、吹込み断熱材沈降の主要因は RW と GW は「振動」、CF は「気候」であることが判明した。また、「吹込み断熱材の密度」はすべての材料に影響する (高密度な試験体ほど沈降量が小さい) ことが分かった。しかし、CF は気候に影響するとされているものの、Svennerstedt や Bock らの報告では標準気候 (23°C) での沈降量測定に留まっている。国内の実住宅の小屋裏温度は夏期に 60°C を超えることもあることから、高温高湿条件下における沈降量データを蓄積する必要がある。

試験規格の調査では、温湿度による促進試験方法と振動による促進試験方法を調査した。ISO は温湿度による促進試験方法を規定しており、試験条件も詳細に定められている。しかし、沈降量のデータを取得するために 160 日間要し、費用と時間の面から実際にその方法を採用することは難しいと考えられる。BS と IBEC では振動による促進試験方法を規定している。BS の方法は試験根拠が不明瞭であり、採用が難しいと考えられる。IBEC は東京の交通振動 20 年分を 1 日に圧縮する方法を採用しているが、沈降量の測定方法がノギスであり、測定の再現性に改善の余地があると考えられる。

これら調査を踏まえ、次章以降では、吹込み断熱材の沈降量データを蓄積するための実験室実験を行い、第 5 章にて、吹込み断熱材の沈降量を簡便に測定できる試験方法の提案につなげる。

### 3. 実環境下における吹込み断熱材の沈降量測定・調査

#### 定・調査

##### (1) 目的

本章では、実環境下における吹込み断熱材の沈降量を測定し、4章の実験室実験の結果との比較検証に用いるデータを取得することを目的とする。

##### (2) 試験・調査概要

実環境下における吹込み断熱材の沈降量を把握するために、以下の試験および調査を行う。

①長期沈降試験：温湿度が制御されていない空間に吹込み断熱材を施工し、複数年にわたる長期の吹込み断熱材の沈降量を測定する。

②実住宅調査：吹込み断熱材が施工された実住宅を調査し、長期沈降試験結果の妥当性を確認する。

##### (3) 長期沈降試験

###### 1) 試験方法

北海道立総合研究機構建築研究本部（北海道旭川市）の敷地内に建つ幅 2.7m、奥行き 11.2m、最高高さ 3.3m の木造平屋建の建物（図 3-1）において実施した。ドアの開閉による気流の侵入を防止するために、建物の入口にシートを設置した（図 3-2）。

試験用容器は構造用合板 9mm で構成されており、外形寸法 900mm×900mm、高さ 450mm で製作し、吹込み断熱材を施工した（図 3-3）。試験体概要を表 3-1 に示す。RW は 1 製品 2 検体、GW は 6 製品 8 検体、CF は 4 製品 8 検体用意した。試験体の質量は試験用容器と試験体の合計質量から試験用容器の質量を差し引き算出した。測定概要を表 3-2 に示す。試験体は 2017/06/01(木)に施工し、同日を初日として測定した。初日から 1 カ月は週 3 回測定していたが、以降は沈降量に応じて測定間隔を伸ばした。測定にはレーザー距離計（BOSCH GLM 250 VF Professional）を用いた。測定方法は図 3-4 に示す通りであり、吹込み断熱材にアルミ箔を載せ、箱上端からの距離をレーザー距離計により測定し、箱内

Professional) を用いた。測定方法は図 3-4 に示す通りであり、吹込み断熱材にアルミ箔を載せ、箱上端からの距離をレーザー距離計により測定し、箱内



図 3-1 長期沈降試験



図 3-2 シート設置状況



図 3-3 試験用容器

表 3-1 試験体概要

材料	記号	初期厚さ* (mm)	質量 (kg)	かさ密度 (kg/m <sup>3</sup> )
RW	A	280.8	7.63	34.9
	A	275.0	7.26	33.9
GW	B	309.8	4.90	20.3
	B	310.2	4.57	18.9
	C	297.4	3.64	15.7
	D	303.7	5.01	21.2
	E	278.5	4.79	22.1
	E	294.5	4.94	21.6
	F	300.4	3.17	13.6
CF	G	302.0	3.65	15.5
	H	273.7	5.65	26.5
	H	277.2	6.09	28.3
	I	285.0	6.40	28.9
	I	282.7	6.63	30.1
	J	251.6	6.04	30.9
	J	262.4	6.51	31.9
	K	271.8	5.88	27.8
K	296.6	6.73	29.2	

※：初期厚さは試験体施工直後に測定したものであり、9 点で測定した平均値を示している。

表 3-2 測定概要

##### 【間隔】

2017/06/01 ~ 2017/06/30: 毎週月、水、金曜日

2017/06/30 ~ 2018/02/20: 毎週火、木曜日

2018/02/20 ~ 2019/03/05: 毎週火曜日

2019/03/05 ~ 2019/10/28: 隔週火曜日

2019/10/28 ~ : 4 週間おきの火曜日

##### 【方法】

測定機器: BOSCH GLM 250 VF Professional

測定方法: 図 3-4 による



寸高さから測定値を差引いて吹込み断熱材厚さとした。吹込み断熱材厚さは9点で測定し、平均値で表すことにした。1時間間隔で測定した室内の乾球温度と相対湿度を図3-5、測定した乾球温度・相対湿度から Tetens の式によって算出した絶対湿度を図3-6に示す。最高気温は2017/07/15に33.8℃、最低気温は2018/02/03に-7.3℃であった。絶対湿度は2018/07/31に最大値22.1g/kg(DA)であった。

2) 試験結果および考察

971日後の長期沈降試験結果を表3-3に示す。

971日後でRWは1.5%、GWは1.2~1.9%、CFは8.5~10.7%の沈降率であった。沈降量に換算するとRWは4.2mm、GWは3.5~5.7mm、CFは24.1~29.6mmであった。沈降の推移を図3-7に示す。RWとGW(記号:A~G)には季節変動はなく、971日後では、4週間に1回の測定でも測定ごとに0.1%以上の変化は見られない。一方で、CF(記号:H~K)には季節変動が見られ、絶対湿度が上昇する夏期において沈降が進んでいた。299~439日目(2018/03/27~2018/08/14)の期間で1.0~1.6%沈降が進んでおり、670~803日目(2019/04/02~2019/08/13)の

