

ホタテ貝殻利活用による建材開発と施工方法に関する研究

2021 年 9 月

北海道科学大学大学院

小松 幸雄

学位論文内容の要旨

北海道科学大学大学院工学研究科

工学専攻

博士後期課程

小松 幸雄

ホタテ貝殻利活用による建材開発と施工方法に関する研究

国内におけるホタテ貝の水揚げ量は、北海道が最も多い。全国的に需要が高い水産物であるが、多量の水産廃棄物が発生することに特徴があり、ホタテ貝殻は水産廃棄物全体の約4割を占めている。このようなホタテ貝殻は、廃棄物としての処理が滞っている。堆積場で放置されている様子が散見されることから、ホタテ貝殻の利活用を推進していくことが重要である。ホタテ貝殻は、焼成・粉末化してチョーク、砂の代替品、コンクリートやモルタルの骨材、さらには、抗カビ効果や防臭効果を期待して洗剤等のフィラーとして利活用されている。しかし、廃棄物の発生量が利活用する量に比べて圧倒的に多く、堆積場で放置されるホタテ貝殻が減少していないのが現状である。特に、土木資材や建材での利活用が進んでおらず、これらの分野において大量のホタテ貝殻を利活用する手法の確立が望まれる。

このような背景から本論文では、ホタテ貝殻の利活用促進を目的として、ホタテ貝殻粉末を用いた建築物の内装材および外装材の開発を行うとともに、ホタテ貝殻粉末を用いた外装材が適用可能な木造住宅の湿式外張り断熱外装システムの開発を行った。

本論文は、第1章から第7章で構成される。

第1章は序論であり、研究の背景、既往の研究、本研究の位置づけと目的、および本論文の構成を示している。

第2章では、ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の開発に関して示している。既往の研究によると、ホタテ貝殻粉末を1,000℃で焼成すると粉末を消臭することが可能であり、消石灰に組成が変化することからホルムアルデヒド吸着効果や抗カビ効果の機能を発揮することが明らかとなっている。しかし、焼成温度が高温であり、高コスト化は避けられない。このようなことから本章では、400℃で焼成したホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の開発を行った。ホタテ貝殻粉末を骨材として用いた内装材としての調合を検討し、その理化学的特性を把握するための各種試験を行った結果、抗カビ効果および不快臭除去効果のような機能性材料としての性能を有していることが明らかとなった。

第3章では、ホタテ貝殻粉末を用いた既調合外装モルタルを開発した。木造住宅の外装材は窯業系サイディングが普及しているものの、モルタル外装のニーズも依然として多く存在している。本章では、ホタテ貝殻粉末を外装材に使用することを考慮し、低コストとなる非焼成ホタテ貝殻粉末を用いた既調合外装モルタルを開発した。非焼成ホタテ貝殻粉末はモルタルの骨材として利用することとし、製品価格および施工性について検討した。その結果、適正な価格帯で既調合モルタルを開発することができ、漆喰壁のような白色の外装仕上げが実現できた。また、施工してから9年経過した外装モルタルを調査した結果、防水に対して致命的な亀裂等は確認されなかった。

第4章では、始めに、ホタテ貝殻粉末を用いた樹脂モルタルの開発を行った。外張り付加断熱工法の場合、躯体の屋外側に厚い断熱材が配置されることから、開口部の雨仕舞いやデザイン等を考慮すると外装材は薄い方が望ましい。従って、厚さ4mm程度の樹脂モルタル仕上げは窯業系サイディングに比べてメリットが大きい。本章では、ドイツで普及している樹脂モルタルの技術を参考にしてホタテ貝殻粉末を用いた樹脂モルタルの開発を行った。次に、樹脂モルタル仕上げの場合、外装材と断熱材との間に通気層を設けることができないことから、通気層に代わる雨水の排水層を外壁の中に設ける必要がある。本章では、EPSの裏面に排水溝を設けた湿式外張り断熱システムの試験体を対象に、排水・防水実験を行った。EPS裏面の排水溝は、縦型と斜め格子型の2種類とした。排水実験では、EPS裏面の排水溝に着色した水を流し込んで室内への漏水状況を確認した。その結果、いずれの排水溝においても室内への漏水は確認されず、外壁下端から屋外側に排水されることを確認した。排水溝の違いについて、縦溝の場合は、EPSの接合部で縦溝が若干ずれることによって水が滞留する箇所が形成された。これに対し、斜め格子型の場合をみると、水が滞留する箇所がなく、円滑に排水されることがわかった。次に、試験体の外側から散水あるいは散水と圧力を同時に作用させる防水実験を行った結果、開口部の端部やビス穴からの漏水が確認されたものの、EPS裏面の排水溝を通過して屋外側に排水されることが明らかとなった。

第5章では、EPS裏面における排水溝の形成手法を開発した。第4章で対象とした排水溝は人力で作製したが、排水溝を有するEPSの生産性向上・合理化のためには工場での量産が必須である。本章では、第4章で明らかとなった望ましい排水溝形状である斜め格子状と同等の排水性能が得られ、さらに、工場で量産可能な排水溝形状を検討した。その結果、直径60mm、高さ1.5mmの円柱状の突起を72mm間隔で作製するプレス加工手法を開発した。この円柱状の突起の間が深さ1.5mmの排水溝となる。このように加工したEPSの排水性能を把握するため、排水・防水試験を行った。その結果、開口部の端部やビス穴からの漏水が確認されたものの、室内側に漏水することなくEPS裏面から屋外側に排水されることが明らかとなった。

第6章では、湿式外張り断熱システムにおける防火性能の向上に関して実験的な検討を行った。木造住宅における延焼のおそれのある部分の外壁は、非損傷性と遮熱性を有

する防火構造にする必要がある。湿式外張り断熱システムの場合、断熱材から燃焼が始まり消失することから、火災が発生してから数分で外壁が脱落する可能性がある。本章では、EPS が消失しても外装材が脱落しない工法を開発し、防火実験によって湿式外張り断熱システムの防火性能を試験体に基づいて検証した。その結果、EPS の厚さが 150 mm の場合、EPS が燃焼すると試験体の温度が急上昇したものの、消失直後に外壁が脱落せず、30 分間の非損傷性および遮熱性を有していることが明らかとなった。

第 7 章は結論であり、各章のまとめと今後の課題を示した。

本論文の成果は、現在普及している窯業系サイディングと通気層を組み合わせた外装システムだけでなく、廃棄物となっているホタテ貝殻を有効活用しながら薄い外張り外装でも雨仕舞いが可能であるという観点から合理的な外装システムであり、外装デザインの選択肢を広げることにつながることに繋がるとともに、持続可能な社会の構築に寄与できることから、技術的・社会的に有益なものであると考える。

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 ホタテ貝殻粉末の建築材料としての可能性.....	3
1.3 木造住宅の高断熱化と建築外装材との関係.....	5
1.4 既往の研究.....	7
1.5 本研究の目的.....	11
1.6 本論文の構成.....	12
【第1章の参考文献】	14
第2章 ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の開発.....	17
2.1 本章の目的.....	17
2.2 ホタテ貝殻の焼成温度.....	18
2.3 ホタテ貝殻粉末の製造方法.....	19
2.4 ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の調合計画.....	22
2.5 ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の理化学特性.....	23
2.5.1 化学組成分析.....	23
2.5.2 抗カビ試験.....	25
2.5.3 不快臭除去試験.....	28
2.6 第2章のまとめ.....	31
【第2章の参考文献】	32
第3章 ホタテ貝殻粉末を用いた既調合外装モルタルの開発.....	33
3.1 本章の目的.....	33
3.2 非焼成ホタテ貝殻粉末の選定.....	34
3.3 非焼成ホタテ貝殻を用いた外装モルタルの調合とコストの検討.....	36
3.3.1 下塗り材の検討.....	37
3.3.2 上塗り材の検討.....	37
3.3.3 屋内試験施工.....	38
3.3.4 材料価格および施工コストの検討.....	40
3.4 ホタテ貝殻粉末を用いた既調合モルタルの凍結融解抵抗性について.....	41
3.5 実物大建物での試験施工および経年劣化状況.....	43
3.5.1 先行事例調査.....	43
3.5.2 実物大建物での試験施工.....	46
3.5.3 経年劣化（9年後）の検証.....	50

3.6	第3章のまとめ.....	51
	【第3章の参考文献】	52
第4章 湿式外張り断熱外装システムの開発.....		53
4.1	本章の目的.....	53
4.2	EPS直塗り用外装樹脂モルタルの開発.....	53
4.2.1	導入基本技術の概要とホタテ貝殻粉末の利用技術の開発	53
4.2.2	ドイツの技術を応用したホタテ貝殻入り湿式外張り断熱外装システム ..	56
4.2.3	ドイツの技術を応用した樹脂入りモルタル壁の耐久性能実験的検討	57
4.3	木造外壁用の湿式外張り断熱工法の課題.....	58
4.4	木造外壁用の湿式外張り断熱外装システムの防水性に関する検討.....	59
4.5	排水性能に関する実大実験.....	59
4.5.1	排水性能の試験方法の概要	59
4.5.2	排水性能に関する実験結果と考察	61
4.6	防水性能に関する実験室実験.....	63
4.6.1	防水性能の試験方法の概要	63
4.6.2	無加圧時の実験結果と考察	67
4.6.3	加圧条件時における試験結果と考察	70
4.7	まとめ.....	73
4.7.1	排水性能に関する実大実験のまとめ	73
4.7.2	防水性能に関する実験室実験のまとめ	73
	【第4章の参考文献】	75
第5章 EPS断熱材に設ける排水溝形成手法の開発.....		76
5.1	本章の目的.....	76
5.2	排水溝形成手法の開発.....	77
5.2.1	排水溝形成手法の検討	77
5.2.2	プレス加工方法による溝成型の検討	77
5.2.3	プレス加工方法による排水溝寸法の検討	78
5.2.4	プレス加工の工程.....	79
5.3	排水性能および防水性能の試験結果.....	80
5.3.1	試験の目的.....	80
5.3.2	JIS試験法に準拠した試験方法.....	80
5.3.3	試験体の詳細	82
5.3.4	試験結果.....	84
5.4	まとめ.....	90

【第5章の参考文献】	91
第6章 湿式外張り断熱外装システムにおける防火性能の向上.....	92
6.1 本章の目的.....	92
6.2 外張り断熱外装システムにおける防火性能の発現メカニズム	93
6.3 防火性能向上を目指した湿式外張り断熱外装工法の開発.....	94
6.4 防火実験.....	97
6.4.1 試験体の概要および実験方法	97
6.4.2 試験体の作製状況および防火実験の流れ	100
6.4.3 実験結果.....	104
6.5 まとめ.....	110
【第6章の参考文献】	111
第7章 結論.....	112
7.1 本研究のまとめ.....	112
7.2 ホタテ貝殻粉末の建材への利活用の展望.....	116
7.3 今後の課題.....	119
7.3.1 建築分野におけるホタテ貝殻利用量の推定	119
7.3.2 ホタテ貝殻の付加価値と新たな商品開発	121
7.3.3 むすびに.....	121
研究業績	123
謝辞	124

第1章 序論

1.1 研究の背景

北海道におけるホタテ貝の養殖は、北海道および青森県を中心に行われている。小坂によると^{1,1)}、ホタテ貝の養殖はおよそ60年前から始まったとされている。当初は、一漁業者が玉葱袋を利用した手作りの採苗器を考案し、ホタテ稚貝を育成した。その後、大きさ100 cm×45 cm×20 cmの籠を2,000個作って中間育成を行い、育った稚貝を地撒き放流するという簡素な方法であった。1957年に、青森県陸奥湾水産増殖研究所の小野寺周一の指導のもとで試行錯誤を繰り返したことが記述されており、後に、この地がホタテ貝養殖発祥の地とされた。1964年には、ホタテガイ増養殖における更なる技術革新によって、ホタテ貝の種苗数を急激に増加させることができるようになり、他県への供給もできるようになった。一方、1965年に、放流漁場における輪採制を北海道伊達市で初めて採用されたという記録が残されている。このような変遷を辿り、北海道におけるホタテ貝の養殖は噴火湾に始まり、オホーツク海沿岸地域、そして現在では日本海沿岸を含む北海道全域で生産される一大産業に育った。ここで、2013～2018年度の日本におけるホタテ貝水揚げ量の推移を図1.1に示す^{1,2)}。台風の影響を受けて2016年度および2017年度の水揚げ量が減少しているものの、概ね40～50万トンのホタテ貝が毎年水揚げられている。ホタテ貝水揚げ量の構成をみると、道内天然が半数以上を占めており、道内養殖を含めると、全体の80～90%のホタテ貝は北海道産であることがわかる。このように、北海道は、日本におけるホタテ貝の一大産地である。

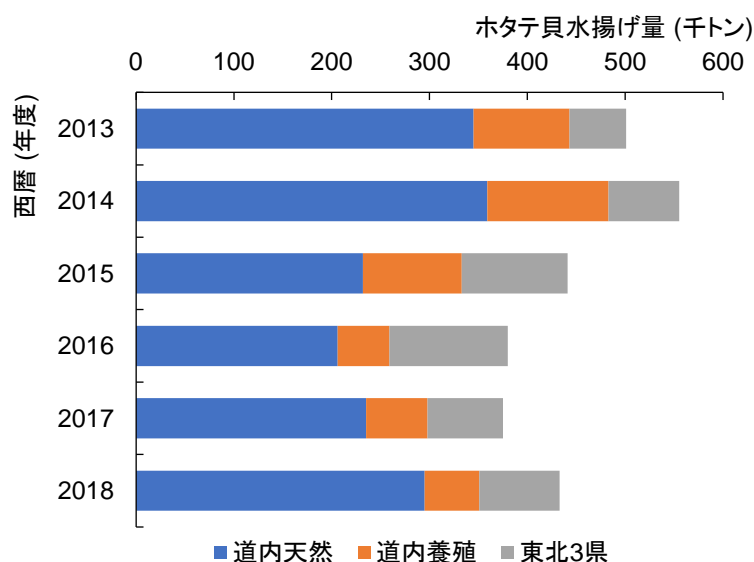


図 1.1 日本におけるホタテ貝水揚げ量の推移^{1,2)}

一方、北海道における水産系廃棄物の推移をみると、図 1.2 のようになる^{1.3)}。水産系廃棄物発生量は、年間、およそ 30~40 万トンであり、ホタテ貝殻、ホタテウロ（食べることができない黒い中腸腺）、付着物、および魚類残さ等の割合が大きい。特に、ホタテ貝殻は全体の 30~40%であり、年間 10~20 万トンのホタテ貝殻が廃棄物として発生している。また、2018 年度におけるホタテ貝殻の地域別発生割合をみると、図 1.3 に示すように、ホタテ貝水揚げ量が多いオホーツク沿岸地域である宗谷管内およびオホーツク管内が全体の約 85%を占めている^{1.3)}。

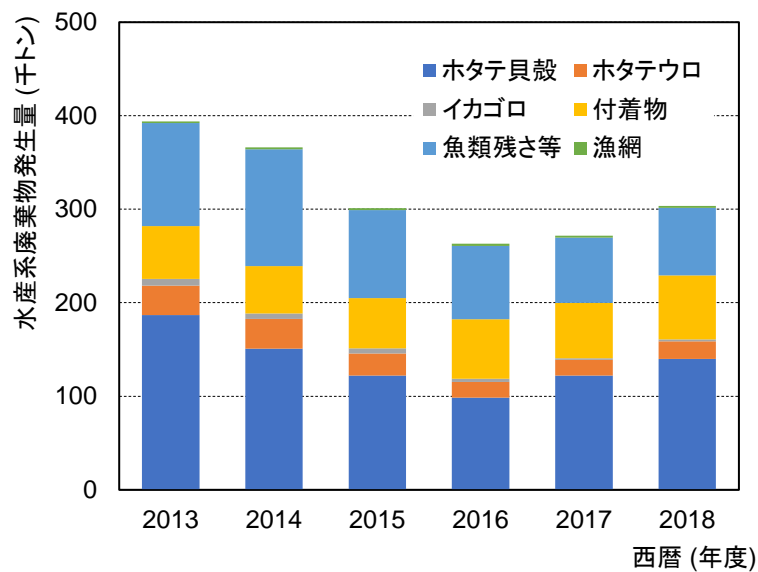


図 1.2 北海道における水産系廃棄物発生量の推移^{1.3)}

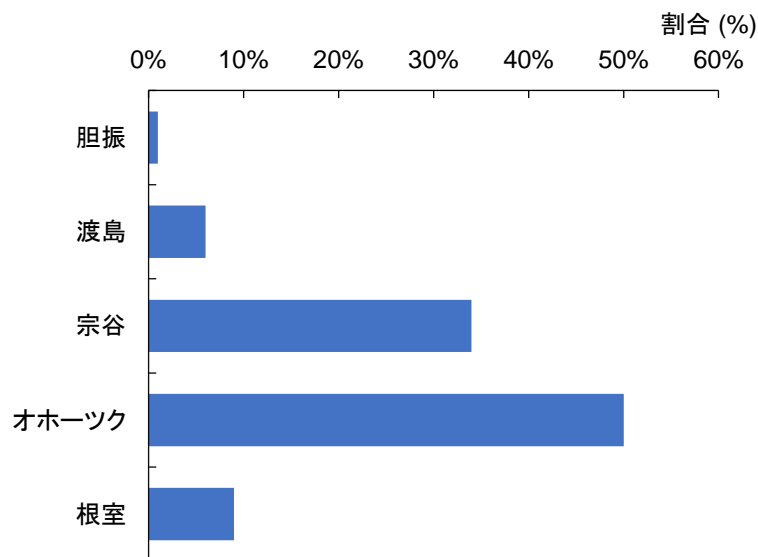


図 1.3 2018 年度における北海道の地域別ホタテ貝殻発生量^{1.3)}

このように、北海道は、日本におけるホタテ貝の一大産地であるが、魚類を対象とした水産業に比べて多量の廃棄物が伴う。ホタテ貝殻は、産業廃棄物として処理することができる量ではなく、積極的な利活用が必須である。北海道水産林務部では、ホタテ貝殻を活用した 48 製品の一覧を公開しており^{1.4)}、資源の有効活用する水産業を積極的に推進している。しかし、写真 1.1 に示すように、2~3 年の養生期間を過ぎても多量のホタテ貝殻が堆積場に放置されたままになっているのが現状であり、有効活用の速度を促進させる必要がある。



写真 1.1 ホタテ貝殻の堆積状況

1.2 ホタテ貝殻粉末の建築材料としての可能性

ホタテ貝殻の組成は、その 99%が炭酸カルシウムである。ホタテ貝殻粉末は水硬性材料ではないものの、石灰を用いた塗り壁材の骨材として利用できるものとする。小山は、青森県における年間 5 万トンにのぼるホタテ貝殻廃棄物の有効活用を目的に、1,050℃以上で焼成したホタテ貝殻粉末を樹脂で固めた材料の強度・変形特性を検討している^{1.5)}。その後、吉田らは、そのホタテ貝殻粉末を用いた材料のホルムアルデヒド低減効果^{1.6)}および抗菌効果^{1.7)}を明らかにしており、建築内装用材料を中心として様々な製品開発が行われている^{1.8)}。

北海道水産林務部で公開しているホタテ貝殻を利用した製品を図 1.4 に示す^{1.4)}。製品数が最も多いのは清掃用品としての「除菌・消臭・防カビ剤」であり、次いで、「食品添加物」である。いずれもホタテ貝殻を粉末にして利用した製品である。食品添加物としてホタテ貝殻粉末を活用するケースとしては、いずれの製品においてもカルシウム増強剤となっている。これらに対し、肥料や土壌改良材のような資材、および土木資材や建築内装材のような構造物に使用する製品がそれぞれ 4~8 品存在する。肥料や土壌改良材では、酸性の土壌を中和させることを目的としてホタテ貝殻粉末を用いているものと考えられる。土木資材については、ホタテ貝殻粉末をコンクリート製品の骨材として、

また、道路のアスファルトのフィラー材として利用している。建築内装材としては、ホタテ貝殻粉末を骨材として塗り壁材に利用する製品が多く、その粉末を塗料に混入させた製品も存在する。ホタテ貝殻粉末を建築内装材に利用した場合、除菌・消臭・防カビ効果に加えて、ホルムアルデヒド低減効果も有することから、一般的な石灰を用いた塗り壁材に比べて付加価値は大きい。しかし、建築内装用の材料としてホタテ貝殻粉末の利用が始まったにも関わらず、製品数としては少ない傾向がある。

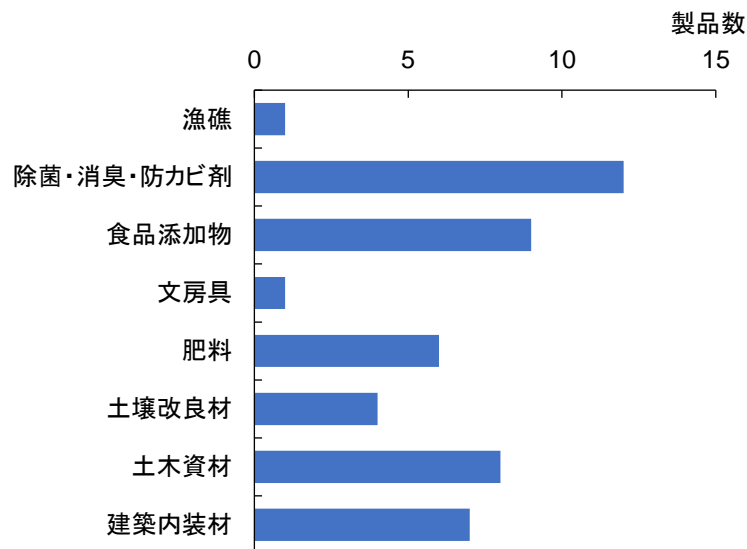


図 1.4 ホタテ貝殻を利用した製品 ^{1.4)}

以上に示すように、ホタテ貝殻粉末は機能性に富み、建築内装用から始まった製品開発は、清掃用品、食品、農業用品、および土木資材へと応用・展開されている。しかし、年間 10～20 万トンに達するホタテ貝殻廃棄物のすべてを有効活用するには至っておらず、依然としてホタテ貝殻が堆積場に放置されているのが現状である。

ホタテ貝殻粉末は、1,000℃以上で焼成した微粉末セラミックスとしているのが一般的である。低温焼成あるいは非焼成のホタテ貝殻粉末は、図 1.4 に示す製品のうち 2 品であり、水産物としての不快臭の残存が懸念されていることが要因の一つとなっている。すなわち、1,000℃以上で焼成したホタテ貝殻粉末の製造コストが高く、建築内装材としての普及が滞っていることを示唆している。また、非焼成のホタテ貝殻粉末を建築外装材として利用することも考慮し、ホタテ貝殻粉末の製造を低コスト化した上で、建築材料として利用量を増加させる大きなポテンシャルが存在しているとも言える。

1.3 木造住宅の高断熱化と建築外装材との関係

ホタテ貝殻粉末の利用拡大を目的として建築外装材を普及させるためには、木造住宅用の外装材を考えることが必須である。木造住宅の外装システムには、モルタルや樹脂を用いた湿式工法と窯業系サイディングやアルミサイディングを用いた乾式工法がある。ホタテ貝殻粉末を利用した外装材としては、湿式工法の塗り壁材に骨材として用いることが可能であると考えられる。

北海道における1970年代までの木造住宅をみると、モルタル外壁が主流であった。モルタル外壁での断熱化が進むにつれて、外側からの雨水の侵入や、図1.5に示すように、内部結露によって木造躯体が腐朽・劣化する事例が多数報告されるようになり、カビの発生による健康被害も懸念された。このことから、外壁の室内側には防湿フィルムを、外壁の外気側、すなわち、外装材の裏面に通気層を設ける断熱外装システムが登場し、雨水侵入対策と内部結露対策が同時に解決され、現在では標準的となっている。このような断熱外装システムに用いる外装材には、窯業系サイディングやアルミサイディングのような乾式工法が採用される。

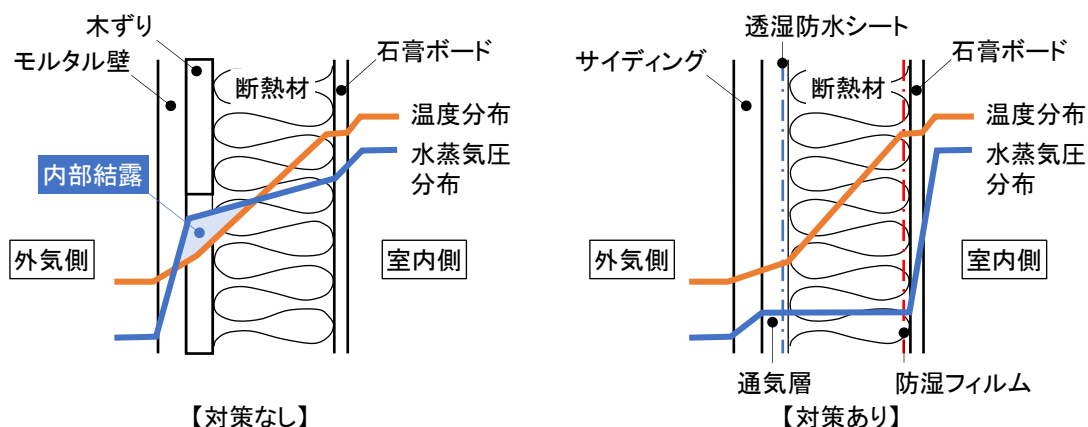


図 1.5 断熱壁の内部結露発生状況とその対策

こうした断熱外装システムが確立されると同時に住宅省エネルギー基準の強化も進み^{1.9)}、厚さ100mmの断熱壁の外気側に断熱材を付加する「外張り断熱外装システム」が現在普及している。外装材の裏面に通気層を設けることが事実上必須となっていることから、図1.6に示すように、外装は乾式工法を採用することになる。一方、湿式工法による外張り断熱外装システムについても、ニーズは高い状況である。従来のモルタル外壁では、その裏面に通気層を設けることができる。しかし、モルタル硬化後の乾燥収縮によりクラックが容易に発生する。従って、エポキシ等を硬化材とした樹脂モルタルで外装を仕上げるのが主流である。写真1.2に示すように、古くから日本で親しまれている漆喰壁のようなデザインにすることも可能である。従来のモルタル仕上げでは、その裏面に通気層を設けることが可能であるものの、乾式のサイディングに比べて外壁が

厚くなり、付加断熱外装システムの場合、施工コストが増加するとともに、開口部周りの防水が困難になるほど外壁が厚くなる。従って、湿式の付加断熱外装システムの場合、通気層を設けずに外装仕上げを行うことが望ましい。また、樹脂モルタルの場合、塗厚が 10 mm 以下で薄いことから、付加断熱システム全体の厚さを抑えるメリットを有するものの、その裏面に通気層を設けることができない。これらのことから、湿式工法は、外壁の厚さが薄くなり、乾式工法と同程度の施工コストになるものの、防水性が劣ると評価されることから、湿式工法が避けられるのが現状である。こうした理由で古くから存在する湿式工法の外装材が淘汰されるべきではなく、また、木造住宅における外装デザインの多様化は必要であることから、湿式工法においても乾式工法と同等の外張り断熱外装システムを開発することが重要である。外壁の内部結露対策は、室内側に防湿シートを配置することで充足すると考えられるが、外装材裏面の通気層は、外壁内部の除湿に加えて排水層としても取り扱われている。従って、ホタテ貝殻粉末の利用拡大を目的とした外張り断熱外装システムにおいては、外壁の防水、さらには、その内部に侵入した雨水等の排水性能を確保することが大きな課題である。

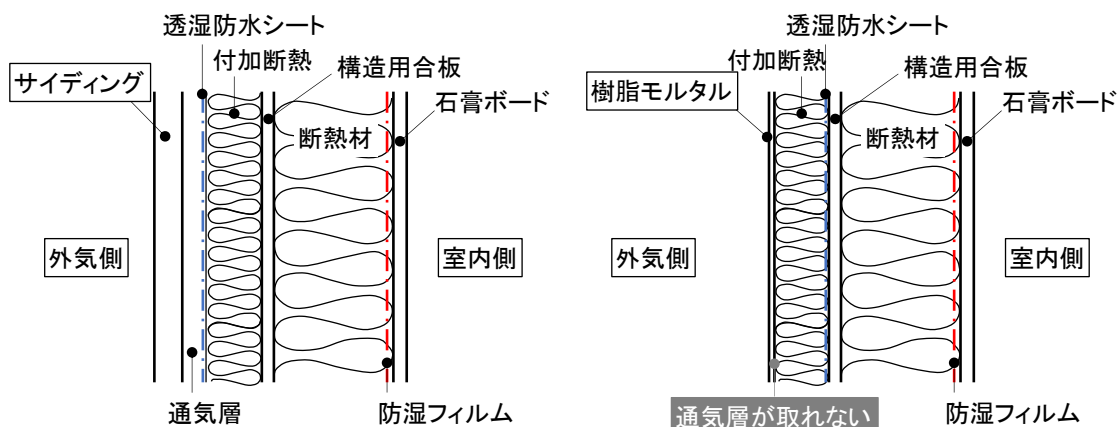


図 1.6 乾式工法外壁および湿式工法外壁の外張り断熱工法



写真 1.2 漆喰壁の施工事例

1.4 既往の研究

1) 塗り壁材の変遷

日本では古くから土、砂、および水硬性がある粉末などを混ぜた後に水を加えてペースト状にし、左官によって仕上げる湿式工法により建築物の内外装を行ってきた。主に使用されてきた塗り壁材としては、土や漆喰が挙げられる。これらのうち漆喰とは、中国語で石灰を意味し、炭酸カルシウムを主成分とする石灰岩を高温焼成し、水酸化カルシウム（消石灰 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ ）状にした粉体に、海草糊やスサ（麻の繊維や紙などを細かく切ったもの）を混ぜ、水を加えペースト状にしたものである。その起源は5千年前とも言われ、耐火性、調湿性に優れていることから、古代エジプトのピラミッドの内壁にも塗布利用されたとの記録がある。我が国でも、奈良県にあるキトラ古墳石室内の漆喰壁画は、1,300年前のものである^{1.10)}。角田は^{1.11)}、古代から中世前期における石灰と漆喰の利用について我が国における石灰岩を加熱して消石灰とする歴史から、貝灰の製造方法、石灰が使用されている古墳の解説などを詳しく報告している。

戦国時代からは、城郭や神社・仏閣に広く利用され、耐火性や耐久性を高めるだけでなく、近年大改修を行った兵庫県の姫路城に代表されるように、白鷺城と称される美しい純白の輝きを実現した。2009年9月に始まり、2015年3月に竣工した姫路城における平成の大修理後の状況を写真1.3に示す。内外壁面から屋根瓦補強までを純白の漆喰にて左官工事を行い、5年を超す工事を経て姫路城は美しい姿に復活した。



写真 1.3 姫路城における平成の大改修

また、漆喰壁には、消石灰のほかに貝灰と呼ばれる貝殻を焼成した粉末を配合することでも知られる。牡蠣灰や赤貝灰などはもっとも一般的な材料であり、耐火性を保持するだけでなく、強度、硬度、亀裂防止を向上させる骨材として、古代から活用されてきたことを建設省建築研究所の論文に記録されている^{1.12)}。福岡県柳川市にある赤貝を原料とする貝灰の製造状況およびホタテ貝殻粉末入り内装材の施工状況を写真 1.4 に示す。



写真 1.4 製造された貝灰およびホタテ貝殻粉末入り内装材の施工状況

2) 塗り壁材によるシックハウス対策に関する研究

時代の変遷とともに木造住宅で使用する部材および仕上げ材の生産合理化が進み、建材という工業製品が内外装壁材の主役となっていった。北海道の木造住宅をみると、内装材には石膏ボード、外装材には窯業系サイディングおよびアルミサイディングが主流となった。一方、北海道における木造住宅の高断熱・高気密化が急速に普及し、主に壁紙の接着剤に含まれるホルムアルデヒドのような VOC（揮発性有機化合物）に起因するシックハウスが社会問題化した。このため、2003 年 7 月に建築基準法が改正され、シックハウス症候群予防のための対策が盛り込まれた。具体的には、居室の 24 時間換気が義務化されたとともに、ホルムアルデヒド発散建築材料の発散量に応じてその建築材料の使用面積を制限するものである。

これに対し、自然素材を用いた塗り壁材が VOC を吸着することに注目が集まった。前掲の小山^{1.5) 1.8)}、吉田らの研究では^{1.6) 1.7)}、ホタテ貝殻セラミックにはホルムアルデヒド低減機能を有するとともに抗菌作用なども有しており、機能性に優れた素材であるが明らかにされている。その後、植原らは^{1.13)}、ホタテ貝灰を用いた建材の各種性能を調査し、貝灰には石灰と同等の調質性能やガス吸着性能、防カビ性能が確認できたとしている。ホタテ貝殻以外には、珪藻土を用いた塗り壁材の研究が進められている。青木らは^{1.14)}、珪藻土入り塗り壁材を用いた VOC 吸着効果に関する検討において、多孔質

である珪藻土を用いた塗り壁材を内装材として使用した場合、室内の VOC 濃度にどのような影響を及ぼすか、居住空間を想定したユニットハウスを用いて検証を行った。坂本らは^{1.15)}、珪藻土壁材によるホルムアルデヒド低減に関する研究の中で、実際の住環境での性能を把握するため簡易式チャンバーを作り、室内空間のホルムアルデヒド低減効果の評価を測定した。浅田らは^{1.16)}、多孔質素材を用いた塗り壁材の吸着特性において、多孔質素材の珪藻土、ゼオライト、備長炭の3種類を対象に小型ステンレスチャンバーを用いて、トルエンの捕集と分析を行った。これらの結果はいずれも多孔質である珪藻土に顕著な効果を確認し、ホルムアルデヒドをはじめとする VOC が低減することを明らかにした。

また、消石灰（水酸化カルシウム）を主原料とする漆喰壁の機能性についても多くの研究がなされている。小竿らは^{1.17)}、室内空気汚染質に対する漆喰壁の特性において、循環送風機付ステンレスチャンバーを使い、漆喰壁を検体としたホルムアルデヒドの吸着性能試験を行った。浅田らは^{1.18)}、漆喰壁におけるホルムアルデヒドの吸着特性において、漆喰壁、ゼオライト、珪藻土のホルムアルデヒド吸着性能を比較し、漆喰壁が一番低減効果があることを示した。松本ら^{1.19)}、篠原らは^{1.20)}、漆喰壁の吸放湿性能と細孔構造、吸放湿性能と比表面積について、配合する消石灰以外のすき、のり、砂の量により、吸放湿性能に違いがあることを示した。これらの研究では、漆喰壁においても珪藻土と同等の機能性を有していることが明らかにされている。

珪藻土とは珪藻の化石からなる岩石を、採掘後に粉状にして、塗り壁材としたものであり、製造には手間がかかる。これに対し、ホタテ貝殻は毎年、確実に生み出される廃棄物であり、骨材として製造するコストは、珪藻土に比べて安価である。従って、ホタテ貝殻粉末を塗り壁材とすることは、自然素材を活用した機能性に富む建築材料として極めて合理的なものであると言える。

3) 木造住宅における外壁の防水性・排水性に関する研究

ホタテ貝殻粉末の利用拡大を目的とした湿式外張り断熱システムの開発では、外壁の防水性・排水性について大きな課題がある。

北海道における木造住宅の外壁の防水性に関する既往の研究をみると、防水対策や内部結露対策としての通気層工法に関する研究が行われている。通気層については、鈴木らは^{1.21)}、^{1.22)}、^{1.23)}、排水・排湿メカニズムとその効果を明らかにしている。野上らは^{1.24)}、通気層内の湿度変化の測定評価から、外壁通気層の重要性を明らかにしている。また、齋藤らは^{1.25)}、繊維系断熱材充填工法を対象とし、防湿・気密欠損が壁体の防露性能に及ぼす影響を解析的に検討している。これらの研究をみると、外壁の防水・漏水においては対象となっていない。

一方、漆喰やモルタル壁となることが多い湿式工法は、古くは松下によって防水理論の構築が行われ、防水性の確保手法は、材料の透水性をある程度許容した上で、壁体内

の木材などに水分が到達しない塗厚さを確保することが基本的な考え方である^{1.26)}。漆喰やモルタル内に透水してしまった水分は材料内を重力によってゆっくりと下方へ移動、温度上昇によって蒸発することを期待して、木材の早期腐朽を防止しようとするものである。このように、湿式塗り材で外装を仕上げる通気層を設けない外張り断熱工法は、経年劣化等により表面止水が破損した場合、断熱材の裏面、室内側に雨水が浸入することが懸念される。通気層のない木造外壁の防水性に関する既往の研究をみると、宮村らは^{1.27)}、透湿防水シートの捲れが壁内への雨水侵入の危険性を高めることを指摘している。また、大原ら^{1.28)}、毛利ら^{1.29)}、榎本ら^{1.30)}、梅田らは^{1.31)}、開口部まわりの防水性能を向上させる目的で、塗膜防水や粘着性防水シートの適用や透湿防水シートと防水テープの組合せ適性および施工手順に関する検討を行っている。このように、いずれの研究においても、透湿防水シートで雨水の侵入を防止しようとするものである。湿式外断熱壁体については、伊庭らは^{1.32)}、その劣化性状および温度変動について実験的に検討しているが、防水性能については検討されていない。

以上に示すように、湿式外張り断熱システムを対象とした外壁の防水性については、研究が行われていない。試験に基づいた防水性の評価方法のうち、JISA-1414-3:2010をみると^{1.33)}、建築用パネルを対象とした温湿度・水分に対する試験方法が示されているものの、本研究で対象としている外張り断熱工法については、示されていないのが現状である。現在、木造住宅の耐久性向上に向けての取組みが進められており^{1.34)}、外張り断熱工法における防水・漏水に対する試験方法の確立が望まれている。

4) 外張り断熱外装システムの防火性能に関する研究

2015年7月に公布された「建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律（建築物省エネ法）」はこれまで数回改定され、現在においては、建築物の省エネルギー化が事実上義務化された形になっている^{1.35)}。木造住宅で普及している外張り断熱外装システムは、一般建築物においても適用可能であると考えられるものの、発泡系断熱材が多く使用される外装システムであることから、その防火性能を適正に評価する必要がある。

糸毛らは^{1.36)}、木造建築における外張り断熱壁を対象に、4種類の断熱材における防火性能について実験的な検討を行っている。実験の結果、断熱材が厚いほど壁体表面の温度が上昇することを指摘している。趙らは^{1.37)}、耐火構造の壁体に厚さ50～300mmのEPS断熱材を用いた外装を対象に加熱実験を行っている。その結果、EPS断熱材の厚さが100mm以下の場合には融解落下し、200mm以上の場合には外装表面温度が急上昇し、試験体上方まで延焼が拡大したことを指摘している。