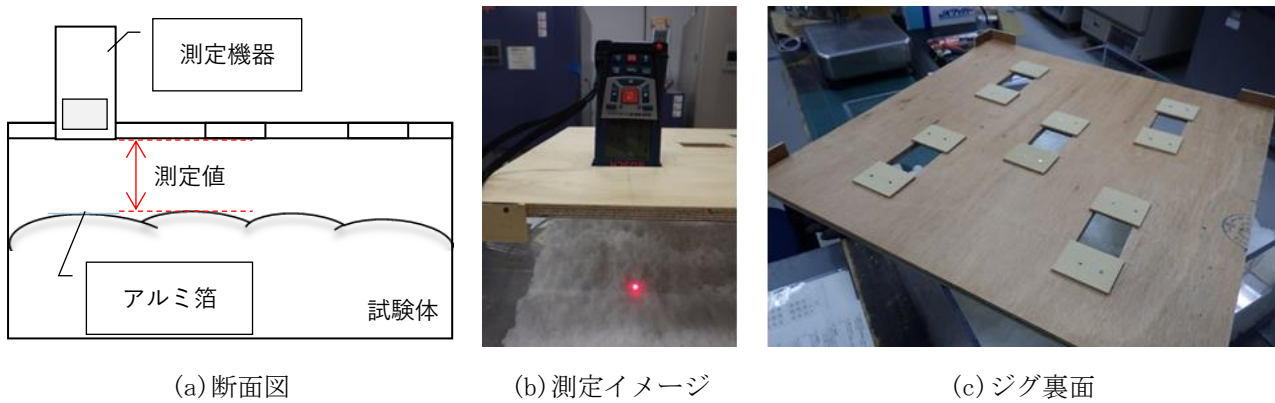


図3-4 測定方法

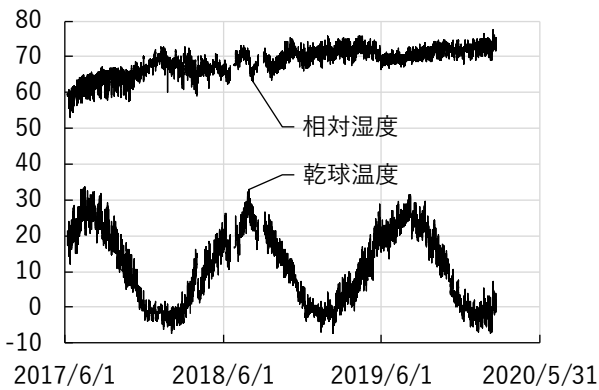


図3-5 室内乾球温度・相対湿度

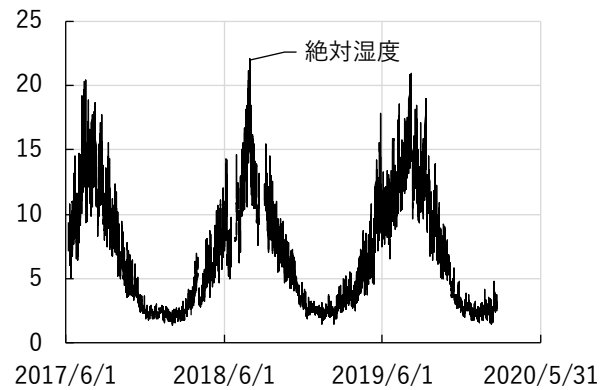


図3-6 室内絶対湿度

表3-3 長期沈降試験結果 (971日後)

記号	初期厚さ※ (mm)	971日目厚さ※ (mm)	沈降率 (%)	記号	初期厚さ※ (mm)	971日目厚さ※ (mm)	沈降率 (%)
A	277.9	273.7	1.5	G	302.0	298.5	1.2
B	310.0	306.3	1.2	H	275.4	245.8	10.7
C	297.4	292.9	1.5	I	283.9	259.8	8.5
D	303.7	298.0	1.9	J	257.0	232.4	9.6
E	286.5	282.4	1.4	K	284.2	257.3	9.5
F	300.5	296.7	1.3				

※: 厚さは各材料の平均値を示している。

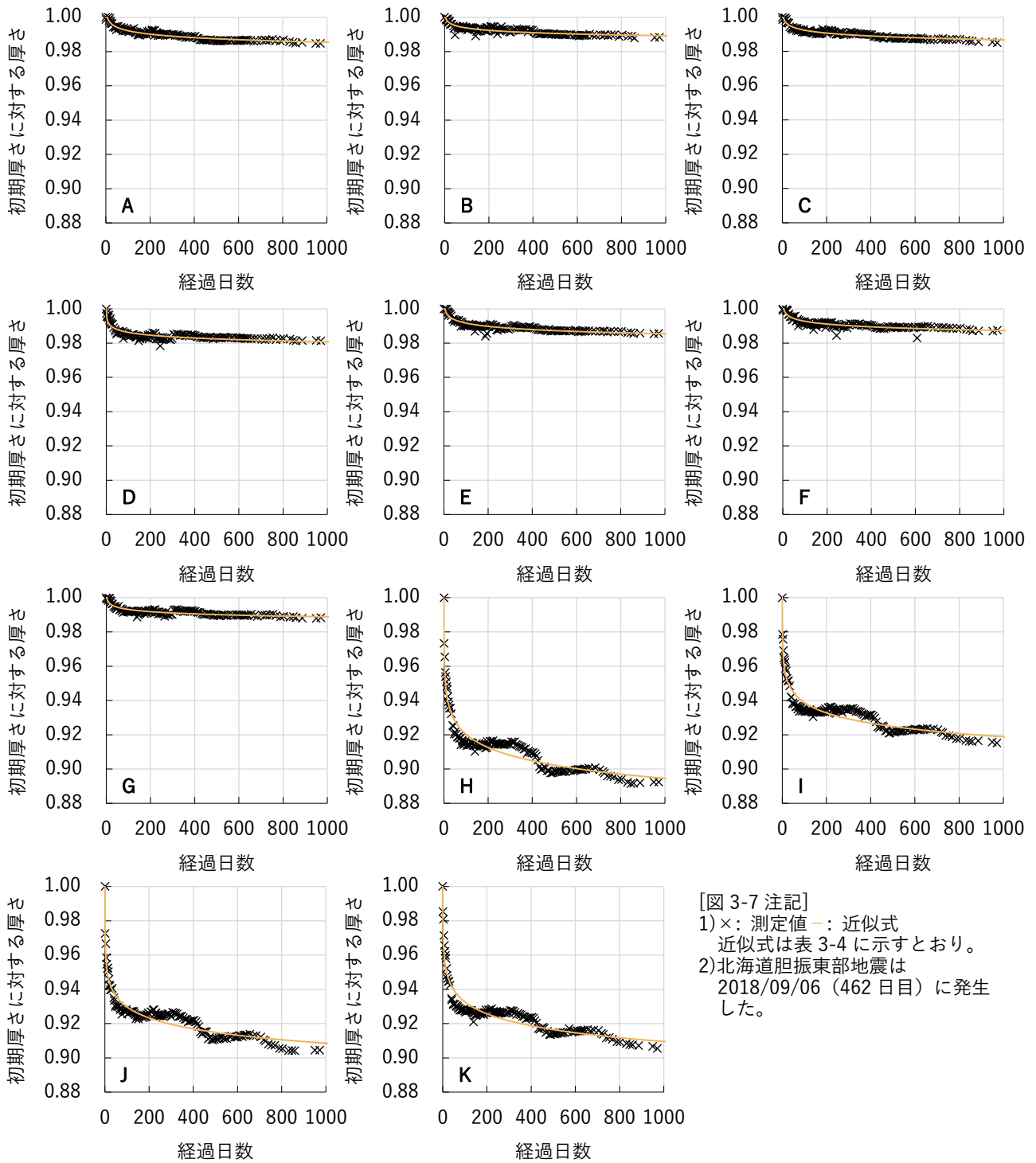


図 3-7 沈降の推移

表 3-4 近似式の係数 (近似式:  $s = a \times \log(t) + b$   $s$ : 初期厚さに対する厚さ,  $t$ : 経過年数)

記号	a	b	記号	a	b	記号	a	b
A	-0.0068	0.98839	E	-0.0062	0.98818	I	-0.0202	0.92744
B	-0.0070	0.98952	F	-0.0054	0.98973	J	-0.0236	0.91612
C	-0.0057	0.98921	G	-0.0044	0.99071	K	-0.0234	0.91953
D	-0.0055	0.98324	H	-0.0259	0.92744			

期間では0.5～0.8%沈降している。2019年度の夏期の沈降量は2018年度の夏期の沈降量よりも小さくなっているが、今後も沈降する可能性があるため、継続して測定する予定である。なお、図中の近似式 (Svennerstedt 2001) <sup>[2-7]</sup> は最小二乗法により係数を決定した (表 3-4)。

#### (4) 実住宅調査

##### 1) 調査方法

###### ・沈降量の観察

施工時に撮影した写真と同じ画角で写真を撮影する。これらの厚さを比較し、長期沈降試験結果の妥当性を確認する。なお、施工時の写真は厚さスケールが写っているものに限定する。

###### ・複数点の厚さ測定

吹込み断熱材の厚さを複数点測定し、起伏の有無等を確認する。なお、測定には図 3-8 に示すような 600mm のポール状の測定器具を用いる。

##### 2) 調査結果および考察

###### ①RW を施工した住宅

建物外観写真を図 3-9、調査概要を表 3-5 に示す。埼玉県春日部市に建つ木造戸建住宅であり、2012/07/30(月)に吹込み断熱材 (RW) を施工している。調査は丁度 6 年後の 2018/07/30(月)に実施した。

厚さ測定状況を図 3-10 に示す。屋根裏点検口から調査できる範囲で厚さを測定した。3 点測定したところ、400mm、450mm、500mm となっており、起伏が大きい様子が観察された。また、厚さスケールを施工時と調査時の写真により比較したところ (図 3-11)、目視の範囲では大幅な沈降は観察されず、長期沈降試験結果 (1.5%[約 4mm]沈降) と同等の結果であると推察される。



図 3-8 厚さ測定器具



図 3-9 建物外観

表 3-5 調査概要

<b>【建物概要】</b> 立地: 埼玉県春日部市、延床面積: 104.96m <sup>2</sup> 断熱材施工: 2012/07/30(月)
---------------------------------------------------------------------------------