このように、外張り断熱外装システムの防火性能としては、断熱材が厚いほどその性能が低下するという断熱性と耐火性との関係が反比例する結果が既往の研究で得られている。

1.5 本研究の目的

これまでに示した研究の背景および既往の研究をみると、ホタテ貝殻粉末の利用拡大には、その機能性を生かした建築内装用の塗り壁材のみならず、焼成温度を下げた低コスト化した、あるいは安価な非焼成のホタテ貝殻粉末を用いた建築内装および外装用の塗り壁材の開発が必要である。湿式外張り断熱外装システムにおいては、ホタテ貝殻粉末を用いた樹脂モルタルの開発に加えて、通気層を設けることができないことから、代替法の防水性・排水性を明らかにする必要がある。さらに、当該外装システムの普及拡大に向けては、防水性・排水性を確保するための製品の生産性を考慮した技術開発も必要となる。また、外張り断熱外装システムの防火性能は、断熱材が厚いほど、すなわち、断熱性能が高いほど火災安全性が低下する関係があることから、木造住宅だけでなく一般の木造建築にホタテ貝殻粉末を用いた湿式外張り断熱外装システムを適用させるためには、その防火性能を向上させる必要がある。

以上に示すことを鑑みると、本研究の目的は、以下のようになる。

- 1) ホタテ貝殻の焼成温度を下げ、その組成を大きく変化させないとともに、ホタテ貝殻粉末の製造コストを低減させた内装用塗り壁材の開発
- 2) 安価な非焼成のホタテ貝殻粉末を用いた外装既調合モルタルの開発
- 3) 円滑な壁内排水を行うためのホタテ貝殻粉末を用いた湿式外張り断熱外装システムの開発
- 4) EPS 断熱材に壁内排水が可能な排水溝を形成する方法の開発
- 5) 本研究で開発した湿式外張り断熱外装システムにおける防火性能の向上

1.6 本論文の構成

本論文の構成は、図 1.7 に示すように、第 1 章から第 7 章で構成される。

- 第1章 序論
- 第2章 ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の開発
- 第3章 ホタテ貝殻粉末を用いた既調合外装モルタルの開発
- 第4章 湿式外張り断熱外装システムの開発
- 第5章 EPS 断熱材に設ける排水溝形成法の開発
- 第6章 湿式外張り断熱外装システムにおける防火性能の向上
- 第7章 結論

第 1 章では、研究の背景、既往の研究、本研究の位置づけと目的、および本論文の構成を示した。

第 2 章では、本研究において最初の取り組みであった内装用塗り壁材の開発をテーマとし、焼成温度 400℃としたホタテ貝殻粉末の製造方法、内装用塗り壁材の調合を検討し、成分分析および理化学特性を測定した。さらに、測定結果に基づいてホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材を評価した。

第 3 章では、安価な非焼成ホタテ貝殻粉末の利用拡大を目的に、外装モルタルの開発を行った。既調合軽量モルタルの既製品を調査し、適正な価格で販売可能な調合計画を作成し、試験施工を行って開発した既調合モルタルの品質・性能を確認した。

第 4 章では、ホタテ貝殻粉末を用いた湿式外張り断熱外装システムを開発した。通気層を持たない木造外壁構造において課題となっている防水性・排水性について、外張り断熱材を加工性に優れた EPS とし、その裏面に排水溝を設けることによって防水性・排水性を確保することを考えた。実物大試験体を用いてフィールド実験および実験室実験を行い、外張り断熱材裏面における排水溝の防水性・排水性を検証した。

第 5 章では、EPS 裏面における排水溝形成法の開発を目的とした。排水溝形状と工場での加工性・生産性との関係を検討し、第 4 章と同じ試験方法で防水性・排水性を検証した。

第 6 章では、湿式外張り断熱外装システムの適用拡大には不可欠な防火性能の向上を目的とした。EPS が加熱後溶融落下したのちに、木造構造躯体への延焼を遅らせる施工方法を提案し、予備試験および本試験において防火性能の向上に繋がる結果が確認された。

最後に、第 7 章では、本研究を総括し、今後の課題を記載した。

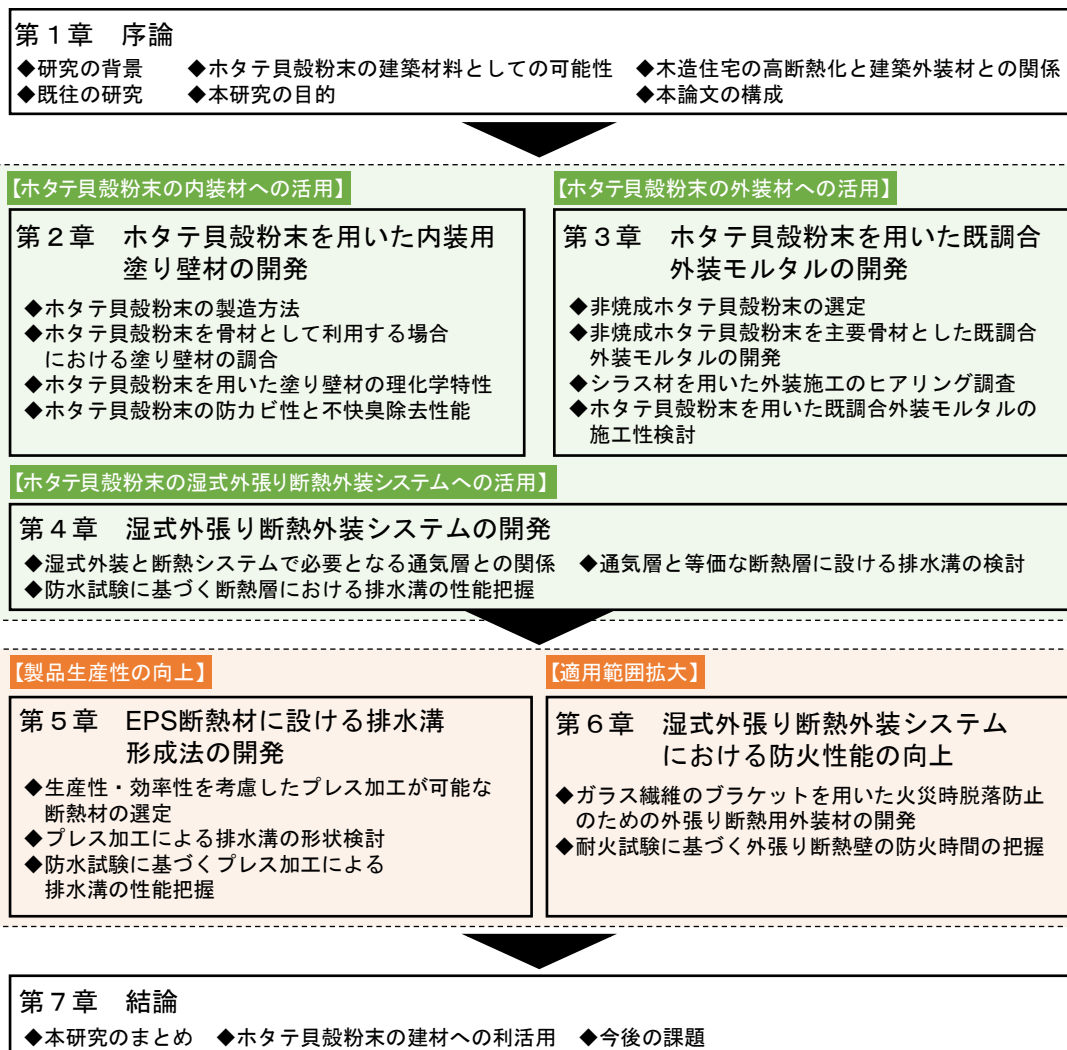


図 1.7 本論文の構成

【第1章の参考文献】

- 1.1) 小坂義信: 日本におけるホタテガイ増養殖と研究の変遷, 水産増殖, Vol.65, No.3, pp.271-287, 2017
- 1.2) 北海道漁連: ホタテ貝水揚量推移(4月~3月), 入手先 <<https://www.gyoren.or.jp/data/pdf/hotate.pdf>>, 参照 2020.9.2
- 1.3) 北海道水産林務部水産局水産振興課: 令和元年度(2019年度)水産系廃棄物発生量等調査(平成30年度発生分), 入手先 <<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/ssk/30haikibutu.pdf>>, 参照 2020.9.2
- 1.4) 北海道水産林務部水産局水産振興課: ホタテ貝殻製品一覧, 入手先 <<http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/ssk/hasseijyoukyou.htm>>, 参照 2020.9.2
- 1.5) 小山信次, 藤田成隆: ホタテ貝殻を含む高分子材料の変形挙動, 八戸工業大学研究紀要, 第20巻, pp.185-188, 2001.2
- 1.6) 吉田朋央, 小山信次, 奥田慎一, 笹谷広治, 福原長寿, 小比類巻孝幸: ホタテ貝殻セラミックスのホルムアルデヒド軽減機能について, 八戸工業大学異分野融合科学研究所紀要, 第1巻, pp.113-116, 2002.2
- 1.7) 吉田朋央, 小山信次, 奥田慎一, 笹谷広治, 福原長寿, 小比類巻孝幸: ホタテ貝殻セラミックスの抗菌機能について, 八戸工業大学異分野融合科学研究所紀要, 第1巻, pp.117-120, 2002.2
- 1.8) 小山信次: ホタテ貝殻を有効利用した新しい機能性材料の開発と実用化, 農林水産研究ジャーナル, Vol.28, No.6, pp.38-42, 2005
- 1.9) 北海道建設部住宅局住宅課: 第一部 平成25年住宅省エネルギー基準への対応について, 入手先 <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/kn/jtk/grp/kankyous_tebiki1-1.pdf>, 参照 2020.09.02
- 1.10) 国営飛鳥歴史公園: キトラ古墳壁画, 入手先 <<https://www.asuka-park.go.jp/area/kitora/tumulus/>>, 参照 2020.09.02
- 1.11) 角田清美: 古代から中世前期における石灰と漆喰の利用, 専修人文論集, No.88, pp.49-76, 2011.3
- 1.12) 中村伸: 漆喰壁の標準調査, 日本建築学会研究報告, No.8, pp.156-159, 1950.10
- 1.13) 植原日菜子, 中島裕輔, 山窪泉: ホタテ貝灰を用いた環境調整型建材の各種性能調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 環境工学I, pp.1377-1378, 2016.7
- 1.14) 青木貴均, 石川伸介: 珪藻土入り塗り壁材を用いたVOC吸着効果に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 環境工学II, pp.863-864, 2012.7
- 1.15) 坂本新, 岡田慎一郎: 珪藻土壁材によるホルムアルデヒド低減に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 環境工学II, pp.773-774, 1999.7
- 1.16) 浅田浩嗣, 山下功太郎, 成田泰章, 野崎淳夫: 多孔質素材を用いた塗り壁材の吸着特性, 日本建築学会四国支部研究報告集, No.15, pp.85-86, 2015.5

- 1.17) 小竿真一郎: 室内空気汚染質に対する漆喰壁の特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 環境工学Ⅱ, pp.975-976, 2004.7
- 1.18) 浅田浩嗣, 西岡宣隆, 野崎淳夫: 多孔質素材を用いた塗り壁材の吸着特性—珪藻土, ゼオライト, 炭(備長炭)—, 日本建築学会四国支部研究報告集, No.15, pp.41-42, 2005.5
- 1.19) 松本武彦, 石原沙織: 漆喰壁の吸放湿性能と細孔構造, 日本建築学会関東支部研究報告集, No.83, pp.269-272, 2013.3
- 1.20) 篠原千尋, 石原沙織: 漆喰壁の吸放湿性能と比表面積について, 日本建築学会関東支部研究報告集, No.84, pp.257-260, 2014.2
- 1.21) 鈴木大隆, 廣田誠一, 福島明: シート状防風材を用いた木造断熱壁における通気層空隙の確保に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.480, pp.123-128, 1996.2
- 1.22) 鈴木大隆, 廣田誠一, 本間義規, 鎌田紀彦: 傾斜屋根における天井断熱・屋根断熱モデルの冬期温度特性について, 日本建築学会計画系論文集, No.486, pp.27-34, 1996.8
- 1.23) 鈴木大隆, 本間義規, 廣田誠一, 鎌田紀彦, 坂本弘志: 30°勾配屋根住宅の立地条件や断熱・換気条件を考慮した小屋裏・通気層温度解析結果と考察, 日本建築学会計画系論文集, No.504, pp.25-31, 1998.2
- 1.24) 野上在, 齋藤宏昭: 漏水を考慮した外壁通気層の湿気性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-Ⅱ, pp.469-470, 2016.7
- 1.25) 齋藤宏昭, 三浦尚志, 桑沢保夫: 木造断熱外壁の防湿・気密措置と防露性能に関する研究—繊維系断熱材充填工法に対する要求性能—, 日本建築学会環境系論文集, 第78巻, 第688号, pp.461-470, 2013.6
- 1.26) 松下清夫: 雨仕舞法の理論, 工学図書出版社, 1948.2
- 1.27) 宮村雅史, 石川廣三, 梅田泰成, 牧田均, 木村雄太, 西田和生: 木造住宅の雨水侵入に関する実験的研究 その1 屋根, 外壁, バルコニー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.79-80, 2011.7
- 1.28) 大原信二, 小嶋秀典, 上村昌樹, 渡部嗣道: 木造軸組ラスモルタル壁の防水性能評価試験(その2. 防水性能試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.471-472, 2010.7
- 1.29) 毛利聡, 大久保孝昭, 李亮, 高橋芳徳, 根元央希, 流田靖博: 粘着型防水紙の活用による木造ラスモルタル外壁の品質向上の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第721号, pp.415-423, 2016.3
- 1.30) 榎本孝之, 北野公一, 宮村雅史, 森田育男, 石川廣三: 木造住宅の耐久性向上に関わる建物外皮の構造・仕様とその評価に関する研究 透湿防水シートと防水テープとの組合せ適性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1,

pp.1103-1104, 2015.7

- 1.31) 梅田泰成, 石川廣三, 宮村雅史, 牧田均, 中野一郎, 河村優輝: 木造住宅の耐久性向上に関わる建物外皮の構造・仕様とその評価に関する研究 外壁通気構法窓まわりの防水施工方法による防水性の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.1117-1118, 2016.7
- 1.32) 伊庭千恵美, 鈴木大隆: 複合劣化試験装置を用いた建築外皮の耐久性評価手法の開発 その 2 湿式外断熱壁体の劣化性状と温度変動, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.77, pp.445-446, 2004.7
- 1.33) 日本工業規格: JIS A 1414-3: 2010, 建築用パネルの性能試験方法, 第3部: 温湿度・水分に対する試験, 入手先 < <https://kikakurui.com/a1/A1414-3-2010-01.html> >, 参照 2020.09.03
- 1.34) 国土技術政策総合研究所: 木造住宅の耐久性向上に関わる建物外皮の構造・仕様とその評価に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.975, 入手先< <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0975.htm> >, 参照 2019.09.9
- 1.35) 国土交通省: 建築物省エネ法のページ, 入手先 <https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/jutakukentiku_house_tk4_000103.html>, 参照 2020.09.04
- 1.36) 糸毛治, 入江雄司, 小浦孝次, 鈴木大隆: 発砲プラスチック系断熱材を用いた木造外張り断熱壁体の防火性能に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), A-2, pp.307-308, 2008.7
- 1.37) 趙玄素, 坂本篤, 西尾悠平, 野口貴文, 田村政道, 吉岡英樹, 中村正寿: 湿式外断熱工法の上方延焼予測のモデル化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 防火, pp.345-348, 2014.7

第2章 ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の開発

2.1 本章の目的

本章の目的は、ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の開発である。第1章で示したように、ホタテ貝殻粉末は、漆喰やモルタルのような建築物の塗り壁材に利用することが可能である。ホルムアルデヒドなどのVOCを低減する効果を有していることが明らかになっており^{2.1), 2.2)}、シックハウス対策のうちの一つとして着目されている建築材料である。この場合におけるホタテ貝殻粉末の製造では、高温で焼成することにより炭酸カルシウムから水酸化カルシウムに組成変化させている。すなわち、消石灰を生成していることになり、既往の研究では、1,000℃以上で焼成したホタテ貝殻粉末を用いて様々な機能性を明らかにしている。

ここで、漆喰壁材の構成に基づくホタテ貝殻粉末の利用方針を図2.1に示す。漆喰壁材は、砂などの骨材と水硬性を有する消石灰、さらには、耐久性や施工性を考慮して少量の海藻糊などを組み合わせ、これらを水で混ぜる湿式仕上げ材料である。既往の研究をみると、ホタテ貝殻を高温焼成して消石灰に変化させ、その状態における様々な機能性を明らかにしている。しかし、高温で焼成して生成した消石灰は、多くのホタテ貝殻を消費させるような適正な製造コストであるとはいえない。これに対し、ホタテ貝殻を低温焼成した場合は、組成変化せずに炭酸カルシウムのままであることから、消石灰のように脆くならない。すなわち、低温焼成したホタテ貝殻粉末を内装塗り壁材の骨材として利用し、市販されている消石灰と組み合わせることによって機能性を維持したままホタテ貝殻の利用量を増加させることができると考えられる。

このようなことから本章では、炭酸カルシウム(CaCO₃)の組成を変えることなく、低温で焼成したホタテ貝殻粉末を骨材として利用する内装用左官塗り壁材(以下、ほたて漆喰壁という。)の開発を目的とした。低温で焼成したホタテ貝殻粉末と消石灰を組み合わせた場合における抗カビ性能および不快臭除去性能の理化学特性を実験的に把握し、内装用塗り壁材の開発を行った。

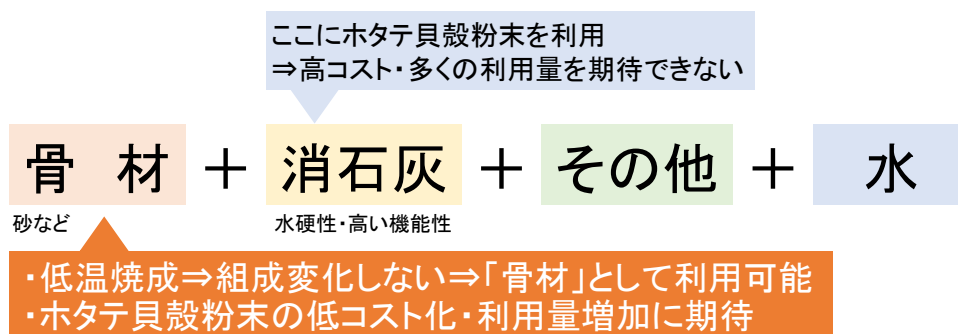
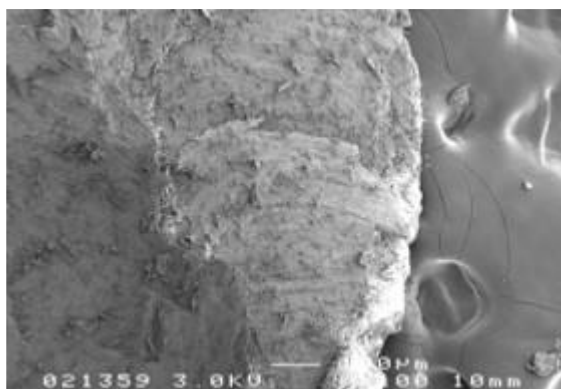


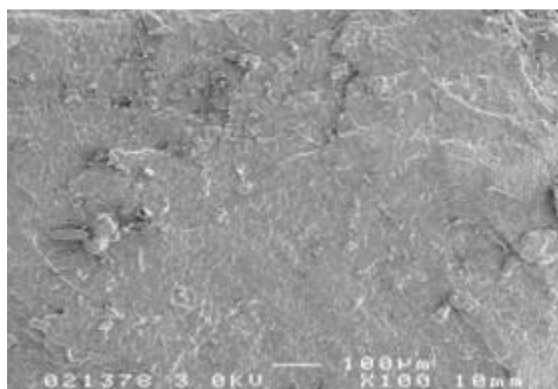
図 2.1 漆喰壁材の構成に基づくホタテ貝殻粉末の利用方針

2.2 ホタテ貝殻の焼成温度

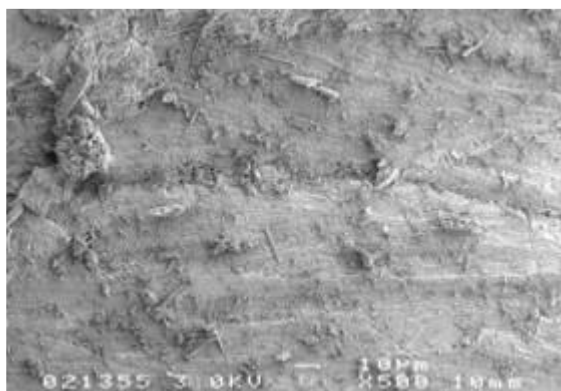
非焼成および700℃で焼成したホタテ貝殻を電子顕微鏡で撮影した。100倍および500倍で撮影した結果を写真2.1に示す。非焼成と700℃焼成とで比較すると、ホタテ貝殻の表面に付着していた有機物が除去されていることが分かる。しかし、700℃で焼成をすることにより粉末が脆くなったことを確認した。ホタテ貝殻の組成が炭酸カルシウムから酸化カルシウムに変化した可能性があることから、骨材としては利用できない。一方、ホタテ貝殻の有機物は700℃よりも低温で焼成することでも除去できる可能性があり、その場合においても水産物としての不快臭を除去できる。これらのことから本研究では、ホタテ貝殻の組成を炭酸カルシウムから酸化カルシウムに変化させることなく不快臭を除去するという目的で、400℃の温度で焼成したホタテ貝殻から粉末を作成することとした。なお、400℃焼成のホタテ貝殻粉末における骨材としての利用可能性の検証は、試験施工を経た実施工で行い、ホタテ貝殻粉末を骨材として利用することが可能であることを把握した。



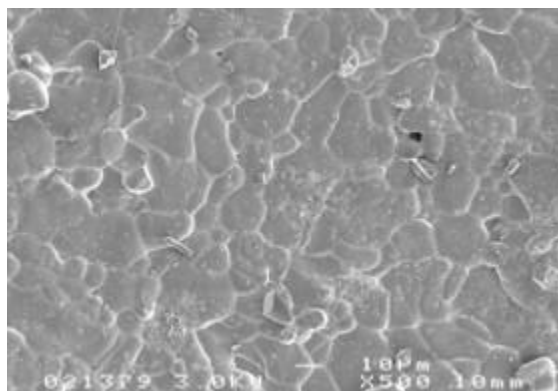
【非焼成ホタテ貝殻:100倍】



【700℃焼成ホタテ貝殻:100倍】



【非焼成ホタテ貝殻:500倍】



【700℃焼成ホタテ貝殻:500倍】

写真 2.1 電子顕微鏡で撮影したホタテ貝殻粉末

2.3 ホタテ貝殻粉末の製造方法

北海道におけるホタテ貝養殖は、胆振管内の噴火湾から始まった。ホタテ貝殻加工工場は、噴火湾沿岸地域に位置する北海道伊達市の株式会社北海道優雅が保有・運営していた。当該工場では、北海道漁連伊達工場から廃棄されるホタテの源貝を煮沸する際の煮汁を回収し、それらを原料として、ホタテ風味調味料の製造をしていた。また、加工工場の効率化を促進するため、ホタテ貝殻を粉砕して粉末化した「夢の砂」という名称の資材を製造していた。20 kg の袋詰めされたホタテ貝殻粉末は、川砂の代替品として、幼稚園や小学校の砂場、ゴルフ場のバンカーなどに利用されていた。しかし、計画通りの成果は得られず、「夢の砂」の製造は中止に至った。

北海道におけるホタテ貝殻の発生量は、オホーツク振興局管内が最も多く、ホタテ貝殻加工工場の規模も大きい。このことから本研究では、写真 2.2 に示す北海道標津町にある株式会社ビッシェルが運営する工場において生産された貝殻粉末を用いることとした。



写真 2.2 北海道標津町にある株式会社ビッシェル・ホタテ貝殻加工工場

ホタテ貝殻は、そのほとんどが水産加工場から廃棄されるものである。水産加工場に持ち込まれる生ホタテ貝は、工場に運ばれるとすぐに大きな鍋に入れられ、3 回ほどボイル処理される。その後、貝殻とむき身をきれいに剥離し、貝柱については食材・食品として出荷される。これに対し、貝柱以外の部位は、そのほとんどが産業廃棄物として処理される。ホタテウロと呼ばれる内臓部分には、水銀やカドミウムのような有害物質が含まれているため、専用の処分場において焼却処理され、多くは農業用の堆肥として再利用されている。同時に、ホタテ貝殻も廃棄物として発生することになるが、水産加工場で複数回ボイル処理されたホタテ貝殻は、フジツボやザラボヤなどの付着物やその他の有機物が除去されている。従って、ホタテ貝殻は、その後において加工し易い状態でありながら廃棄物として位置付けられているものである。一方、水産庁漁港漁場整備

部および財団法人漁港漁場漁村技術研究所の「北海道 ホタテ貝殻による漁場造成ガイドライン」^{2,3)}によると、貝殻の利用と廃棄物処理法に基づく制度の対応では、貝殻を有価物として利用することを前提としている。しかし、株式会社ビッシェルでは、水産加工業者からホタテ貝殻を無償で引き取り、工場へ搬入後、粉碎焼成処理後に土木資材や畜産飼料などを製造しているのが実態である。このような土木資材や畜産飼料のためのホタテ貝殻粉末を建築内装用塗り壁材として利用することとした。

図 2.2 に、株式会社ビッシェルの工場におけるホタテ貝殻粉末の製造フローを示す。水産加工工場から回収した貝殻を 2~3 年間、屋外に堆積して雨水や降雪にさらし、日射自然乾燥を行う。次に、20 mm から最大 50 mm 程度の大きさで 1 次粉碎を行い、粗粉碎された貝殻を、重油で燃焼するロータリーキルン機にて 400°C の温度で 20 分間焼成する。ホタテ貝殻を焼成することによって、貝殻表面の微細な孔に含まれる有機物を除去し、貝殻本体の不快臭を除去するとともに、2 次粉碎工程へ向けて貝殻が破碎しやすい硬度とする。また、もうひとつの重要な理由として、珪藻土や備長炭には多孔質性能があり、微細孔が様々な物質を吸着することが確認されているが、ホタテ貝殻表面に付着する有機物を除去することにより細孔が現れ、珪藻土や備長炭と同様の機能が期待できるようになる。その後、最小径が 0.1 mm 単位までの粒度とするために 2 次粉碎を行い、各種製品の用途ごとの粒度メッシュを設置したふるい機にかけ、同一粒度のホタテ貝殻粉末がそれぞれ精製される。当該工場では、粒度は 5 種類としており、大きい順に 1 号品~5 号品と定義している。本研究では、粒度の小さい 4 号品 (0.6~1.2 mm) および写真 2.3 に示す 5 号品 (0.25~0.6 mm) の 2 種類を用いて内装用湿式材を開発することとした。



写真 2.3 製造されたホタテ貝殻粉末 (5 号品)

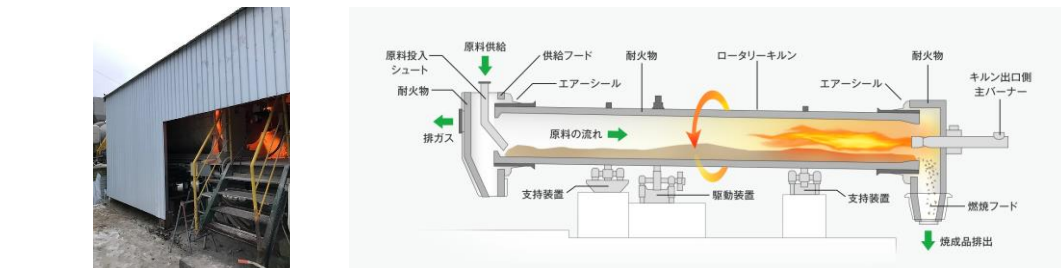
1. 水産加工工場排出貝殻を2~3年間、堆積放置



2. 1次粉砕 (20 mm~50 mm程度に破碎)



3. ロータリーキルン炉にて焼成処理 (400°C前後で20分)



4. 2次粉砕 (0.2 mm~0.6 mmでふるう)



5. ホタテ貝殻粉末として製造








図 2.2 ホタテ貝殻粉末の製造工程

2.4 ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の調合計画

本研究では、中村が示した漆喰壁の標準調合を参考として²⁴⁾、ホタテ貝殻粉末を骨材として用いた内装用塗り壁材の調合計画を行った。表 2.1 に、調合計画表を示す。全体質量の 2/3 がホタテ貝殻粉末で構成するようにした。ホタテ貝殻粉末の構成比が大きくなることから、粉末粒度にばらつきを与えるため、4 号 (0.6~1.2 mm) および 5 号 (0.25~0.6 mm) の 2 種類を同じ割合で調合した。ホタテ貝殻粉末を低温焼成して骨材として利用する場合、当該粉末は、水酸化カルシウム、すなわち、消石灰に組成変化していないため、VOC 吸着効果、抗カビ効果、並びに消臭効果など、内装材としての機能が十分に発揮されるとは言えない。従って、セメントを使用せずに市販の消石灰のみを使用する計画とし、内装材としての機能性維持と漆喰壁のような仕上がりを目指した。また、施工性を高めるため、海藻糊を 0.5 kg 加えるとともに、乾燥後の収縮によるひび割れを防ぐ目的で、ごく微量ではあるがナイロン繊維を加えた。このような調合に基づいて「ほたて漆喰壁」という品名で建築内装用塗り壁材として製造している。

表 2.1 ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の調合計画表

ホタテ貝殻粉末 4号品	ホタテ貝殻粉末 5号品	消石灰	海藻糊	ナイロン繊維	合計質量
					
32.5%	32.5%	32.5%	2.5%	微量	100%
6.5 kg	6.5 kg	6.5 kg	0.5 kg	微量	20 kg

2.5 ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の理化学特性

400℃で焼成したホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材について、始めに、化学組成分析を行った。塗り壁材に含まれているホタテ貝殻粉末および消石灰を個別に分析の対象とし、塗り壁材と比較できるようにした。次に、化学組成分析で対象とした試料を対象に坑カビ試験および不快臭除去試験を行った。

2.5.1 化学組成分析

化学組成分析では、ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材（以下、ホタテ漆喰壁材という。）を含めた以下の7種類を対象とした。

- ① ホタテ漆喰壁材（顔料添加）
- ② ホタテ漆喰壁材（顔料無添加）
- ③ 中国産石灰（天然消石灰・細粒度）
- ④ 中国産石灰（天然消石灰・粗粒度）
- ⑤ 試薬消石灰（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）
- ⑥ 国産消石灰（栃木県）
- ⑦ ホタテ貝殻粉末（400℃焼成）

以上に示す7種類の試料に対して、pH（東亜電波製 pH メーター）および電気伝導度 EC（東亜電波製 EC メーター）の測定および蛍光 X 線分析機（XRF；島津製 EDX-700）による分析を行った。

表 2.2 に①，④，⑥，および⑦における pH と EC 測定値を示す。ホタテ漆喰壁材（顔料添加）が $\text{pH} = 12.6$ ， $\text{EC} = 0.73 \text{ S/m}$ であり，強アルカリ性を示した。消石灰もホタテ漆喰壁材とほぼ同等の pH，EC の値を示した。これに対し，ホタテ貝殻粉末をみると， $\text{pH} = 9.24$ と弱アルカリ， $\text{EC} = 0.018 \text{ S/m}$ と pH および EC の値が低かった。

表 2.3 に，①，③，⑥，および⑦の含有成分値を示す。ホタテ漆喰壁材（顔料添加）のカルシウム（Ca）量は，ホタテ貝殻粉末，国産および中国産の消石灰と同等で約 40 wt%（37.8 wt%）を占めていた。

表 2.2 pH および EC の測定値

試料	pH*	EC** (S/m)
ホタテ漆喰壁材 (顔料添加)	12.6	0.73
天然消石灰 (国産-中国産)	12.6-12.7	0.74-0.75
試薬消石灰 (Ca(OH) ₂)	12.6	0.74
ホタテ貝殻粉 (400°C焼成)	9.24	0.018

* pH測定 (試料 : H₂O = 1 : 2.5 質量比)

** EC測定 (試料 : H₂O = 1 : 5 質量比)

表 2.3 塗り壁材の成分値

(単位: wt%)

試料	Ca	Si	Mg	Al	S	Fe	Ti
ホタテ漆喰壁材 (顔料添加)	37.8	tr.	1.41	0.12	0.06	0.029	0.100
天然消石灰 (中国産・細)	39.3	0.27	Tr.	0.19	0.27	0.048	0.015
天然消石灰 (国産)	37.3	0.21	1.84	tr.	0.03	0.024	0.012
ホタテ貝殻粉 (400°C焼成)	39.9	tr.	tr.	tr.	0.10	tr.	tr.

2.5.2 抗カビ試験

抗カビ試験は、JIS Z 2911:2000（カビ抵抗性試験方法）^{2.5)}に準じた以下に示す1)~3)の変法によって実施した。

- 1) 試験試料は、①ほたて漆喰壁材料（顔料添加）、⑤試薬消石灰（ Ca(OH)_2 ）、⑦ホタテ貝殻粉末の3種類について各0.8 gを供試した。
- 2) ガラス製50 ml遠心分離管に、各試料粉末0.8 gを投入した。次に、糖分に富み腐敗の進行が顕著な「キーウイ果汁（ポリエチレン製ストマーフィルターで手もみにより果汁を抽出した。）」の20倍希釈液（滅菌蒸留水使用）を40 ml添加の後、室温・1時間連続振とうを行い、密栓して20°Cインキュベーター内で1時間~3週間静置処理を行った。1時間、1日間、1週間、3週間の各処理期間後の試験液について、「ポテト・デキストロース寒天培地法；真菌類（カビ等）培養試験法」により抗カビ試験を行った^{2.6), 2.7), 2.8)}。
- 3) ポテト・デキストロース寒天培地培養試験；滅菌済み三角フラスコ（500 ml）にポテト・デキストロース寒天培地11.7 gと滅菌蒸留水300 mlを入れシリコ栓をして懸濁溶解した。その後、オートクレーブ内で1.2 atm、120°Cで20分間滅菌溶解を行った。滅菌溶解後、培地を約80°Cまで放冷後、ウォーターバス内で50°Cに保持し、各処理期間（1時間-3週間）後の果汁（キューイの手もみ果汁）の一定量（1 ml）および上述の各処理試料各1 mlを滅菌メスピペットでポリエチレン製滅菌シャーレ内へ投入した。その後、三角フラスコ中の滅菌溶解した「ポテト・デキストロース寒天培地」に他菌生育抑制のためのクロラムフェニコール5 mgを加え、速やかに約15~20 mlずつ加えた。培地固化後、シャーレを25°C、インキュベーター内で5日間カビ培養を行った。5日後、シャーレ内に出現した「カビコロニー数（白色・黒色・赤色等）」の計測を行い、抗カビ特性の検討を行った。各抗カビ試験液について併行してpH、EC（電気伝導度：mS/m）の測定も行った。

表 2.4、図 2.3、および写真 2.4 に、抗カビ特性試験結果を示す。ホタテ漆喰壁材は、全処理期間（1時間~3週間）を通して、出現カビコロニー数が250~500 CFU/mlと減衰傾向を示しており、添加果汁（キーウイ）での出現コロニー数である $3.70 \times 10^4 \sim 1.28 \times 10^5$ CFU/mlに比べて顕著な抗カビ特性が認められた。また、ホタテ貝殻粉末では処理期間の経過に伴い、 $1.25 \times 10^3 \sim 1.89 \times 10^5$ CFU/mlと増加傾向を示した。一方、消石灰（ Ca(OH)_2 ）では、1週間経過後（ 1.60×10^3 CFU/ml）を除き、ホタテ漆喰壁材とほぼ同様の傾向を示した。従って、ホタテ漆喰壁材は、抗カビ材として有効であることが明らかである。

また、抗カビ処理期間におけるホタテ漆喰壁材のpH、EC（mS/m）は、それぞれ、pH

= 12.4~12.5, EC = 589~740 mS/m とほぼ一定の値であった。他の試料では、ホタテ貝殻粉末で pH = 5.73~6.80, EC = 93.5~293 mS/m と低く推移していた。添加果汁（キウイ）では、pH = 3.36~3.25, EC = 58.5~65.7 mS/m であり、期間の経過に伴い腐敗の進行が認められた^{2.9), 2.10), 2.11)}。

以上に示す試験結果から、400℃で焼成したホタテ貝殻粉末を用いたホタテ漆喰壁材は、施工時からの抗カビ性の持続性に極めて優れていることが明らかになった。

表 2.4 抗カビ特性試験結果

(カビコロニー数: CFU/ml, 室温1hr振とう上澄み液~3週間)

試料	1時間	1日間	1週間	3週間
ホタテ貝殻粉末 (400℃焼成)	1.25×10^3	2.26×10^4	2.00×10^4	1.89×10^5
消石灰 (CaOH ₂)	7.00×10^2	5.00×10^2	1.60×10^3	6.00×10^2
ホタテ漆喰壁材 (顔料添加)	2.50×10^2	5.00×10^2	4.00×10^2	4.00×10^2
抽出果汁 (キウイ)	3.70×10^4	2.00×10^4	2.96×10^4	1.28×10^5