<b>【天井断熱材】</b> 材料: RW、設計厚さ: 不明
-----------------------------------

<b>【調査日時】</b> 2018/07/30(月)
--------------------------------



図 3-10 厚さ測定状況



(a) 施工時写真



(b) 調査時写真



(c) スケール厚確認

図 3-11 厚さスケール比較

## ②GWを施工した住宅

建物外観写真を図3-12、調査概要を表3-6に示す。北海道函館市に建つ木造平屋建の公営住宅であり、2000年に竣工している。天井断熱材にはGWを使用しており、設計厚さは300mmであった。調査は17年経過した2017/12/12(火)に実施した。

厚さ測定状況を図3-13に示す。2点測定したところ、約320mm程度を示しており、設計厚300mmに対して7~8%吹き増しされていた。また、厚さスケールを施工時と調査時の写真により比較した(図3-14)。本建物は3戸長屋形式であり、施工時の写真の住戸が特定できなかったため、同一箇所での経年変化は確認できなかった。施工業者はいずれの住戸も同一であるため、建設時の施工状況は変わらないと仮定すれば、目視の範囲では明らかな沈降は観察されず、長期沈降試験結果(1.2~1.9%[約3~6mm]沈降)と同等の結果であると推察される。

### (5) 小括

本章では、実環境下における吹込み断熱材の沈降量測定のために、温湿度が制御されていない空間に吹込み断熱材を施工し、約1000日間の沈降量データを取得した。RWは1.5%、GWは1.2~1.9%、CFは8.5~10.7%の沈降率であった。また、CFの沈降には季節変動があり、絶対湿度が上昇する夏期に沈降が進むことが明らかとなった。

また、長期沈降試験結果の妥当性確認のために、実住宅に施工された吹込み断熱材の厚さを施工時の写真と比較して確認した。RWとGWを施工した住宅においては、目視の範囲では明らかな沈降は観察されなかった。これは、長期沈降試験結果と概ね同程度であり、長期沈降試験の妥当性を確認した。



図3-12 建物外観

表3-6 調査概要

#### 【建物概要】

立地: 北海道函館市、延床面積: 約204.93m<sup>2</sup>

竣工: 2000年

#### 【天井断熱材】

材料: GW、設計厚さ: 300mm

#### 【調査日時】

2017/12/12(火)



約320mm

約300mm

図3-13 厚さ測定状況



(a) 施工時写真



(b) 調査時写真

図3-14 厚さスケール比較

#### 4. 吹込み断熱材の沈降に影響を及ぼす環境条件の検証

##### (1) 目的

第2章では、吹込み断熱材の沈降要因の一つに「気候」があるものの、高温高湿度条件下における沈降量データがほとんどないことが分かった。また、振動条件下における沈降量データに再現性の点で改善の余地があることが判明した。

本章では、吹込み断熱材の沈降量を絶対湿度および振動をパラメータとして試験（促進試験）し、吹込み断熱材の沈降量を簡便に測定できる試験方法の提案につなげる。

##### (2) 試験概要

吹込み断熱材の沈降量を簡便に測定できる試験方法検討のために以下の試験を行う（図4-1）。

①恒温恒湿試験：一定温湿度に設定された空間に吹込み断熱材を施工し、絶対湿度をパラメータとして沈降量を測定する。

②振動試験：東京の交通振動20年分を模擬した振動を与え、沈降量を測定する。

③（高温高湿＋振動）試験：①と②を組合わせた試験により、①・②と比較して変化を確認する。

##### (3) 恒温恒湿試験

###### 1) 試験方法

恒温恒湿槽には espec 社製の安定性試験器 CSH-220 を用いた。恒温恒湿条件の最も厳しい条件として 75°C80%RH、標準状態として 23°C50%RH を設定した。75°C80%RH よりも高温高湿な条件では安定性試験器内で結露が生じる場合があり、試験体に水滴が落下する可能性があったため、上限値を 75°C80%RH とした。75°C80%RH の絶対湿度は 0.273g/g(DA)、23°C50%RH の絶対湿度は 0.009g/g(DA) であり、その中間として、75°C50%RH(絶対湿度 0.147g/g[DA])と 50°C80%RH(絶対湿度 0.067g/g[DA])を設定した。

75°C80%RH の条件下では、試験用容器の材質によっては、変形または吸湿し、正確な沈降量が得られない可能性がある。また、吹込み断熱材の内部に温湿度の偏りが生じないように、メッシュ状の容器を採用した。メッシュ状の容器を採用したことで、特に短繊維である CF の試験片が落下する可能性があるため、容器の内面にガラスシートを貼付けた（図4-2）。試験時には、試験用容器が恒温恒湿槽内に密着させないようにした。（図4-3）

はじめに、容器の内面に貼り付けたガラスシートと試験体の摩擦の影響がない範囲を特定するため、600mm(w)×600mm(l)×300mm(h)のメッシュ状の容器を特注製作し、CF を試験施工した。事前検討として、この試験体を 75°C80%RH に安定した安定性試験

①恒温恒湿試験（[1]75°C80%RH、[2]75°C50%RH、[3]50°C80%RH、[4]23°C50%RH）

②振動試験  
（周波数 25Hz、加速度 19.95m/s<sup>2</sup>、24 時間）

③（高温高湿＋振動）試験  
（75°C80%RH → 振動）

図4-1 促進試験条件

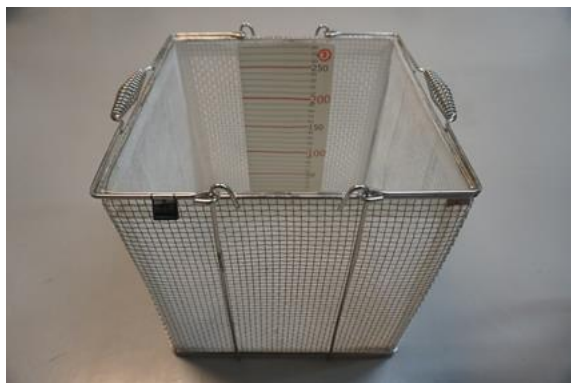


図4-2 メッシュ状の容器



図4-3 恒温恒湿試験状況

器に設置し、図 4-4 に示す位置で厚さを測定した。試験用容器の外周面から 75mm、150mm、300mm の位置で測定し、容器と試験体の摩擦の影響がない範囲を特定した。その後、300mm(w)×300mm(l)×300mm(h)、約 5mm メッシュの容器を用いて、恒温恒湿試験を行った。

2) 試験結果および考察

① 試験体と容器の摩擦の影響

測定結果を図 4-5 に示す。容器外周面から 150mm と 300mm の位置ではいずれの測定日においても

0.5%以上の差はなく、42 日目時点で 0.3%の差であった。一方で、容器外周面から 75mm の位置では、20 日目時点で約 3.2%の差が生じていた。以降はレーザー照射対象であるアルミ箔が斜めに傾き(図 4-6)、正確に測定できなかつたため、掲載していない。以上の結果から、容器外周面から 150mm 以上離れた位置で測定することで、容器と試験体の摩擦を無視できることが分かった。以降は 300mm 角のメッシュ状の容器を使用するが、中心 1 点で測定し、摩擦の影響を排除することとした。

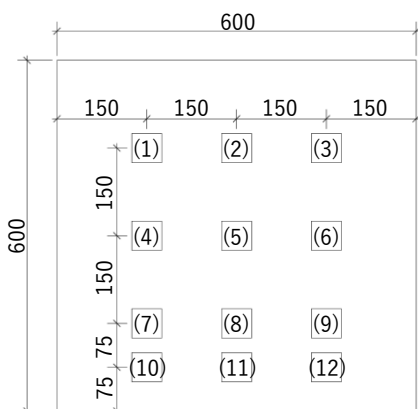
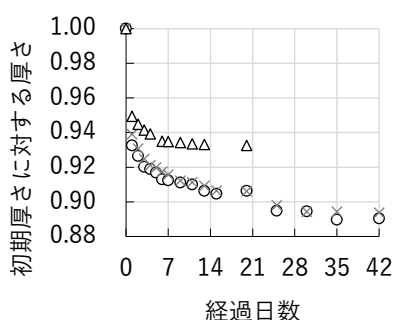


図 4-4 測定位置



○ 測定点(5)  
× 測定点(1)~(4),(6)~(9)  
△ 測定点(10)~(12)