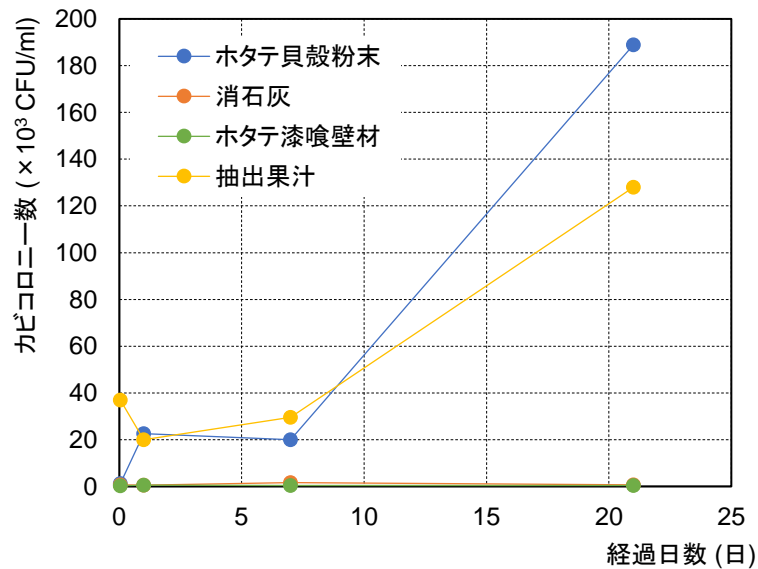


図 2.3 経過日数とカビコロニー数との関係

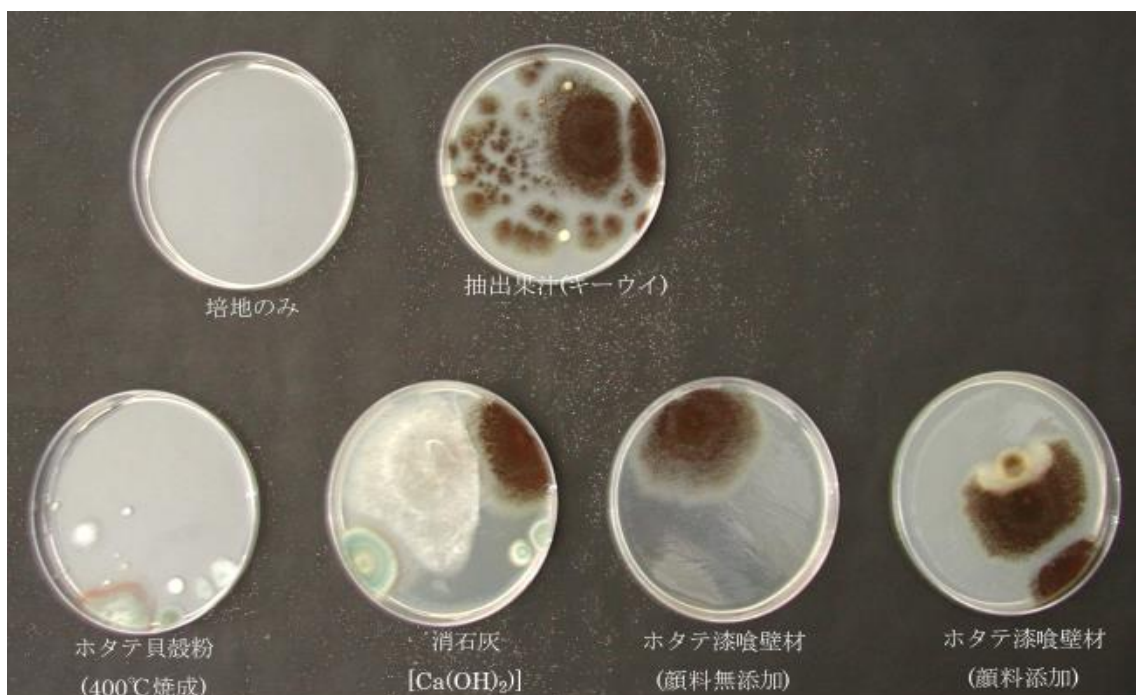


写真 2.4 ポテト・デキストロース寒天培地法による抗カビ試験の結果

2.5.3 不快臭除去試験

次に、①ほたて漆喰壁材（顔料添加）、④試薬炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）、⑤試薬消石灰（ Ca(OH)_2 ）、⑦ホタテ貝殻粉末の4試料について、「不快臭（腐敗臭・タバコ臭の成分）」として悪臭防止法^{2,12)}により規制物質として特定されている「ブタン酸（n-酪酸）」および「酢酸（ CH_3COOH ）」の除去試験を以下の1)~2)に示す方法に従って行った。

- 1) ブタン酸（n-酪酸）の除去試験：試験試料を乳鉢で磨砕し、各試料 0.1 g をガラス製遠心管へ投入し、これに約 0.4 wt% に調製した「ブタン酸（n-酪酸）；比重 0.958」を 40 ml 添加し、20 分間、室温・2 時間連続振とうを行った。次に、3,000 rpm で 20 分間遠心分離を行い、上澄み液を分取した。上澄み液について、「0.1N-NaOH（水酸化ナトリウム）」を用い滴定法によりブタン酸（n-酪酸； $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ ）の定量を行った。添加ブタン酸溶液濃度（wt%）と上澄み液の平衡濃度（wt%）の差より除去率（%）を算出した。
- 2) 酢酸（ CH_3COOH ）の除去試験：上述の各磨砕試験試料 0.1 g をガラス製遠心管へ投入し、これに約 0.4 wt% に調製した「酢酸（ CH_3COOH ）；比重 1.02」を 40 ml 添加し、20 分間、室温・2 時間連続振とうを行った。次に、3,000 rpm で 20 分間遠心分離を行い、上澄み液を分取した。上澄み液について、「0.1N-NaOH（水酸化ナトリウム）」を用い滴定法により酢酸（ CH_3COOH ）の定量を行った。上記 1) と同様に、添加酢酸溶液濃度（wt%）と上澄み液の平衡濃度（wt%）の差より除去率（%）を算出した。

表 2.5 および図 2.4 にブタン酸（n-酪酸）および酢酸を用いた不快臭除去試験の結果を示す。ブタン酸（n-酪酸）では、消石灰（ Ca(OH)_2 ）を除けばホタテ漆喰壁材（顔料添加）の除去率が 83.8wt% と試験試料中でもっとも高かった。同様に、酢酸の場合では、ホタテ漆喰壁材の除去率が 73.0 wt% であった。また、添加不快臭物質は、 $\text{pH}=3.06$ （ブタン酸）、 3.01 （酢酸）、 $\text{EC}=31.9 \text{ mS/m}$ （ブタン酸）、 41.5 mS/m （酢酸）を示した。これらのことから、ホタテ漆喰壁材に含有するカルシウム（Ca）等のアルカリ成分による酸性不快臭との化学反応および触媒反応による除去特性が示唆された。従って、ホタテ漆喰壁材は、酸性・低電気伝導度物質である「不快臭」の除去効果に極めて有効と考えられる。

表 2.5 不快臭除去試験の結果

試料	pH		EC (mS/m)		除去率 (wt%)	
	ブタン酸	酢酸	ブタン酸	酢酸	ブタン酸	酢酸
ホタテ貝殻粉末 (400°C焼成)	5.32	5.19	248	353	63.0	58.6
炭酸カルシウム (CaCO ₃)	6.04	5.24	308	361	80.4	70.6
消石灰 (Ca(OH) ₂)	12.4	8.92	646	437	100	100
ホタテ漆喰壁材 (顔料添加)	5.91	5.28	273	370	83.8	73.0
添加液	3.06	3.01	31.9	41.5	—	—

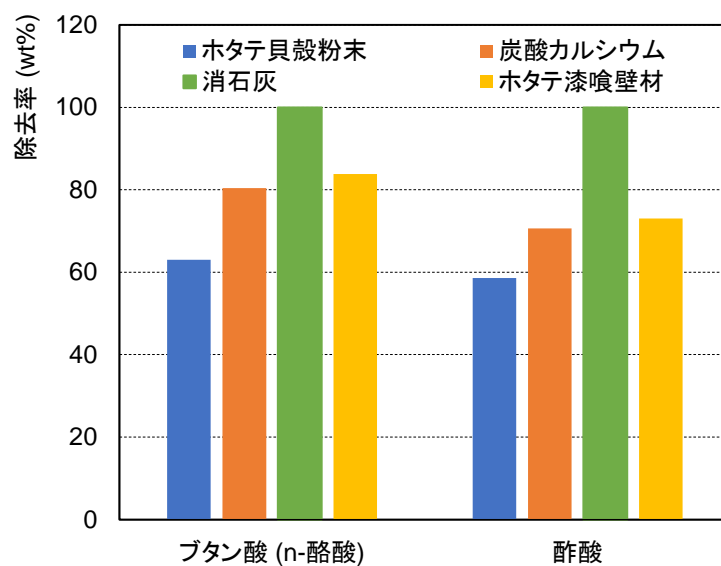


図 2.4 不快臭除去試験(除去率)

バター等乳製品の腐敗臭，汗臭，タバコ臭などの起因成分と考えられているブタン酸（n-酪酸）および酢酸は，ともに不快臭物質と定義されている。特に，ブタン酸（n-酪酸）は国が定める悪臭防止法^{2.12)}による22の規制物質のうちの一つとされており，その対策も義務付けられている。

本試験結果から，不快臭であるブタン酸（n-酪酸）および酢酸の除去性能に対するホタテ漆喰壁材の有効性が示唆され，住居内の不快臭除去対策にその効果が大きいと期待される^{2.13), 2.14), 2.15)}。

これらの除去特性（抗カビ性・不快臭除去）の要因としては，ホタテ漆喰壁材が強アルカリ性であり，施工後に生成する「活性酸素種；酸素(O)および水酸基ラジカル(OH・)」等が発生カビへの基質阻害および不快臭の吸着・分解触媒能に密接に起因していることなどが考えられる。

しかしながら，除去特性の詳細なメカニズムについては不明な点も多い。以上の結果から，強アルカリ性で溶解性金属成分イオン等が多く EC 値も大きいホタテ漆喰壁材の住宅への活用は，室内環境の改善および保持（抗カビ性・不快臭除去）へ極めて有効であることが明らかにされた。さらに，シックハウス対策を含めた「快適な室内環境の維持・保全」をより効果的に促進する観点からも，今後さらに施工前後における素材の安定性の確保，他材料との複合化による高機能性付与（新規機能性）を考慮したホタテ漆喰壁材の開発に係る試験研究を継続することが必要であると考えられる。

2.6 第2章のまとめ

本章では、ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の開発を目的に、低コスト化した400℃で焼成したホタテ貝殻粉末を用いたホタテ漆喰壁材の調合計画を行い、その壁材を対象とした理化学特性を把握するための各種試験を行った。その結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) ホタテ漆喰壁材は、 $\text{pH}=12.6$ と強アルカリであり、壁材として硬化後の pH は 9.26 と、 400°C 焼成ホタテ貝殻粉末と同程度の弱アルカリ性を保持することから、塗り壁材として、抗カビ性能に優れていることが明らかとなった。
- 2) ホタテ漆喰壁材に含有するカルシウム (Ca) 等のアルカリ成分による酸性不快臭との化学反応および触媒反応による除去特性が示唆され、住居内の不快臭除去対策にその効果が期待されることが明らかとなった。
- 3) 珪藻土のアルカリ pH は $6\sim 8$ の中性域にあるが、 400°C 焼成ホタテ貝殻本体はアルカリ $\text{pH}=9.26$ と弱アルカリ性であることから、抗カビ性においては珪藻土壁材より効果が期待されることが分かった。

【第2章の参考文献】

- 2.1) 吉田朋央, 小山信次, 奥田慎一, 笹谷広治, 福原長寿, 小比類卷孝幸: ホタテ貝殻セラミックスのホルムアルデヒド軽減機能について, 八戸工業大学異分野融合科学研究所紀要, 第1巻, pp.113-116, 2002.2
- 2.2) 植原日菜子, 中島裕輔, 山窪泉: ホタテ貝灰を用いた環境調整型建材の各種性能調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 環境工学 I, pp.1377-1378, 2016.7
- 2.3) 水産庁漁港漁場整備部, 財団法人漁港漁場漁村技術研究所: 北海道 ホタテ貝殻による漁場造成ガイドライン, 2007.3
- 2.4) 中村伸: 漆喰壁の標準調査, 日本建築学会研究報告, No.8, pp.156-159, 1950.10
- 2.5) 日本工業規格: JIS Z 2911: 2000, かび抵抗性試験方法, 入手先 <<http://www.kikakurui.com/z2/Z2911-2018-01.html>>, 参照 2020.09.04
- 2.6) 内田眞志: 防菌防黴, No.24, p.735, 1996
- 2.7) 好井久雄, 金子安之, 山口和夫: 食品微生物学ハンドブック, 技報堂出版, 1976
- 2.8) 宮治誠: 人に棲みつくカビの話, 相思社, 1996
- 2.9) 井上真由美: カビの基礎知識, オーム社, 1997
- 2.10) 小崎道雄, 椿啓介: カビと酵母, 八坂書房, 1998
- 2.11) 日本薬学会編: 衛生試験法注解, 金原出版, 1973
- 2.12) e-Gov: 悪臭防止法, 入手先 <https://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=346AC0000000091>, 参照 2020.09.04
- 2.13) 今中忠行: 微生物利用の大展開, エヌ・テイ・エス, 2002
- 2.14) 長谷川武治: 微生物の分類と同定(上・下), 学会出版センター, 1996
- 2.15) 服部勉著: 微生物生態入門, 東京大学出版会, 1995

第3章 ホタテ貝殻粉末を用いた既調合外装モルタルの開発

3.1 本章の目的

第2章では、400℃焼成したホタテ貝殻粉末を骨材とした、内装用塗り壁材を開発した。抗カビ試験や不快臭試験を行い、ホタテ貝殻粉末における内装用塗り壁材としての付加価値を確認することができた。本章では、非焼成ホタテ貝殻粉末を骨材とした、既調合外装モルタルの開発を目的とした。

表3.1に、非焼成ホタテ貝殻の特徴を焼成ホタテ貝殻粉末と比較した結果を示す。ホタテ貝殻の焼成は、水産物としての不快臭を除去することが目的の一つである。内装材用としては焼成が必須になるものと考えられるが、外装用であれば製造コストが低減できる非焼成のホタテ貝殻粉末を利用できる可能性がある。本研究では、非焼成ホタテ貝殻粉末を用いた既調合モルタルを開発することを目的に、既調合モルタルに使用するホタテ貝殻粉末の選定、既調合モルタルの調合と製造・施工コストの検討、さらに、開発した既調合軽量モルタルの施工性について検討を行った。

表 3.1 非焼成ホタテ貝殻粉末の特徴

焼成(400℃)ホタテ貝殻粉末	非焼成ホタテ貝殻粉末
● 貝殻付着有機物が除去され無臭となる	● 貝殻付着有機物による腐敗臭が残る
● 貝殻付着有機物が除去され有孔面積が増える	● 貝殻付着有機物は残存
● 貝殻の色が白色に近い表情なる	● 貝殻の色は白色とグレー色の中間色のまま
● 貝殻粉碎後の粒度径が幅広くなる	● 貝殻粉碎後の粒度は限定される
● 焼成工程によるコストアップ	● 焼成工程が無いことによるコストダウン
● 焼成工程によるCO ₂ 発生量の増加	● 焼成工程が無いことによりCO ₂ 発生量無し
● 焼成工程により貝殻硬度が減少	● 焼成工程が無いことにより貝殻硬度は変化無し

3.2 非焼成ホタテ貝殻粉末の選定

本研究では、非焼成ホタテ貝殻粉末を製造している2つの工場を視察し、既調合モルタルに使用するホタテ貝殻粉末を選定することとした。視察した工場は、北海道鹿部町にある北海道スカラップ、および青森県青森市にある長慶である。

これら2工場における非焼成ホタテ貝殻粉末の製造工程を図3.1に示す。まず、北海道スカラップの工場所在地は、鹿部漁港から2.5kmほど離れた内陸側に立地している。工場敷地内は人の背丈を優に超える一面の貝殻の山であった。工場長の説明によると、堆積したホタテ貝殻の山の中に工場を構えたとのことであり、周りは山林であることから、毎年生み出されるホタテ貝殻を目的もなく廃棄堆積していた実態を垣間見た瞬間でもあり、このことはオホーツクをはじめ全道的な問題であることは想像に値する。北海道スカラップ鹿部工場における非焼成ホタテ貝殻粉末の製造工程をみると、屋外に堆積・養生していた貝殻を屋外の大型粉砕機で粉砕し、屋内へ搬送する。次に、灯油燃焼方式ロータリーキルンで100℃の温風を吹きかけて乾燥処理を施す。その後、屋内1次粉砕、屋内2次粉砕を経て、ふるい機にかけた非焼成ホタテ貝殻粉末をフレコンパックやビニール袋へ包装する。

青森県青森市に本社工場を構える長慶については、陸奥湾で水揚げされ、水産加工場でボイル処理された後のホタテ貝殻の堆積場が砂丘のように続く。噴火湾やオホーツクなど北海道の沿岸に広がる堆積場に比べ、規模ははるかに大きい。しかし、ホタテ貝殻の大きさは北海産の貝殻と比べると小さく、柔らかいことが分かる。通常、北海道では3~4年貝を水揚げするのがほとんどであるが、青森県では2年貝が主流のようであった。若い貝殻であることが理由かどうか不明であるが、鹿部町と比べると貝殻臭も少ない印象であった。長慶における非焼成ホタテ貝殻粉末の製造工程をみると、北海道スカラップとは異なり、ロータリーキルンによる温風乾燥機を使用していない。鉄骨造のガラス張りハウスの中で天然光による自然乾燥を施していた。屋外でのショベルカーによる1次粉砕の方式を見ても、きわめてシンプルな製造方式であることが理解できた。

以上に示すように、北海道スカラップと長慶とで製造工程に違いがみられた。特に、長慶の製造工程はシンプルであり、製造コストが低減されている様子が伺える。しかし、本研究では、北海道の木造住宅で使用する既調合モルタルの開発を目指しており、青森県からの運搬コストを考慮すると、北海道で製造された非焼成ホタテ貝殻粉末であることが望ましい。従って、本研究では、北海道スカラップで製造している非焼成ホタテ貝殻粉末を選定することとした。

【北海道スカルップ(北海道鹿部町)】

【長慶(青森県青森市)】



図 3.1 調査した 2 工場におけるホタテ貝殻粉末の製造工程

3.3 非焼成ホタテ貝殻を用いた外装モルタルの調合とコストの検討

「既調合軽量セメントモルタル仕上げ外壁の構造性能に関する調査研究報告書」^{3.1)}によると、既調合軽量セメントモルタルとは、「JASS 15 M-102（ラス系下地用既調合軽量セメントモルタルの品質基準）^{3.2)}に適合するもの、製造所において原料の調整・調合を行い、紙製などの容器に入れ、封緘して出荷されるもので、主としてラス系下地に用いられる。結合材には、ポルトランドセメント単味または無機系混和材量を混合したものを、骨材としては軽量のパーライトあるいは粒状の樹脂系発泡体もしくはチップ類を単体または混合して用いる。その他水溶性樹脂・再乳化形粉末樹脂などの有機系混和材料および無機質ならびに有機質の繊維類が用いられる。」と解説されている。このようなことから、図 3.2 に示すように、通気ラスを下地として下塗り 10 mm、上塗り 10 mm、合計 20 mm のモルタル外装仕上げを想定し、建築基準法で規定している不燃性能および 30 分間の非損傷性および遮熱性を満たした防火性能を有するものとした。

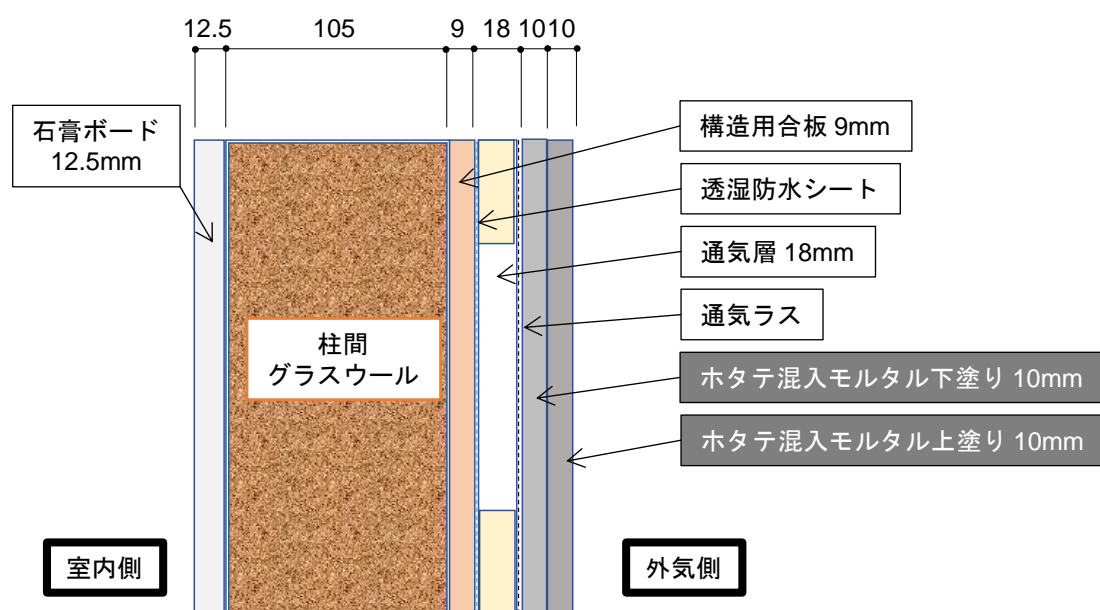


図 3.2 非焼成ホタテ貝殻粉末を用いた外装モルタル外壁の断面図

3.3.1 下塗り材の検討

表 3.2 に、下塗り材の調合計画表を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、骨材には砂を用いず、その大半を非焼成ホタテ貝殻粉末で占めることとし、真珠岩を原料とした軽量骨材（パーライト）も調合した。また、当初は考慮していなかったものの、試験施工を繰り返す中で、保水材を調合することで施工性が向上するがわかった。このため、保水剤としてメチルセルロースを微量調合した。これらの粉体の合計質量は 20 kg とし、試験施工において、8.5 l の水を入れて攪拌をすることが適切であった。ただし、施工する時期によって水の量は変動することを考慮する必要がある。








表 3.2 下塗り材の調合計画表

普通セメント	非焼成ホタテ貝殻粉末	真珠岩系軽量骨材	メチルセルロース	粉体合計質量	水
					
10 kg	9.0 kg	0.9 kg	0.1 kg	20 kg	8.5 l

3.3.2 上塗り材の検討

表 3.3 に上塗り材配合計画を示す。ホワイトセメントを使用して白色の仕上げ面を目指した。非焼成ホタテ貝殻粉末については、標準品と粗目（3～5 mm）の 2 種類を使用し、下塗り材の同様に、真珠岩を原料としたパーライトおよび施工性を考慮して保水材を調合することとした。また、かき落とし仕上げの際の意匠材として寒水玉を調合することとした。

表 3.3 上塗り材の調合計画表

ホワイト セメント	非焼成 ホタテ 貝殻粉末	粗目 ホタテ 貝殻粉末	真珠岩系 軽量骨材	寒水玉 Φ5mm	アクリル 系粉末 接着剤	メチルセ ルロース	粉体 合計 質量	水
								
8.0 kg	7.0 kg	1.5 kg	1.0 kg	1.5 kg	0.8 kg	0.2 kg	20 kg	8.0 l

3.3.3 屋内試験施工

前述の下塗り材および上塗り材の調合計画は、複数回の屋内試験施工によって試行錯誤を繰り返した。写真 3.1 に下塗りの屋内試験施工状況を、写真 3.2 に上塗りの屋内試験施工状況を示す。



【下塗り材攪拌】



【水平面試験塗り】



【垂直面試験塗り】

写真 3.1 下塗りの屋内試験施工状況



【上塗り材攪拌】



【下地材】



【上塗り施工】



【上塗りコテ抑え】



【上塗り完了】



【上塗り完了】



【水平面試験塗り】



【垂直面試験塗り】



【垂直面試験塗り】

写真 3.2 上塗りの屋内試験施工状況

3.3.4 材料価格および施工コストの検討

本研究で開発した非焼成ホタテ貝殻粉末を用いた既調合モルタルの材料価格および施工コストを他の既調合モルタル製品と比較した。下塗り材の場合で比較した結果を表 3.4 に示す。F 社の既調合モルタルと T 社のシラス入りモルタルと比較すると、荷姿がいずれも 25 kg であり、本開発品の 20 kg に比べて多い状況であるが、本開発品は T 社の既調合モルタルに比べて低価格であり、F 社の低価格モルタルとの差も小さい。上塗り材の場合で比較した結果を表 3.5 に示す。F 社の既調合モルタルは 1 度塗りの製品であり、上塗り材として比較することができないものの、本開発品は、T 社の既調合モルタルに比べて安価である。このように、非焼成ホタテ貝殻粉末を用いた既調合モルタルを普及することが可能な価格帯で開発することができたと言える。

表 3.4 下塗り材の価格および施工コストの比較

製品名	塗厚	荷姿	施工面積	材料価格(設計価格)		設計標準 価格/m ² (材工)
				1袋	1m ² あたり	
F社既調合軽量モルタル	14 mm	25 kg/袋	2.3 m ²	2,550 円	887 円	2,887 円
T社シラス入りモルタル 下塗り用	10 mm	25 kg/袋	2.5 m ²	8,750 円	3,500 円	5,500 円
ホタテ貝殻既調合モルタル 下塗り用	10 mm	20 kg/袋	2.0 m ²	2,500 円	1,250 円	3,250 円

表 3.5 上塗り材の価格および施工コストの比較

製品名	塗厚	荷姿	施工面積	材料価格(設計価格)		設計標準 価格/m ² (材工)
				1袋	1m ² あたり	
T社シラス入りモルタル 上塗り用	8 mm	20 kg/袋	2.5 m ²	10,500 円	4,200 円	6,200 円
ホタテ貝殻既調合モルタル 上塗り用	10 mm	20 kg/袋	2.0 m ²	3,800 円	1,900 円	3,900 円

表 3.6 に、木造住宅 1 棟の施工コストとホタテ貝殻使用量を示す。木造住宅 1 棟の外壁見付け面積を 200 m² とすると、非焼成ホタテ貝殻粉末を用いた既調合モルタルによる外壁左官工事価格は、下塗りで 25 万円、上塗りで 38 万円であり、標準的な価格帯であると考えられる。ホタテ貝殻の使用量は、下塗りと上塗りの合計で 1,600 kg であり、砂に代わるモルタルの骨材としてホタテ貝殻の有効利用に大きく繋がると言える。

表 3.6 木造住宅 1 棟の施工コストとホタテ貝殻粉末使用量

材料名	施工面積 /1袋	住宅外壁面積 /1棟	必要袋数 /1棟	材料設計価格(税抜) /1棟	非焼成貝殻質量 /1棟
ホタテ貝殻 既調合 モルタル 下塗り材	2 m ²	200 m ²	100 袋	25 万円	900 kg
ホタテ貝殻 既調合 モルタル 上塗り材	2 m ²	200 m ²	100 袋	38 万円	700 kg
合計				63 万円	1,600 kg

3.4 ホタテ貝殻粉末を用いた既調合モルタルの凍結融解抵抗性について

本研究では、開発した非焼成ホタテ貝殻粉末を用いた既調合モルタルの凍結融解抵抗性を把握することとした。凍結融解抵抗性は、長さ変化率をパラメータとし、JASS 15^{3,2)} に示されている試験方法および JIS A 1171^{3,3)} に示されている試験方法に従って長さ変化率を測定した。試験体は、表 3.7 に示すように、ホタテ貝殻の対セメント比および軽量骨材の対セメント割合を変化させて作成した。

表 3.7 試験実施計画表

セメント	ホタテ貝殻の 対セメント比	軽量骨材の 対セメント割合(%)
1.0		7.5
	0.5	10
	1.5	12
	2.0	15
		30

ホタテ貝殻の対セメント比と長さ変化率との関係を図 3.3 に、軽量骨材の対セメント割合と長さ変化率との関係を図 3.4 に示す。ホタテ貝殻および軽量骨材のいずれにおいても、その割合増加に伴い長さ変化率が減少する関係を示し、ホタテ貝殻の増加に伴い長さ変化率が減少する関係が明瞭である。これは、ホタテ貝殻が多量に含むモルタルほど凍結融解抵抗性が高いことを意味している。本研究で開発した既調合モルタルでは、ホタテ貝殻の対セメント比が約 1.0 であることから、長さ変化率が 0.15 程度であり、十分な凍結融解抵抗性が存在していると評価できる。

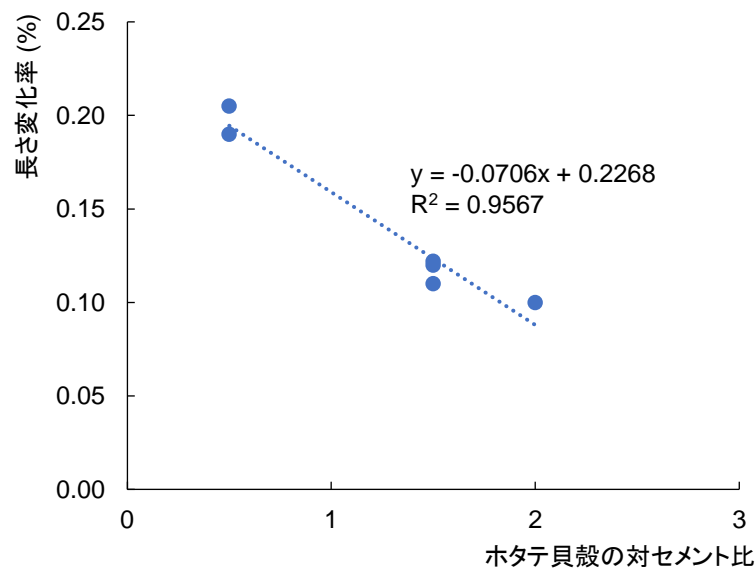


図 3.3 ホタテ貝殻の対セメント比と長さ変化率との関係

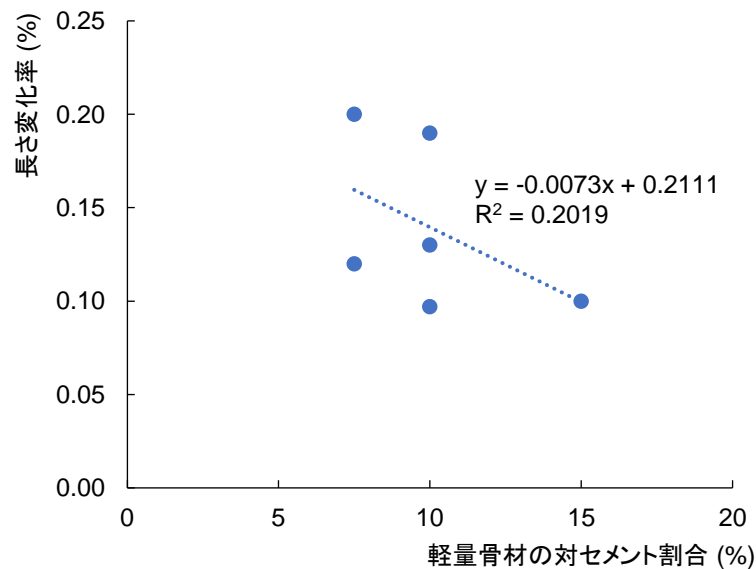


図 3.4 軽量骨材の対セメント割合と長さ変化率との関係

3.5 実物大建物での試験施工および経年劣化状況

3.5.1 先行事例調査

実物大建物での試験施工に先立ち、島根県益田市において、既調合モルタル外装工事に関してヒアリング調査を行った。写真 3.3～写真 3.5 に示すように、シラスを主原料とした外壁材の施工状況を2日間にわたって調査した。その結果、下地施工のマニュアル整備が重要であり、ガラス繊維メッシュを下地に確実に伏せ込み、塗厚さを確保することが上塗りのクラック防止に重要であることが明らかとなった。



写真 3.3 シラスを主原料とした外壁材施工のヒアリング調査の状況(1)

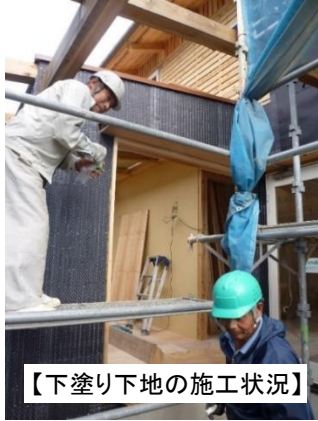


写真 3.4 シラスを主原料とした外壁材施工のヒアリング調査の状況(2)



写真 3.5 シラスを主原料とした外壁材施工のヒアリング調査の状況(3)

3.5.2 実物大建物での試験施工

実物大建物での試験施工は、写真 3.6 に示す北海道伊達市の平屋建て 28.98m² (8.75坪) の木造住宅の外壁で行った。下塗り施工状況を写真 3.6～写真 3.7 に、上塗り施工状況を写真 3.8～写真 3.9 に示す。下塗り施工の際には、前述のヒアリング調査の結果に基づいて、クラック防止を目的としたガラス繊維メッシュを施工することとした。



写真 3.6 試験施工の対象とした木造住宅および下塗り施工状況

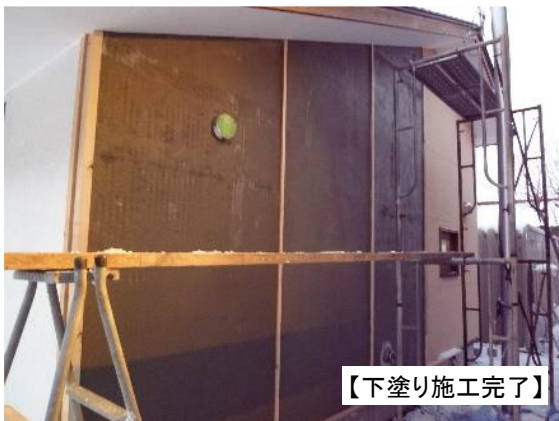


写真 3.7 下塗り施工状況

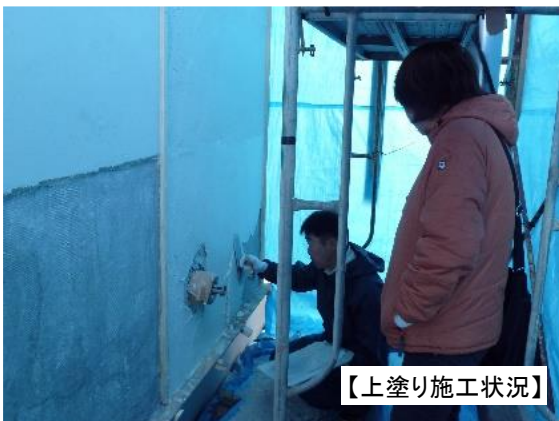


写真 3.8 上塗り施工状況

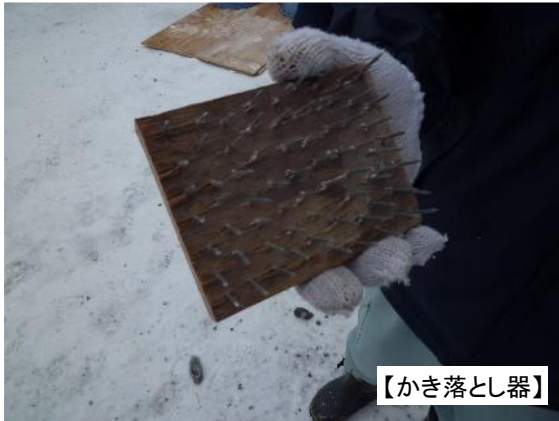


写真 3.9 上塗り施工状況および外装施工完了状況

3.5.3 経年劣化（9年後）の検証

写真 3.10 に、施工後 9 年経過した建屋写真を示す。撮影日は 2020 年 7 月 5 日である。きずり仕上げをした上塗り材には、クラック等が見られず、目立った汚れや変色も観察されなかった。ガラス繊維メッシュを入れた下塗り材が十分に機能していると考えられ、ホワイトセメントを固化材とした上塗り材も劣化することなく施工時の仕上げ状態を保持していることが分かった。

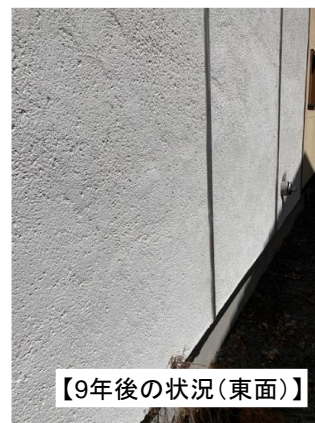


写真 3.10 9 年後の外装劣化状況

3.6 第3章のまとめ

第3章では、ホタテ貝殻粉末の利用拡大を目的に、安価な非焼成ホタテ貝殻粉末を用いた既調合外装モルタルを開発した。建築基準法の防火規定を満たすためには外装モルタルの厚さを確保する必要がある。このことから、下塗り 10 mm, 上塗り 10 mm, 合計 20 mm の既調合外装モルタルを開発した。開発した際に得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 非焼成ホタテ貝殻粉末には水硬性がないことから、既調合モルタルの骨材として利用した。砂を用いずに適正な価格帯で既調合外装モルタルを開発することができた。さらに、住宅1棟で1,600 kgのホタテ貝殻粉末を用いることができるようになった。
- 2) 非焼成ホタテ貝殻粉末を用いた既調合外装モルタルの凍結融解抵抗性を検証した。その結果、ホタテ貝殻粉末の割合が大きくなるほど凍結融解抵抗性が増すことが明らかとなった。
- 3) シラス材を用いた既調合モルタルの施工状況をヒアリング調査した。外装モルタルのクラック対策として、下塗り施工時にガラス繊維メッシュを施工することが有効であった。
- 4) ガラス繊維メッシュの施工を考慮した実物大建物による試験施工を行い、9年後の劣化状況を観察した。その結果、9年後においても目立った劣化や汚れは確認されず、ガラス繊維メッシュの有効性を確認することができた。

【第3章の参考文献】

- 3.1) 特定非営利活動法人湿式仕上技術センター: 既調合軽量セメントモルタル仕上げ外壁の構造性能に関する調査研究報告書, 2013.7
- 3.2) 日本建築学会編: 建築工事標準仕様書・同解説, JASS 15, 左官工事, M-102 ラス系下地用既調合軽量セメントモルタルの品質規準, 2007.6
- 3.3) 日本工業規格: JIS A 1171, ポリマーセメントモルタルの試験方法, 7.10 凍結融解に対する抵抗試験, 入手先 < <https://kikakurui.com/a1/A1171-2016-01.html> >, 参照 2020.09.05

第4章 湿式外張り断熱外装システムの開発

4.1 本章の目的

本章の目的は、ホタテ貝殻を骨材として用いた樹脂モルタルを、木造壁の外側に貼り付けた EPS（ビーズ法ポリスチレンフォーム）の上に直接左官仕上げして外装とする、湿式外張り断熱外装システムの開発である。

廃棄物として処理されず、大量に蓄積されているホタテ貝殻の活用を目的に、第2章では、建築内装用塗り壁材に用いられる骨材の一つをホタテ貝殻粉末とした場合の可能性について検討し、漆喰材として開発することができたとともに、抗カビ性能や不快臭除去性能を有していることが明らかとなった。第3章では、低コストで製造可能な非焼成ホタテ貝殻粉末を用いた既調合外装モルタルを開発することを目的に、価格および外装モルタルの性能を確保するための調合方法を検討するとともに、施工性についても検討し、既存の既調合外装モルタルと同等以上の品質であることを明らかにした。この結果、ホタテ貝殻の活用範囲を、内装仕上げ材への適用から始まり、外装用のモルタルにまで広げることができた。

一方、木造住宅の外装材は、現在窯業系サイディング、すなわち、乾式工法が主流である。ホタテ貝殻を用いた外装材料を広く普及してゆくためには、木造住宅用の乾式工法に代わる外装システムが必要で、樹脂材を用いた湿式工法が最も有望と考えられる。

本章では、ホタテ貝殻の活用範囲拡大を目的に、湿式外張り断熱外装システムの開発と、木造外壁に湿式外張り断熱外装を適用する上で求められる、通気層付き乾式外装システムと同等以上の防水性の実現を目指した工法開発を行った。

4.2 EPS 直塗り用外装樹脂モルタルの開発

EPS 上に樹脂モルタルを直塗りして仕上げる外装工法は、コンクリートや組積構造の外断熱用に、ドイツを中心に広く普及している。2007年、ドイツ中心部のマールブルグ市近郊にあるダウトフェタルという田舎町に本社工場を構える H 社を訪問し、湿式外張り断熱システムにホタテ貝殻粉末を応用できないか、ミーティングを行った。