図 4-5 測定結果



図 4-6 容器外周面付近

表 4-1 試験体概要

条件※1	材料								
	RW※2			GW※2			CF※2		
	初期厚さ (mm)	質量 (kg)	かさ密度 (kg/m <sup>3</sup> )	初期厚さ (mm)	質量 (kg)	かさ密度 (kg/m <sup>3</sup> )	初期厚さ (mm)	質量 (kg)	かさ密度 (kg/m <sup>3</sup> )
a	283.2	0.66	31.3	224.8	0.41	20.6	213.0	0.51	27.0
	237.4	0.65	30.9	234.5	0.38	18.3	213.9	0.49	25.9
	230.7	0.68	33.3	221.0	0.42	21.5	230.4	0.54	26.5
b	239.7	0.73	34.4	238.4	0.41	19.4	229.5	0.55	27.1
	231.3	0.65	31.7	227.6	0.46	22.8	216.0	0.51	26.7
	227.4	0.66	32.8						
c	230.2	0.68	33.3	240.3	0.44	20.7	212.2	0.50	26.6
	229.9	0.68	33.4	230.7	0.41	20.1	222.5	0.51	25.9
				228.7	0.41	20.2	217.2	0.49	25.5
d	234.2	0.69	33.3	220.9	0.43	22.0	226.8	0.55	27.4
				234.2	0.42	20.3	224.4	0.54	27.2
				230.0	0.41	20.1	208.6	0.51	27.6

※1: 条件記号は次の通り。 a: 75°C80%RH、b: 75°C50%RH、c: 50°C80%RH、d: 23°C50%RH

※2: RW は表 3-1 の記号 A、GW は記号 B、CF は記号 K の製品を使用している。

[図 4-7 注記]: GW の 75°C80%RH は 44 日目まで N=3 の平均値を示しているが、以降は N=1 の結果を示している。

○ 75°C80%RH × 75°C50%RH △ 50°C80%RH + 23°C50%RH

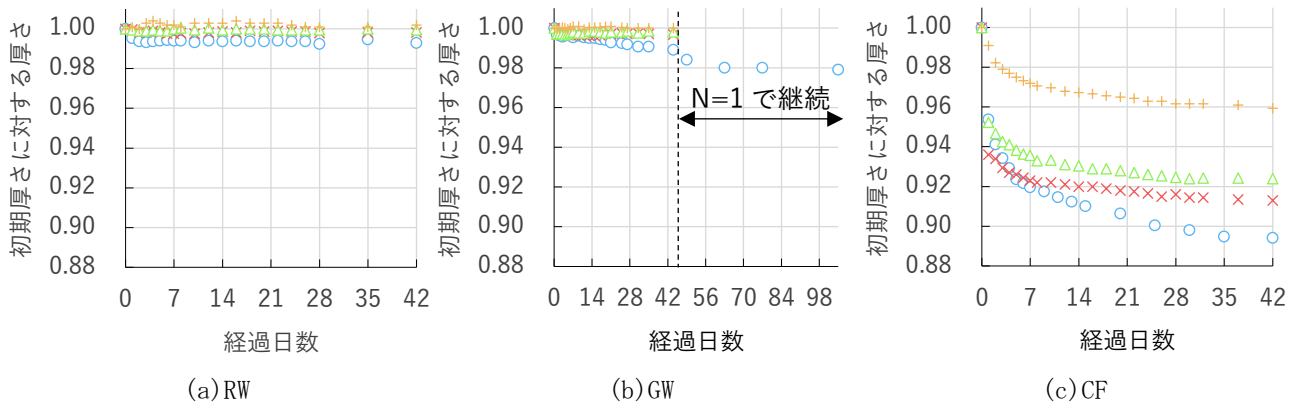


図 4-7 沈降の推移

[図 4-8 注記]: 有意水準 \* p<0.05 \* p<0.01

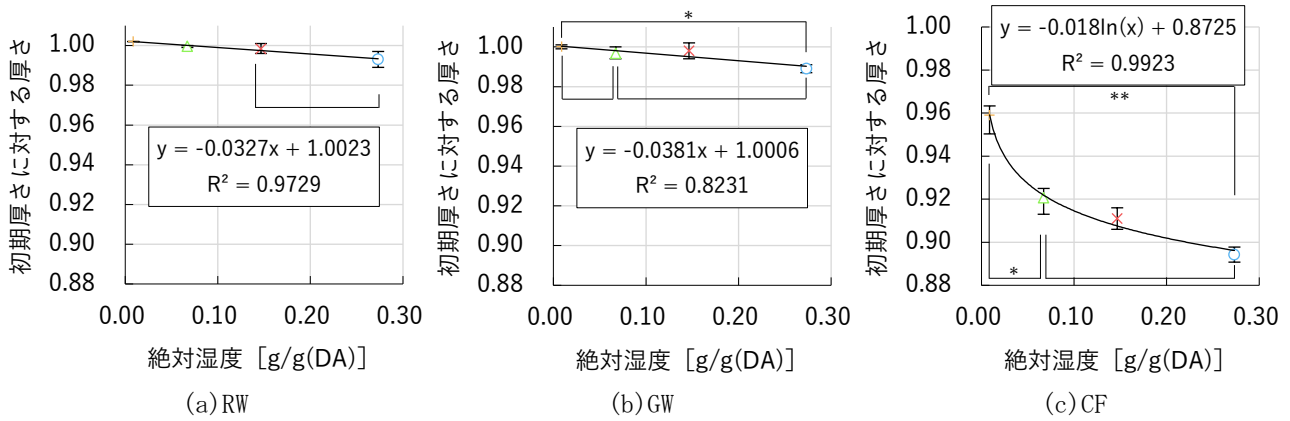


図 4-8 絶対湿度と沈降水量 (RW と CF: 42 日目時点、GW: 44 日目時点)

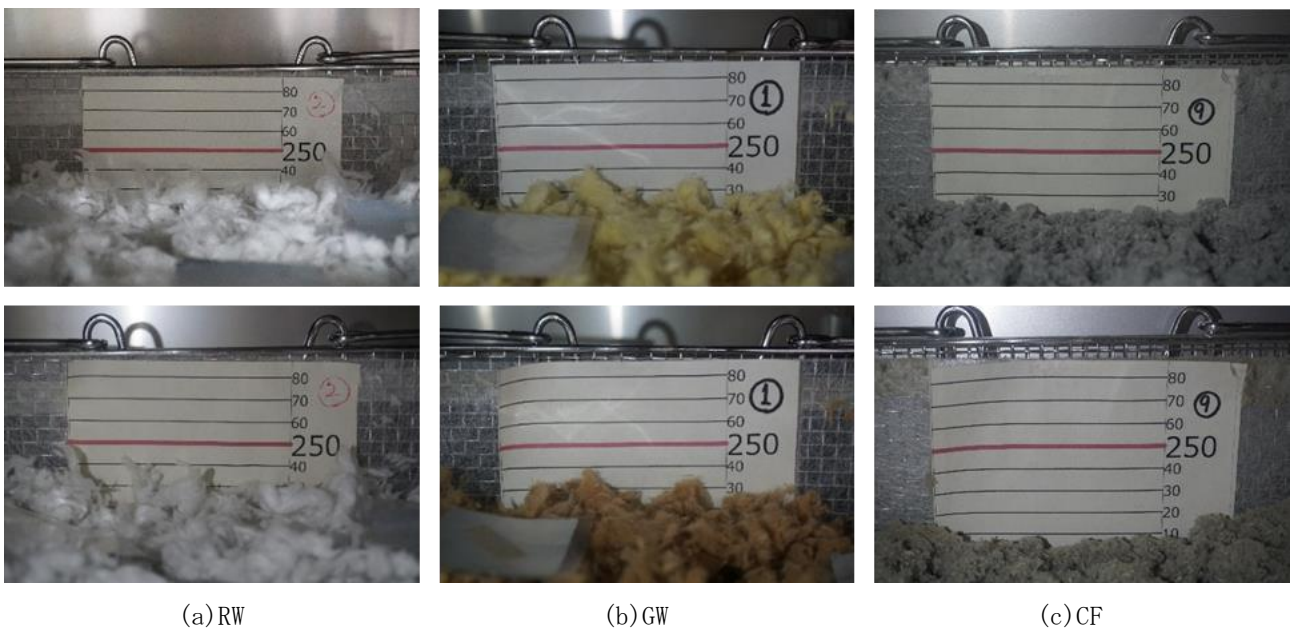


図 4-9 試験前後の写真 (RW と CF: 0 日目[上]、42 日目[下] GW: 0 日目[上]、44 日目[下])