4.2.1 導入基本技術の概要とホタテ貝殻粉末の利用技術の開発

本技術は H 社が開発し、既に 20 年の実績がある湿式外張り断熱外装システムである。写真 4.3 に壁構造を示す。また、表 4.1 に H 社の外張り断熱外壁材料仕様および組成表を示す。ドイツでは主にコンクリート及び組積造の外装用として施工されるため、EPS は躯体表面に接着用樹脂モルタル並びにコンクリート用ビスにより接着固定する。EPS の外側表面には、樹脂モルタルでガラス繊維メッシュを仮止めし、樹脂モルタルで塗り込めて下塗り工事が完了する。

同社外張り断熱外装システムの無機骨材の代替品としてホタテ貝殻粉末の利用方法を開発した。



写真 4.1 H社本社内でのミーティングおよび施工指導



写真 4.2 下塗り(Base Coat)およびガラス繊維メッシュ施工指導

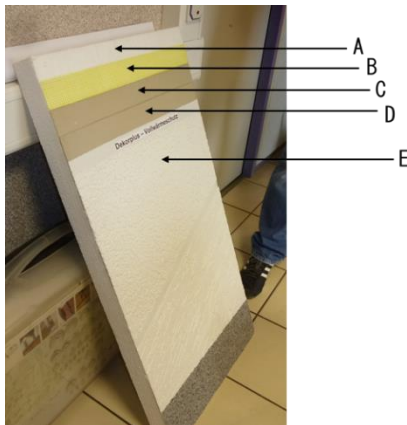


写真 4.3 H社壁構造

表 4.1 H社壁構造の材料組成表

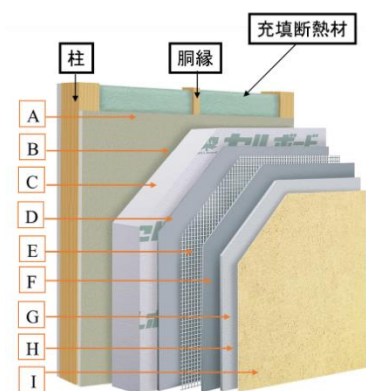
	材料名	厚さ(mm)	備考
A	EPS	30~150	密度16kg/m程度
B	ガラス繊維メッシュ	0.35	同時施工
C	Base Coat	2.0~3.0	
D	Base Coat	2.0~3.0	消石灰+白セメント+ CMC+無機骨材
E	Over Coat	3.0~4.0	消石灰+白セメント+ CMC+無機骨材+撥水材

H社を含めドイツ国内で使用しているEPSは密度が16kg程度と軽量である。近年ではカーボン入りのEPSが主流となっており密度は低いが、熱伝導率性能は高い。また、密度が低いEPSは柔らかく伸縮性があることから、樹脂モルタル(Base Coat)との接着力を高める。つまり、CMCの配合比率が少なくなるためコストを抑えることができる。

更に、H社が開発した壁構造は樹脂モルタル(Base Coat)を2回塗りしている。1回目の施工の際、ガラス繊維メッシュを同時伏せ込み施工し、乾燥硬化後、2回目の樹脂モルタル(Base Coat)を施工する。下塗り合計塗り厚さは5~6mmを確保している。透湿性能は悪くなるが、防水性能、劣化性能を向上させることを優先している。そして、最終工程として、上塗り樹脂モルタル(Over Coat)を施工する。この時点での塗り厚さ総計は、8~10mm程度になっていて強固な壁構造を有している。また、仕上げの着色は上塗り樹脂モルタル(Over Coat)に顔料を入れ、左官仕上げによって好みのカラーに仕上がるようにしている。耐候性や耐汚性を高めるためシリコン系塗料によるオーバーコート仕上げにも対応していて、仕上げ色のカラーチャートは多彩である。写真4.4にH社製品の壁構造で施工し、既に完成している住宅の外観を示す。



写真 4.4 H社製品壁構造で施工している竣工後住宅外観



	材料名	厚さ (mm)	備考
A	構造用面材	9.0以上	日本農林規格
B	透湿防水シート	0.2	JIS A 6111
C	EPS	30~150	JIS A 9521
D	ホタテ貝殻入り下塗り材	1.0	} 同時施工
E	ガラス繊維メッシュ	0.35	
F	ホタテ貝殻入り下塗り材	1.0	
G	ホタテ貝殻入り上塗り材	2.0	
H	下地調整塗料(シーラー)		JIS A 6909
I	アクリル樹脂系建築用仕上塗材		JIS A 6909

図 4.1 H社と共同開発した壁構造模型図と材料仕様表

4.2.2 ドイツの技術を応用したホタテ貝殻入り湿式外張り断熱外装システム

図 4.1 に H 社の技術供与のもと開発した木造建物用ホタテ貝殻入り湿式外張り断熱外装システムの壁構造模型図と材料仕様表を示す。RC 造においても C から I までの工程は同じである。ただし、RC 造はコンクリート躯体と EPS の間に接着用樹脂モルタルを使用して張り付ける。一方、木造では構造用面材の上に透湿防水シートを張り、その上に EPS を専用のポリプロピレン製ワッシャーとステンレスビスにて接合をする。以下に材料構成の施工手順を示す。

A:構造用面材を釘またはビスで留め付ける

B:透湿防水シートをメーカーの施工仕様通りに貼り付ける

C:EPS を専用のワッシャーとステンレスビスで留め付ける

D:樹脂入り下塗り材を 1mm 厚で塗布する

E:ガラス繊維メッシュを下塗り材の中へ伏せ込む

F:樹脂入り下塗り材を 1mm 厚で塗布し、左官コテにより平滑にする

G:下塗り材乾燥後、樹脂入り上塗り材を 2mm 厚で左官コテにより仕上げる

H:上塗り材乾燥後、下地調整塗料(シーラー)を 1 回塗する

I:アクリル樹脂系建築用仕上げ塗料により 1 回塗で仕上げる

ドイツの H 社壁構造との相違点は下記になる。

- ① 下塗り回数が 1 回少ない。H 社は 1 回目塗り厚 2~3mm の中にガラス繊維メッシュを入れ、下塗りが完全乾燥してから 2 回目を塗り、合計厚 4~6mm となる
- ② 上塗り回数は同一であるが、塗り厚さはドイツの方が 3~4mm と厚い。また、上塗り材に顔料が入っており、塗装をする必要がない

上記の施工方法の相違点は日本国内の事情や競争力を考慮し、コスト削減することを念頭に日本版施工方法として同一の仕様としていない。ただし、日本版施工仕様ではオーバーコートとして、撥水材や防藻材を含んだアクリル系塗料を施工することで、耐候性やカラーリングを付帯している。

4.2.3 ドイツの技術を応用した樹脂入りモルタル壁の耐久性能実験的検討

ドイツの技術を応用したホタテ貝殻入り湿式外張り断熱外装システムの耐久性能を確認するため、JIS A 1435:2013 建築用外装材料の凍結融解試験を 400 サイクルまで行った。試験は北方建築総合研究所の試験機を使用し、50 日間の日数を要して行った。

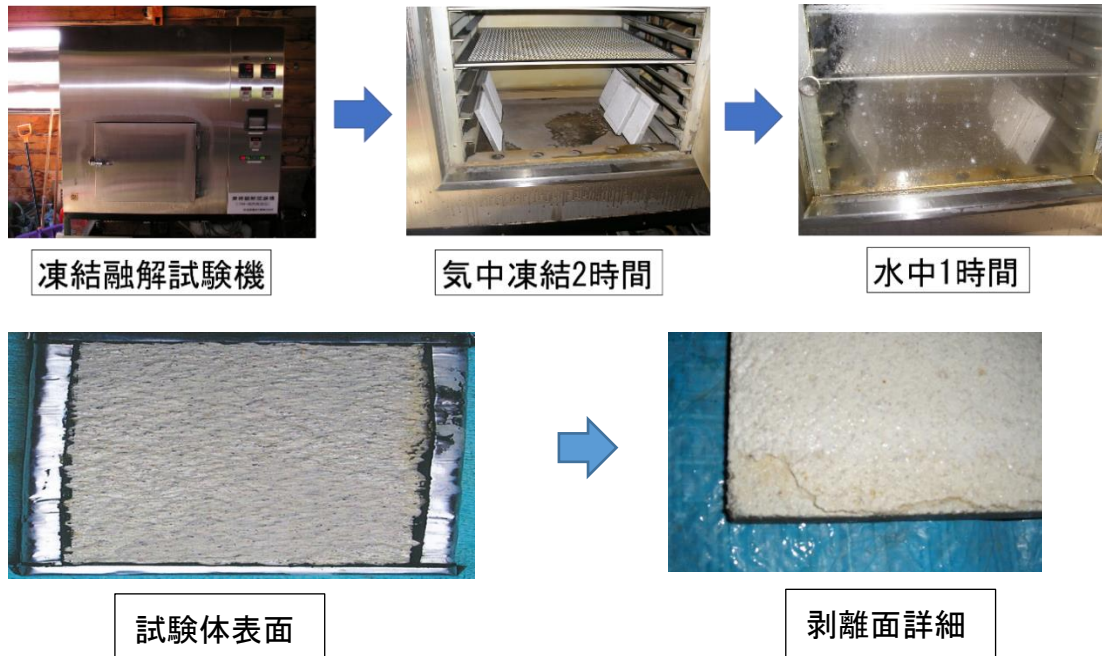


写真 4.5 ホタテ貝殻入り樹脂モルタルの気中凍結水中融解試験状況

表 4.2 気中凍結水中融解試験結果

試験体番号	サイクル数				
	300	325	350	375	400
1	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
2	剥離	剥離	剥離	剥離	剥離
3	剥離	剥離	剥離	剥離	剥離
4	異常なし	剥離	剥離	剥離	剥離
5	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし

写真 4.5 にホタテ貝殻入り樹脂モルタルを壁構造とした気中凍結水中融解試験の試験状況および試験結果写真を示す。また、表 4.2 に気中凍結水中融解試験結果(300 サイクル～400 サイクル)を示す。5 試験体のうち、2 試験体は異常なしであった。一方、剥離箇所はいずれも試験体側面を保護しているプチルテープ付近であり、吸水による凍害が発生したものと推察される。従って、樹脂モルタルの試験体表面での剥離は 400 サイクルを終えても確認されず、ドイツの技術を応用した塗り壁構造の耐久性は問題が無いことが確認された。

4.3 木造外壁用の湿式外張り断熱工法の課題

地球温暖化防止を目的として、建築物省エネ法(建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律)が施行され、ZEH(ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス)の普及が求められる中で、外皮の断熱強化が重要視されている。このため、充填断熱に加えて付加断熱材と呼ばれる、二重の断熱施工が寒冷地を主体として普及し始めている。この付加断熱材を施工する際、その外部側にどのような外装仕上げをするのかが更なる選択肢であるが、欧米では外張り断熱材に直接仕上げをする湿式外張り断熱工法が採用されている。欧米諸国の高度な断熱化に呼応するように、日本においても付加断熱材が充填断熱材よりも厚くなる事例が増えてきており、札幌版次世代住宅基準によると^{4.1)}、グラスウールで断熱する場合、充填断熱に加えて付加断熱材の厚さが100mm以上となる。施工の簡便さやコストの面から、高断熱化の手段として湿式外張り断熱工法の普及が期待される。しかし、高温多湿の日本では従来の乾式工法と比べ、湿式外張り断熱工法は漏水対策や防水性能が不安視されており、本州地域においては、わずかしこ普及していないのが実状である。

木造住宅における外壁の防水性に関して、既往の研究をみると、防水対策や内部結露対策としての通気層工法に関する研究が行われている。通気層については、鈴木らは^{4.2)}^{4.3)}^{4.4)}、排水・排湿メカニズムとその効果を明らかにしている。野上らは^{4.5)}、通気層内の湿度変化の測定評価から、外壁通気層の重要性を明らかにしている。また、齋藤らは^{4.6)}、繊維系断熱材充填工法を対象とし、防湿・気密欠損が壁体の防露性能に及ぼす影響を解析的に検討している。これらの研究をみると、外壁の防水・漏水においては対象となっていない。

JIS A 1414-3: 2010では^{4.7)}、建築用パネルを対象とした温湿度・水分に対する試験方法が示されているものの、本研究で対象としている外張り断熱工法については、示されていないのが現状である。現在、木造住宅の耐久性向上に向けての取り組みが進められており^{4.8)}、外張り断熱工法における防水・漏水に対する試験方法の確立が望まれている。一方、漆喰やモルタル壁となることが多い湿式工法は、古くは松下によって防水理論の構築が行われ、防水性の確保手法は、材料の透水性をある程度許容した上で、壁体内の木材などに水分が到達しない塗厚さを確保することが基本的な考え方である^{4.9)}。漆喰やモルタル内に透水してしまった水分は材料内を重力によってゆっくりと下方へ移動、温度上昇によって蒸発することを期待して、木材の早期腐朽を防止しようとするものである。湿式外断熱壁体については、伊庭らは^{4.10)}、その劣化性状および温度変動について実験的に検討しているが、防水性能については検討されていない。

以上に示すように、木造躯体にEPSを直張りし、通気層を取らない湿式外張り断熱工法の防水・漏水性、並びに木造躯体の腐朽に関する研究は見受けられない。特に、防水性に関しては、表面止水のみならず、断熱材裏面に侵入した場合の雨水の挙動も含めて評価し、漏水リスクによる木材の腐朽などを防止する技術開発が必要である。

4.4 木造外壁用の湿式外張り断熱外装システムの防水性に関する検討

木造外壁の躯体外側に EPS を外張り施工し、その外側に直接湿式外装を施工する工法について、雨水の漏水リスクを明らかにし、通気層を取らない湿式外張り断熱工法の漏水リスク低減を図る手法を検討した。

外張り断熱工法において、経年劣化や破損により表面止水が破られ断熱材裏面に雨水が侵入した場合を想定した。屋外の実験建屋を用いた排水性能、および、実験室実験による構造部材の防水性能について、試験体作成方法を提案すると共に、断熱材裏面排水溝の設置による漏水リスク低減手法を考案し、その性能を明かにした。

実施した実験は以下の二つである。

- 排水性能に関する実大実験

EPS 裏面（室内側）に雨水が侵入した場合の、漏入雨水の挙動を北方建築総合研究所屋外にある実大建屋の外壁を用いて、断熱材裏面の、排水性を評価した。

- 防水性能に関する実験室実験

水密気密試験装置（JIS A1414-3）^{4,7)}を用いた、湿式外張り断熱工法の漏水性能の評価方法を開発し、断熱材裏面の排水性、漏水性状を明らかにした。また、断熱材裏面排水溝を設けた場合の防水性を評価した。EPS 裏面に設けた排水溝は、実験建屋における排水性能の実験結果から改善を施している。

4.5 排水性能に関する実大実験

屋外の実験建屋の外壁を用いて、EPS 外張り断熱材裏面における、侵入雨水の挙動を明らかにした。排水層の有無が排水性に及ぼす影響を検討するため、EPS 裏面に溝を切った場合と通常の溝無しのを同時に試験した。

試験体は次の 2 種類である。

- 溝無壁：通常の EPS を張り付けた壁
- 溝有壁：室内側に溝を設けた EPS を張り付けた壁

4.5.1 排水性能の試験方法の概要

① 試験壁の詳細

図 4.2 に試験壁の断面詳細図を、図 4.3 に実験建屋の平面図、および試験壁位置を示す。排水性試験には旭川市内の北方建築総合研究所敷地内に建設されている、鉄筋コンクリート造及び木造の混構造からなる平屋建て延べ床面積 50 m²の実験建屋を使用した。実験建屋の北側外壁面に 455 mmピッチで 105 mm角の柱を 5 本立て、その 4 つの柱間を試験壁とした。柱の外側に構造用面材の代わりに透明アクリル板 t=3mm を用い、その上から厚さ 50mm の EPS をワッシャー及びステンレスビスで留め付け、外部側壁面は EPS にホタテ貝殻入り左官用塗り壁材を直塗り仕上げた。使用した EPS は、JIS A 9511 特号、密度 29 kg/m³で、通気層は設けていない。溝有壁の溝は縦方向に 50mm 間隔で、幅と深さ 5mm の三角形である。

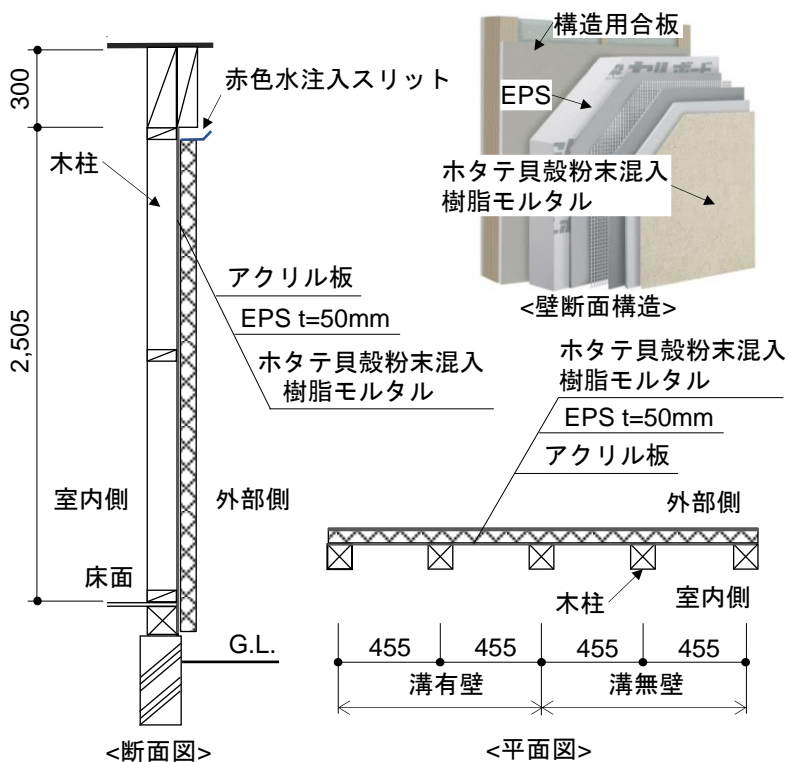


図 4.2 試験壁の断面詳細

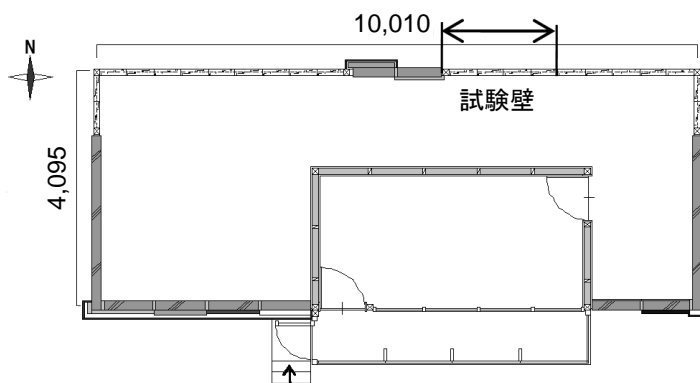


図 4.3 試験壁の設置位置

写真 4.6 に外部および内部から見た試験壁の仕上げ状況を示す。外側は EPS 面に直接ホタテ貝殻入り左官用塗り壁材にて仕上げている。室内側は外側から張り付けた構造用面材に見たてたアクリル板が露出している。内側から見て左側は溝有 EPS、右側は溝無 EPS をアクリル板の外側に張り付けている。写真 4.7 に溝有 EPS の縦方向接合部分を示す。接合部分の横方向にも縦溝と同様の溝を設けた。



写真 4.6 内外部試験壁



写真 4.7 溝有 EPS の接合状況

② 試験方法

図 4.2 の断面図に示す試験壁上部に、外表面からアクリル板面まで高さ 45mm，試験壁の巾いっぱいにスリットを設け，注水用に設けたガイドから，溝有壁及び溝無壁の EPS 裏面にそれぞれ色紅を入れた水を 10L 流し入れ，排水性能状況を目視により確認した。