②気候が沈降量に及ぼす影響

恒温恒湿試験における試験体概要を表 4-1 に示す。恒温恒湿試験では、RW は表 3-1 に示す記号 A、GW は記号 B、CF は記号 K を用いている。300mm 角の容器に試験体を均質に施工するために、箱上方から鉛直に吹込む方法とした。

各材料の恒温恒湿試験結果を図 4-7、図 4-8 に示す。RW は温湿度条件による沈降量の差は小さく、75°C80%RH 条件下でも 0.7% (約 1.7mm) の沈降に留まった。GW は 75°C80%RH 条件下において、44 日目以降も沈降が進んだため、1 試験体のみ 105 日目まで測定を続けた。105 日目において 2.1% の沈降であった。なお、GW は 75°C80%RH 条件下ではバインダーの変色 (図 4-9 (b), 図 4-15) が観察され、実条件下では発生していない現象が起きていた。このことから GW は 75°C80%RH に曝露することは不適とする。CF は温湿度条件によって沈降量に有意差が見受けられ、75°C80%RH 条件下で 10.8% の沈降量であった。

(4) 振動試験

1) 試験概要

振動台はサーボテクノス社製の水平テーブル VT-1 を用いた。既往の試験規格<sup>[2-11]</sup>の方法に則り、周波数 25Hz、加速度 19.95m/s<sup>2</sup>の振動を 24 時間与えた。振動試験状況を図 4-10 に示す。試験用容器は片側塗装コンパネ (パネコートイエロー12mm) で外形寸法 600mm (w) × 600mm (l) × 300mm (h) の容器を作製した。吹込み断熱材の厚さは図 4-11 に示す 5 点で測定した。試験体施工直後に試験が実施できないことも想定されるため、測定は吹込み直後、試験直前、試験直後の 3 回とし、それぞれの厚さを  $t_{ini}$ 、 $t_{bef}$ 、 $t_{aft}$  と記す。試験中の沈降量の推移は omron 社製レーザー変位計 ZX2-LDA11 を用い、1 秒間隔で測定した。なお、レーザー照射対象であるアルミ箔が振動によって動かないようにスプレーのりで固定した。

2) 試験結果および考察

試験結果を図 4-12 に示す。本図は時刻 0 で吹込み断熱材の厚さを  $t_{ini}$  としている。1 秒後のプロットは  $t_{bef}$  から 1 秒間に変位した量を差引いており、2 秒後以降のプロットは  $t_{bef}$  からの変位量を示している。RW と GW は振動開始直後に沈降し、試験開始 30 分以降は 1mm 以上の変位は見られなかった。一

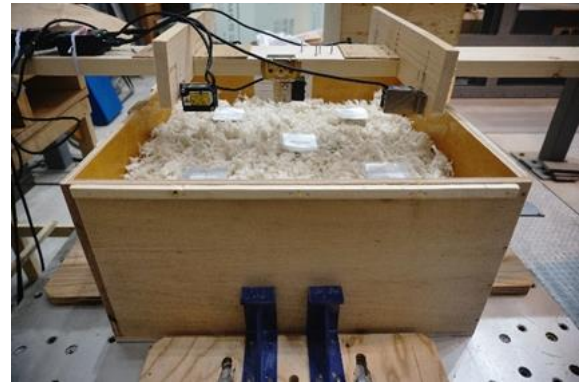


図 4-10 振動試験状況

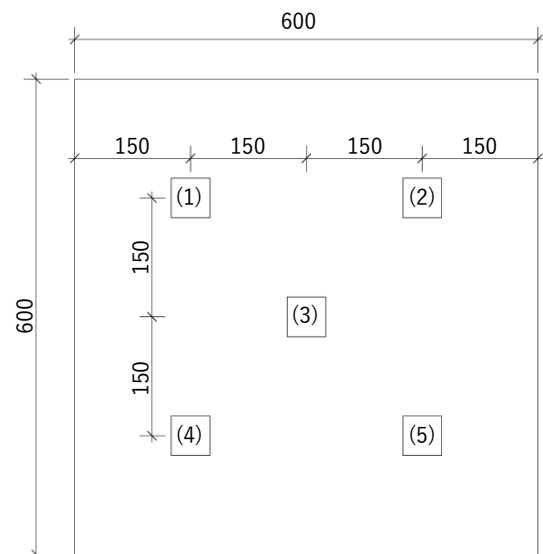


図 4-11 振動試験状況

表 4-2 試験体概要

材料	番号	初期厚さ <sup>※2</sup> (mm)	質量 (kg)	かさ密度 (kg/m <sup>3</sup> )
RW <sup>※1</sup>	①	226.2	2.56	34.11
	②	228.5	2.66	35.09
	③	227.7	2.71	35.87
GW <sup>※1</sup>	①	221.0	1.40	19.09
	②	225.5	1.36	18.17
	③	226.9	1.68	22.32
CF <sup>※1</sup>	①	219.0	1.91	26.29
	②	226.7	1.93	25.66
	③	234.1	2.03	26.13

※1: RW は表 3-1 の記号 A、GW は記号 B、CF は記号 K の製品を使用している。

※2: 初期厚さは試験体施工直後に測定したものであり、5 点で測定した平均値を示している。



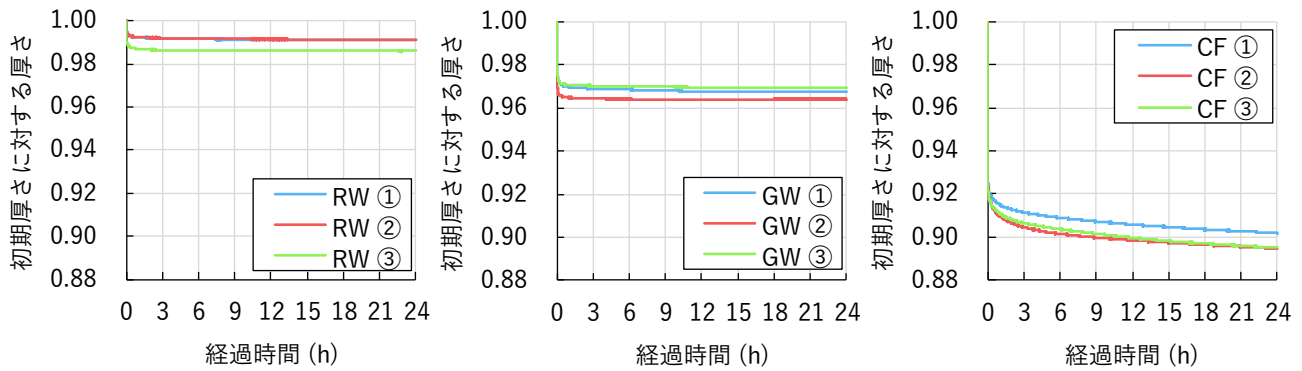


図 4-12 沈降量の推移

方でCFは試験開始後に沈降し、試験中に沈降が収束することはなかった。しかし、試験開始23時間後から1時間の沈降量は0.1%以下であった。吹込み直後の厚さと試験後の各点の厚さを表4-3に示す。本測定はレーザー距離計による測定であるため、図4-12の結果と値がことなることに留意されたい。3試験体の平均でRWは1.2%、GWは2.7%、CFは10.5%の沈降量であった。

(5) (高温高湿+振動) 試験

1) 試験概要

高温高湿試験 (75°C80%RH) と振動試験を組合わせた試験を行う。75°C80%RH条件下における沈降量を測定し、沈降が収束したのちに振動試験を行った。恒温恒湿試験では、300mm角のメッシュ状の容器を用いていたため、図4-10に示す固定ジグは利用できず、図4-13に示す固定ジグを別途製作した。GWとCFは恒温恒湿試験の試験体を流用したが、RWは恒温恒湿試験の再現性確認のために新しく試験体を施工した上で実施している。また、GWは105日間保管していた試験体が1体のみであったため、1体分のデータを掲載している。

2) 試験結果および考察

試験結果を図4-14に示す。図中の赤プロットが振動試験後の沈降量を示している。RWは8日目測定時点で沈降量は安定しており、0.6%の沈降であった(図4-7と同程度であることを確認した)。その後、振動試験実施後では、3体の平均で1.2%の沈降であった。この結果は振動試験結果と同等であり、振動を与えるとその工程に拘わらず同程度の沈降量が得られることが分かる。GWは105日間の測定後、振動を与えると図4-15に示すような変質が観察された。振動によってGWの繊維が塊になり、実

表 4-3 測定結果

材料	番号		5点平均 (mm)	増減 (mm)	沈降率 (%)
RW	①	$t_{ini}$	226.2	-2.5	1.1
		$t_{aft}$	223.7		
	②	$t_{ini}$	228.5	-2.4	1.1
		$t_{aft}$	226.1		
	③	$t_{ini}$	227.7	-3.2	1.4
		$t_{aft}$	224.5		
GW	①	$t_{ini}$	221.0	-5.6	2.5
		$t_{aft}$	215.4		
	②	$t_{ini}$	225.5	-7.1	3.1
		$t_{aft}$	218.4		
	③	$t_{ini}$	226.9	-5.9	2.6
		$t_{aft}$	221.0		
CF	①	$t_{ini}$	219.0	-22.5	10.3
		$t_{aft}$	196.5		
	②	$t_{ini}$	226.7	-23.7	10.5
		$t_{aft}$	203.0		
	③	$t_{ini}$	234.1	-24.7	10.6
		$t_{aft}$	209.4		

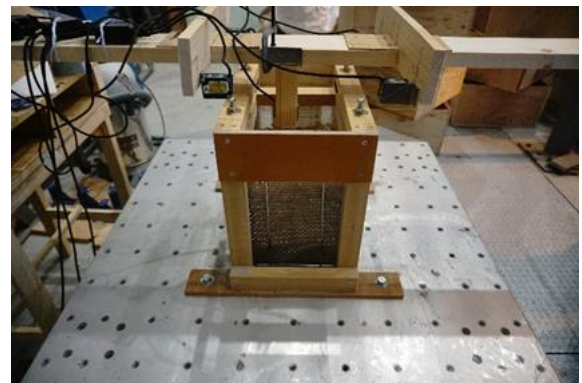


図 4-13 (高温高湿+振動) 試験状況(振動部)

[図 4-14 注記]: 赤プロットは振動後の厚さを示している。

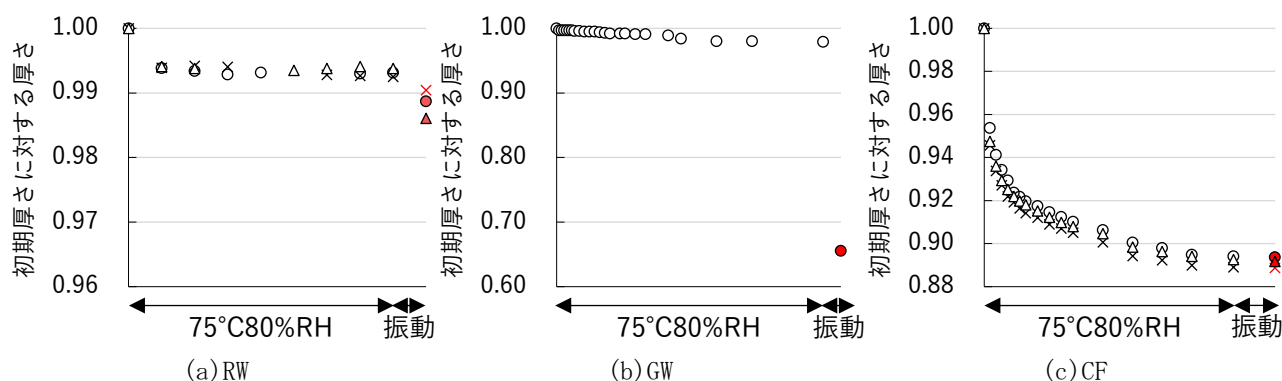
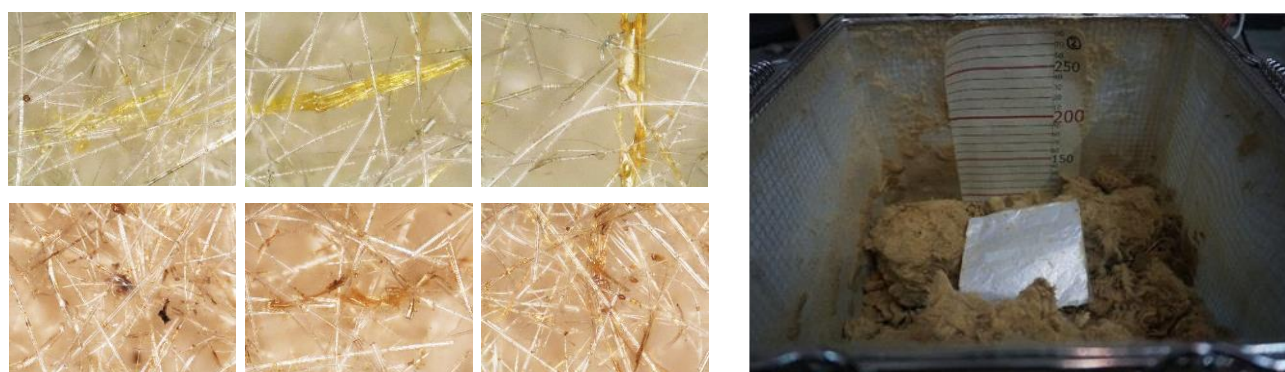


図 4-14 測定結果



(a) 顕微鏡写真(上: 23°C50%RH、下: 75°C80%RH)

(b) (高温高湿+振動)試験後の変質

図 4-15 変色・変質状況

表 4-4 全試験結果

		RW	GW	CF
(1)長期沈降試験		1.5%	1.2%	9.5%
(2)促進試験	①恒温恒湿試験 (75°C80%RH)	0.7%	2.1% <sup>※1</sup>	10.8%
	②振動試験	1.2%	2.7%	10.5%
	③(高温高湿+振動)試験	1.2%	34.5% <sup>※2</sup>	10.9%

※1: 変色が生じていたため、試験方法として不適とする。 ※2: 変質が生じており、測定結果は参考値とする。

現象を再現するのは困難であることが分かった。そのため、測定結果は参考値ではあるが、34.5%の沈降であった。CFは75°C80%RH条件後に振動を与えても沈降は見られなかった。

#### (6) 小括

本章では、短期間に吹込み断熱材沈降量を把握するための促進試験を実施した。3章の長期沈降試験結果も含めた全試験結果の一覧を表 4-4 に示す。

##### ○RW

長期沈降試験では1.5%沈降しているものの、高温高湿条件下(75°C80%RH)のみでは、0.7%の沈降に留まった。一方で、振動を与えると、その工程拘

わらず1.2%沈降し、長期沈降試験の沈降量と概ね同程度となった。

##### ○GW

高温高湿条件下(75°C80%RH)では変色または変質が生じており、促進試験としては不適であった。振動を与えると長期沈降試験よりも約1.5%沈降している結果となった。

##### ○CF

長期沈降試験では9.5%沈降であり、いずれの促進試験も長期沈降試験よりも沈降している。また、如何なる工程においても収束する沈降量は同程度であることが示唆された。

## 5. 吹込み断熱材の沈降量測定のための試験方法の提案

### (1) 目的

2～4章の検討を踏まえ、吹込み断熱材の長期沈降性状を再現する、簡便な試験方法を提案する。試験方法は振動試験と高温高湿試験の2つの試験方法を提案する。

### (2) 試験方法 (案)

#### 1. 一般

この試験法は現場施工を想定し、吹込み断熱材を吹込み装置を用いて施工することで形成される吹込み断熱材の沈降量を測定するための試験方法を規定するものである。施工部位は天井に限定される。

#### 2. 試験用容器

##### 1) 振動試験

試験用容器は外形寸法が600mm×600mm、高さ300mm以上の上面が開放された正方形箱型の容器(図5-1[a])とし、吹込みによって変形がない十分な強度をもつものとする。容器の内面に厚さスケールを貼付ける。

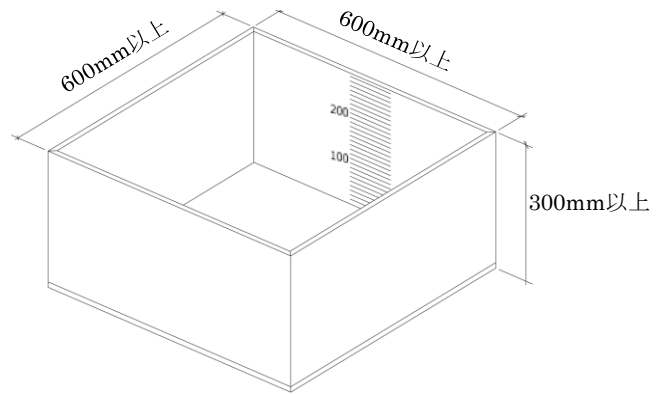
##### 2) 高温高湿試験

試験用容器は外形寸法が300mm×300mm、高さ300mm以上の上面が開放された正方形箱型の容器(図5-1[b])とし、吹込みによって変形がない十分な強度をもつものとする。また、高温高湿条件下でも変形・吸湿しない材質とし、メッシュ状の容器とする。メッシュから試験体片が落下しないように透湿性の高いシート等を容器の内面に貼付ける。シートの内面に厚さスケールを貼付ける。

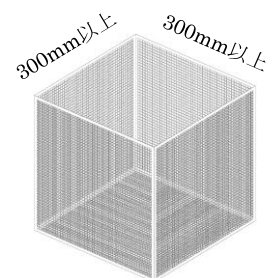
#### 3. 試験体施工

試験体施工は以下の4手順で行う。

- 試験用容器の質量を0.01kgの精度で測定する。
- 吹込み装置を使用して吹込み断熱材が均一な厚さになるように吹込み、試験体を施工する。吹込み厚さは容器の内面に設置された厚さスケールを参考に箱上端から60mm以上空けるようにする。試験体数は3以上とする。なお、試験体表面は吹込み断熱材が圧縮しないようにエアール又はジグで平滑にならす。
- 試験用容器と吹込み断熱材の合計質量を0.01kgの精度で測定し、試験用容器の質量を差引き、吹込み断熱材の質量を算出する。



(a) 振動試験用



(b) 高温高湿試験用

図5-1 試験用容器

- 吹込み断熱材のかさ密度を式(5-1)によって求め、公称下限値以上であることを確認する。

$$\rho = \frac{m}{d \times d \times t} \dots (5-1)$$

ここに、 $\rho$ ：吹込み断熱材のかさ密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$m$ ：吹込み断熱材の質量 (kg)

$d$ ：試験用容器の縦横内寸法 (m)

$t$ ：吹込み断熱材厚さ (m)

#### 4. 沈降量・吹き増し率測定

##### 1) 振動試験

沈降量および吹き増し率の測定は以下のa)～e)の5手順で測定する。

##### a) 吹込み直後の厚さ測定

50mm角にカットされたアルミ箔等を吹込み断熱材に図5-2に示す位置に吹込み断熱材を圧縮しないように設置する。このとき、アルミ箔が動かないようにスプレーのり等で固定する。容器の外周面から150mm以上距離をおくことで、容器と試験体の摩擦を無視できる。

次に、図 5-3 に示すようなジグを容器の上部に設置し、0.1mm まで測定できるレーザー距離計によりアルミ箔までの距離を測定し、箱内寸高さから測定距離を差引き、5 点の平均を吹込み直後の吹込み断熱材の厚さ ( $t_{ini}$ ) とする。

なお、吹込み直後に試験を実施しない場合には、23°C50%RH に安定した空間に保管する。このとき、吹込み断熱材に載せたアルミ箔が動かないように気流等に配慮する。

b) 試験直前の厚さ測定

a) と同様の方法で測定し、5 点の平均を試験直前の吹込み断熱材厚さ ( $t_{bef}$ ) とする。

c) 試験中の厚さ測定

図 5-4 に示す機構を製作し、一軸振動台により振動を与える。振動により試験用容器が動くことがないように、試験用容器を振動台に緊結する。レーザー変位計が振動しないように、レーザー変位計は一軸振動台と切り離す。振動は周波数 25Hz、加速度  $19.95\text{m/s}^2$  とし、24 時間振動を与える。変位はレーザー変位計により 1 秒間隔で記録する。

d) 試験直後の厚さ測定

a) と同様の方法で測定し、5 点の平均を試験直後の吹込み断熱材厚さ ( $t_{aft}$ ) とする。ここで、( $t_{bef}$ ) と ( $t_{aft}$ ) の差がレーザー変位計で測定した変位量と大きな差が無いことを確認する。

e) 沈降量・沈降率・吹き増し率の算出

$N(\geq 3)$  の試験体に対して a) ~ d) を実施し、 $k(\leq N)$  個目の吹込み断熱材の沈降量 ( $\Delta T_k$ ) を式 (5-2) により算出する。試験体の沈降率 ( $S$ ) は式 (5-3)、吹き増し率 ( $U$ ) は式 (5-4) により算出する。

$$\Delta T_k = t_{ini,k} - t_{aft,k} \dots (5-2)$$

$$S = \frac{\sum_{k=1}^N \Delta T_k / t_{ini,k}}{N} + 2\sigma \dots (5-3)$$

$$U = \frac{1}{1-S} \dots (5-4)$$

ここに、 $t_{ini,k}$  :  $k$  個目の試験体の吹込み直後厚さ

$t_{aft,k}$  :  $k$  個目の試験体の試験直後厚さ

$\sigma$  :  $\Delta T$  の標準偏差

2) 高温高湿試験

沈降量および吹き増し率の測定は以下の a) ~ e) の 5 手順で測定する。

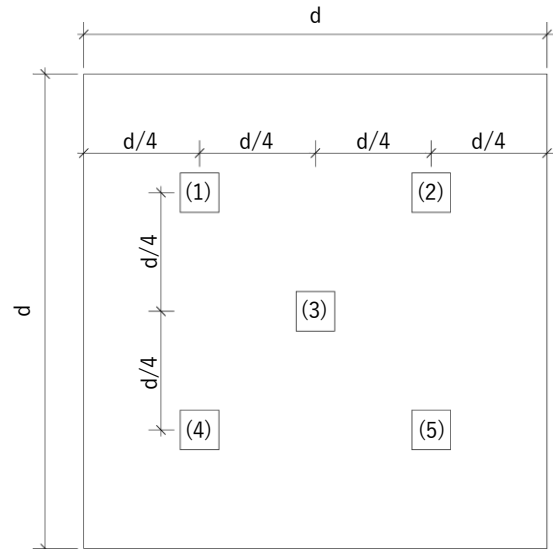


図 5-2 測定位置

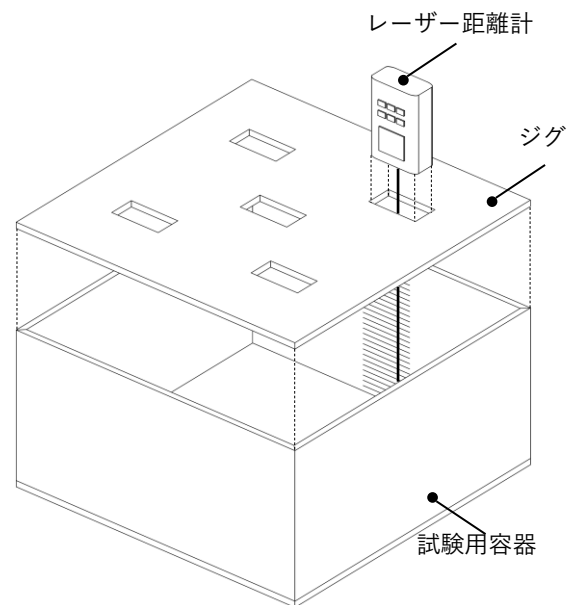


図 5-3 測定方法

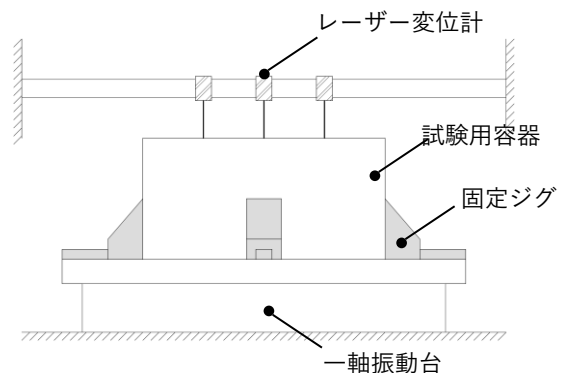


図 5-4 振動試験中の変位測定方法

a) 吹込み直後の厚さ測定

50mm 角にカットされたアルミ箔等を吹込み断熱材に中心 1 点に吹込み断熱材を圧縮しないように設置する。このとき、アルミ箔が動かないようにスプレーのり等で固定する。容器の外周面から 150mm 以上距離をおくことで、容器と試験体の摩擦を無視できる。

次に、図 5-3 に示すようなジグを容器の上部に設置し、0.1mm まで測定できるレーザー距離計によりアルミ箔までの距離を測定し、箱内寸高さから測定距離を差引き、中心 1 点の測定値を吹込み直後の吹込み断熱材の厚さ ( $t_{ini}$ ) とする。

なお、吹込み直後に試験を実施しない場合には、23°C50%RH に安定した空間に保管する。このとき、吹込み断熱材に載せたアルミ箔が動かないように気流等に配慮する。

b) 試験直前の厚さ測定

a) と同様の方法で測定し、中心 1 点の測定値を試験直前の吹込み断熱材厚さ ( $t_{bef}$ ) とする。

c) 温湿度を一定に保つことのできる恒温恒湿槽内に試験体を設置する。試験体を設置する際、恒温恒湿槽内の装置に試験用容器を密着させないようにす

る。恒温恒湿槽内は 75°C80%RH に設定し、槽内温湿度は少なくとも 1 時間間隔で測定する。

測定初日から 7 日間は 24 時間間隔でレーザー距離計を用いて厚さを測定する。以降は測定間隔を伸ばしても良い。直近 3 回の変動が 0.5%以内に収まるまで続ける。

d) 試験直後の厚さ測定

a) と同様の方法で測定し、中心 1 点の測定値を試験直前の吹込み断熱材厚さ ( $t_{aft}$ ) とする。

e) 沈降量・沈降率・吹き増し率の算出

$N$  ( $\geq 3$ ) の試験体に対して a) ~ d) を実施し、 $k$  ( $\leq N$ ) 個目の吹込み断熱材の沈降量 ( $\Delta T_k$ ) を式(5-2)により算出する。試験体の沈降率 ( $S$ ) は式(5-3)、吹き増し率 ( $U$ ) は式(5-4)により算出する。

$$\Delta T_k = t_{ini,k} - t_{aft,k} \dots (5-2)$$

$$S = \frac{\sum_{k=1}^N \Delta T_k / t_{ini,k}}{N} + 2\sigma \dots (5-3)$$

$$U = \frac{1}{1-S} \dots (5-4)$$

ここに、 $t_{ini,k}$  :  $k$  個目の試験体の吹込み直後厚さ

$t_{aft,k}$  :  $k$  個目の試験体の試験直後厚さ

$\sigma$  :  $\Delta T$  の標準偏差

## 6. まとめ

本研究では、吹込み断熱材の長期沈降性状の把握のため、温湿度が制御されていない空間において1000日間の沈降量データを取得したうえで、絶対湿度、振動をパラメータとした促進試験を実施した。これら検討結果により、吹込み断熱材の沈降量を簡便に測定できる試験方法を提案した。得られた研究成果を以下に要約する。

### 1) 既往研究・既往試験規格調査

既往研究では、吹込み断熱材の沈降量の主要因はロックウール (RW) とグラスウール (GW) は「振動」、セルローズファイバー (CF) は「気候」であることが明らかになっている。しかし、既往研究の気候は標準状態 (23℃) での沈降量測定に留まっており、高温高湿条件下における沈降量データは蓄積されていなかった。

既往の試験規格には、温湿度によるものと振動による試験規格があった。しかし、沈降量データを取得するために160日間要するものや測定結果の再現性に改善の余地があるものであった。

### 2) 実環境下における沈降量測定

長期沈降試験では、北海道立総合研究機構建築研究本部 (北海道旭川市) の敷地内に建つ小屋において、約1000日間の沈降量データを取得した。RWは1.5%、GWは1.2~1.9%、CFは8.5~10.7%の沈降率であった。また、CFの沈降には季節変動があることが判明した。夏期の絶対湿度が高くなる条件下において沈降が進む傾向が見られ、1000日間経過しても沈降が収束していないため、今後も継続的に沈降量データを取得する予定である。

長期沈降試験の結果の妥当性確認のため、RWとGWを施工した住宅各1棟ずつ調査した。施工時の吹込み断熱材厚さの写真と同じ画角で写真を撮影し、数年経過後の吹込み断熱材の厚さを確認したところ、いずれの住宅においても大きな沈降は観察されず、長期沈降試験の結果と概ね同等であることを確認した。

### 3) 沈降量に影響を及ぼす環境条件の検証

促進試験では、1) 恒温恒湿試験、2) 振動試験、3) (高温高湿+振動) 試験を実施した。RWは高温高湿条件下 (75℃80%RH) のみでは、0.7%の沈降に留まった。一方で、振動を与えると、その工程に拘わらず1.2%沈降し、長期沈降試験の沈降量と概ね同

程度となった。GWは高温高湿条件下 (75℃80%RH) では変色または変質が生じており、促進試験としては不適であった。振動試験では長期沈降試験よりも約1.5%沈降している結果となった。CFはいずれの促進試験も長期沈降試験よりも沈降している。また、如何なる工程においても収束する沈降量は概ね同程度であることを明らかにした。

### 4) 試験方法の提案

上記の検討結果を踏まえ、吹込み用繊維質断熱材の材料特性に応じた試験方法を提案した。試験体のばらつきを評価するために沈降率の計算式に標準偏差の項を取り入れた。また、再現性のある試験方法としてレーザー変位計を用いることなどを試験法に取り入れた。

本研究で提案した試験方法は今後もデータを蓄積したうえで、次回のJIS改定時に試験法としての採用を目指す。

### [参考文献]

- [1-1] 気候変動2014 統合報告書政策決定者向け要約  
[https://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5\\_syr\\_spmj.pdf](https://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_syr_spmj.pdf)
- [1-2] 経済産業省 資源エネルギー庁: 最終エネルギー消費の構成比
- [1-3] JIS A9523:2016 吹込み用繊維質断熱材
- [2-1] Penney, R., A. and Yarbrough, D., W.: A Survey of Loose-fill Insulations Installed in Residential Attics, ASTM Special Technical Publication (American Society for Testing and Materials), pp.100-108, 1991
- [2-2] Svennerstedt, B.: Testing of Settling for Attic Loose-Fill Thermal Insulation, Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes, pp.142-153, 1993
- [2-3] Svennerstedt, B.: Analytical Models for Settling of Attic Loose-Fill Thermal Insulation, Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes, pp.189-201, 1995
- [2-4] Yarbrough, D., W., Wright, J., H., Mcelroy, D., L. and Scanlan, T., F.: Settling of Loose-fill Insulations Due to Vibration, ASTM Special Technical Publication (American Society for Testing and Materials), pp.703-714, 1983
- [2-5] Bock, A., Treml, S. and Engelhardt, M.: Long-term Settlement Behavior of Loose-fill Cellulose Insulation under Different Types Exposure, European Journal of Wood and Wood Products, pp.705-707, 2015
- [2-6] Treml, S. and Engelhardt, M.: Evaluation of Settlement Behaviour of Loose-fill Insulation Material Using Relaxation Tests, Wood Science and Technology, 47(2), 2013.3
- [2-7] Svennerstedt, B.: Settling of Loose-Fill Thermal Insulation-Development of a Laboratory Method for Attic Application, Journal of Building Physics, pp.129-141, 2001
- [2-8] Rasmussen, T., V.: Verification of Density Predicted for Prevention of Settling of Loose-fill Cellulose Insulation in Walls, Journal of Thermal Envelope & Building Science, pp.44-69, 2005
- [2-9] ISO/FDIS 18393-1:2012, Thermal insulation products-Determination of ageing by settlement-Part 1: Blown loose-fill insulation for ventilated attics
- [2-10] BS 2972:1989
- [2-11] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 平成19年度 断熱材の長期断熱性能評価に関する標準化調査, 2008.3