4.5.2 排水性能に関する実験結果と考察

① 全体の排水状況

写真 4.8 に，色紅に着色した水を EPS 裏面に注入した際の室内側から見た写真を示す。溝無壁では特定の水路が生じて排水が集中して起きた。これに対して溝有壁では排水溝全体に分散して流れ部分的な集中は見られなかった。

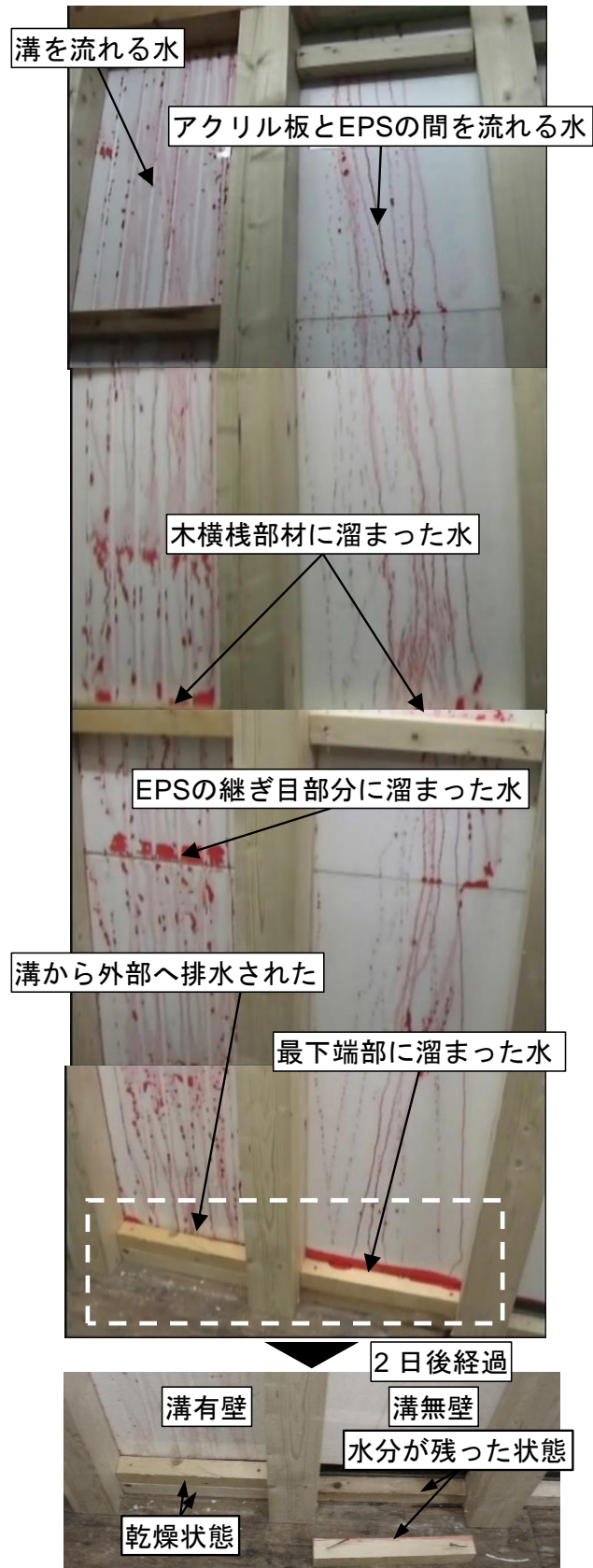


写真 4.8 内部側排水状況

② 横下地木部分の排水状況

溝無壁では、ビスを打っている横桟部分、特に、下端部において流れが妨げられ溜まっている。一方で、溝有壁では、スムーズに排水されていた。溝有断熱材の縦方向接合部では、食紅を含んだ少量の水が滞留しており、排水性を促進する更なる溝形状の検討が必要と考えられる。

③ 下端部の排水状況

溝有壁では水の滞留は認められないが、溝無壁では明確な滞留が見られた。2日後の排水状況をみると、いずれの下端部においても排水が完了していた。しかし、実験時に水が滞留していた溝無壁においては、一部の部材を取り外して確認した結果、排水性能が低いため最も下端部の部材には多くの水が浸透していた。このように、EPS裏面における溝の有無で排水性能を比較すると、溝有壁の排水性能が高いことは明らかである。

④ 排水溝の評価

実験の結果から EPS裏面の排水溝は排水性能についてその有効性が明らかになった。溝無壁でも侵入した水はわずかな隙間から下方へ流れるが、水の流れが集中し EPSの下地へのビス止め部分で、雨水の滞留が生じるのに対して、溝有壁では溝に沿って全面に分散して流下し、滞留は軽微である。しかし、溝有壁でも縦接合部で滞留が見られたことから防水性の向上へ向けて、排水性を損ねることの無い溝形状を開発する必要性が示された。

4.6 防水性能に関する実験室実験

4.6.1 防水性能の試験方法の概要

湿式外張り断熱工法の防水性能を確認する試験方法はないため、外張り断熱材裏面に雨水が侵入する防水断点として高さ 45mm のスリット状開口を設け試験を行うこととした。国内では確立された手法が無いことから、図 4.4 に示すように、JISA 1414-3「建築用パネルの性能試験方法—第 3 部：温湿度・水分に対する試験」の「5.7 水密性試験」に準拠して行った。実際の圧力は、突風率 = 1.5 に相当する脈動風圧（圧力変動は 2 秒周期源波）を作用させて実施した。

① 試験体の詳細と試験方法

試験体の内外部立面図、断面図を図 4.5 に示す。試験体寸法は縦 2,490 mm、幅 1,990mm である。中央部に縦 1,030mm、幅 925mm の住宅用プラスチックサッシを設けた。雨水の流れを目視するため軸組みの外側に耐力用面材を模したアクリル板を設置し、その外部側に EPS をビス止めした。通常は EPS の上に一次防水層となる樹脂モルタルを施工するが、劣化損傷した際でも漏水が軽減できることを試験で確認するため一次防水層の施工は省略した。なお断熱材裏面に水を流入させるため、スリットは高さ 45mm でサッシ上 375mm の位置に試験壁の横幅一杯に設けた。

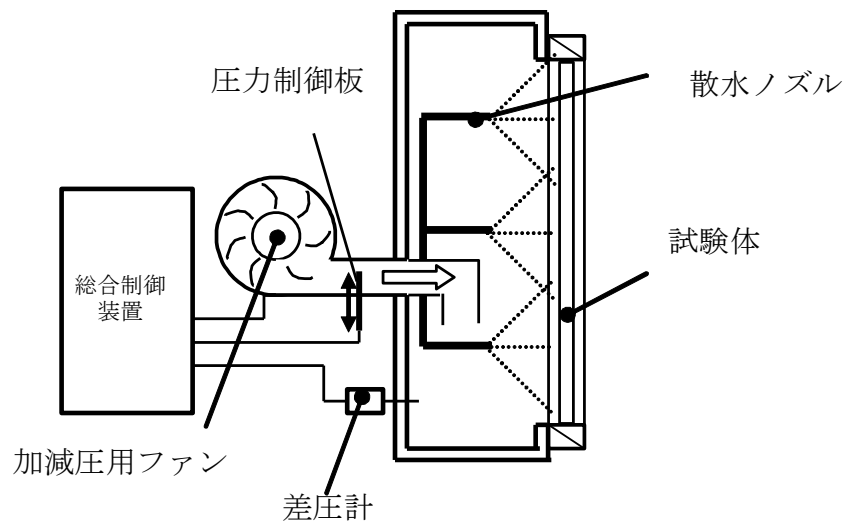


図 4.4 試験方法の概要

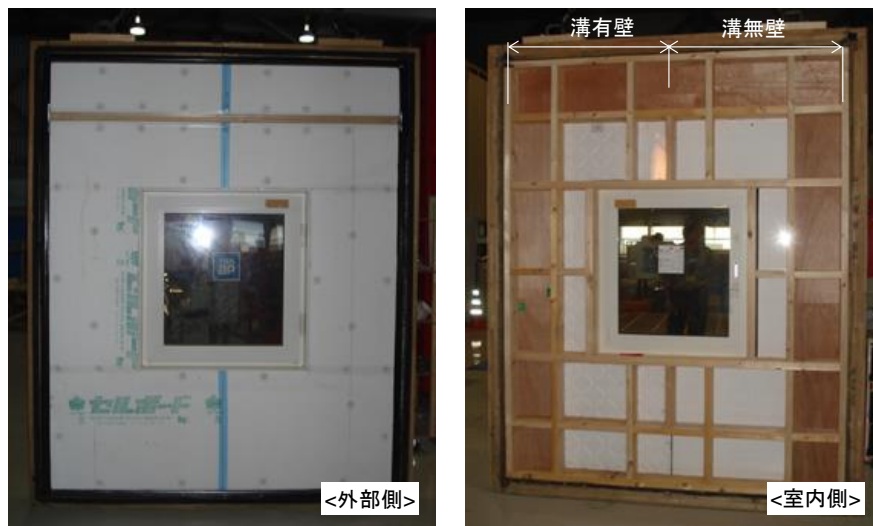
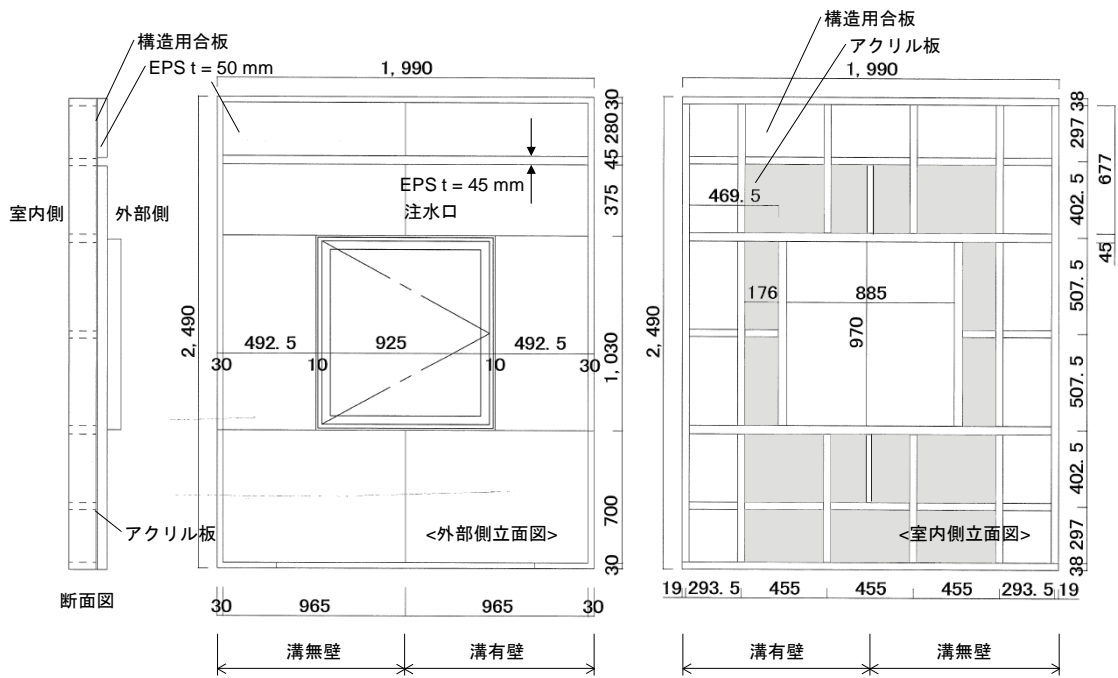


図 4.5 排水溝あり EPS・溝無し EPS 試験体図

EPS は、室内側から見て右半分を溝無、左半分を溝有とした。防水性能試験に使用した EPS の裏面排水溝形状は、写真 4.9 に示すように、幅 10mm、深さ 10mm で斜め格子状に設けた。3 節の実験結果を踏まえ、溝形状は V カット縦溝から EPS 接合部分の排水性能をより高めるために、斜め方向への格子状溝とし、溝の断面形状を深さ 5mm から 10mm の矩形溝に変更している。



写真 4.9 溝あり EPS, 溝無し EPS

断熱材裏面の端部は下部のみ開放し、他は気密テープで処理している。窓上枠に突きつける部分の断熱材は、水が横に流れるよう面取りをしている。また、木下地の無いところにビス等を打った場合を想定し、合板を室内側に貫通するようにビス及び釘を溝有壁、溝無壁、それぞれ数か所設けている。

② 試験条件

表 4.3 に試験条件を示す。Test No1 は圧力設定を無圧とし、Test No2 は JIS 基準に準じた、100Pa～700Pa、更に 1 kPa～2 kPa まで段階的に脈動加圧する方法で行った。試験体上部に設けた注入口から流入水量毎分 4 リットル/(m²/min)の水を噴霧しながら、漏水状況を目視によって観測した。

4.6.2 無加圧時の実験結果と考察

① 溝無壁について

表 4.4 に試験条件 No.1(無加圧時)の結果を示す。また、図 4.6 は、室内への漏水状況を、観察した部材への染み出し範囲を、模式的に示したものである。図中に漏水位置をアルファベットで示しており、小文字が溝有壁、大文字が溝無壁での観察状況を示している。溝無壁では試験開始 1 分 27 秒後には窓上から室内に漏水が発生した。これは、窓上に水が溜まり、室内側へあふれてきたものと考えられる。また、4 分後には合板を打ち抜いた釘周りからも室内側に漏水が発生した。6 分 38 秒後には下端部からも室内に漏水が発生した。これも、下端部から水が排出されずに室内側にあふれてきたものと考えられる。さらに、9 分後には窓横からも室内に流入してきた。これは窓上枠に沿って流れる水が排水しきれず、室内にあふれてきたものと考えられる。





② 溝有壁について

溝有壁では、溝やテーパーカットの空間を水が流れて裏面に水は溜まらず、室内側に漏水は発生しなかった。

表 4.3 試験条件

Test No.	1	2
温度	24 °C	24 °C
湿度	60%RH	60%RH
試験時間	10 min	10 min
設定圧力	無圧	100Pa→300Pa→ 500Pa→700Pa→ 1kPa→1.5kPa→2kPa
流入水量	4 リットル/(m ² /min)	4 リットル/(m ² /min)

表 4.4 無加圧時試験結果

経過時間	漏水状況	
	溝無壁	溝有壁
29秒	A, a, B, b 上の切り欠き部分からEPS裏面に流入	
1分27秒	W 窓の上から流入	—
4分	B' コースレッド穴から流入	—
6分38秒	F 下側で室内側に流入	—
9分	D 窓横から室内側に流入	—
W 窓の上から流入		F 下側で室内側に流入
		
D 流入状況		B' 流入状況
		

—: この記号は水の流入が無かったことを示す

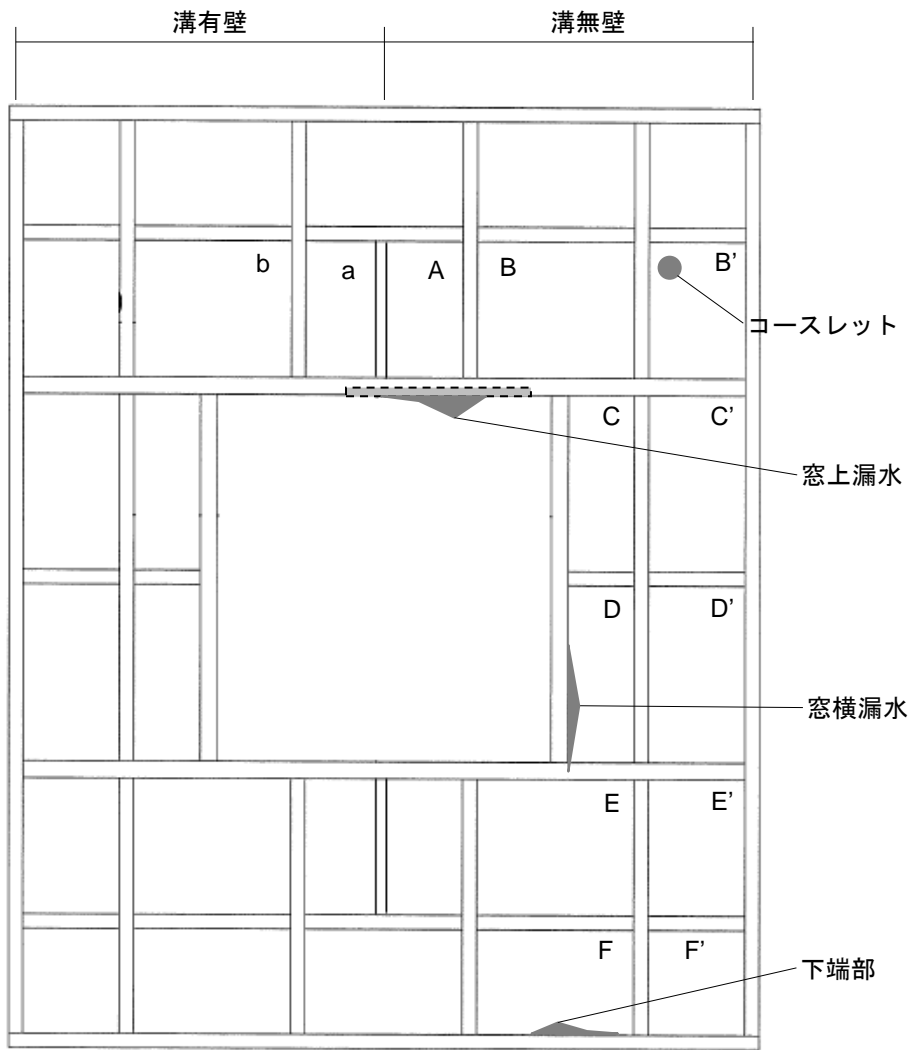


図 4.6 無加圧試験漏水状況図

4.6.3 加圧条件時における試験結果と考察

① 溝無壁について



表 4.5 に試験条件 No.2(加圧時)の結果を示す。図 4.7 に加圧試験漏水状況を示す。100Pa 加圧では図中 B'及び W に示すビス周り と窓上から室内側に漏水した。加圧量の増加に伴って漏水量が無加圧時に比べて大幅に増大した。500Pa では、F に示す下端部から室内に漏水した。700Pa では、D'に示すビス周りから漏水した。1kPa では下端部裏面には水位 10cm ほど水が溜まった。1.5kPa では D に示す窓横から漏水し B'に示す釘周りから漏水した。2.0kPa では E'に示す釘周りから漏水した。加圧試験の結果、窓周り、釘、ビスの打ち抜き部及び下枠部分の全てから漏水が観測された。

② 溝有壁について

排水溝やテーパーカットの空間を水が流れて裏面に水は溜まらず、w に示す窓上部のわずかな漏水が見られたが、全ての圧力条件で他に漏水は生じなかった。700Pa で f に示す下端部の裏面に水位 2cm 程度の水が溜まることがあったが、1kPa 以上の加圧条件でも水位の増加は見られなかった。これらの結果、溝有壁は EPS 裏面に侵入した水が排水溝によって速やかに排水されるため、室内側には漏水する危険が少ないことが分かった。

表 4.5 加圧試験結果

設定圧力	漏水状況	
	溝無壁	溝有壁
100Pa	B' コースレット穴 W 窓上から漏水	—
200Pa	—	w 窓上から漏水
500Pa	F 下端部に漏水	—
700Pa	D' 釘穴から漏水	—
1.0kPa	F 下端部は外部側で10cmの水位	—
1.5kPa	D 窓横, B' 釘穴、ビス穴から漏水	—
2.0kPa	E 釘穴、ビス穴から漏水	—

W 窓上漏水状況	w 窓上漏水状況
	
F 下端部の水の溜まり	E' ビス穴の漏水状況
	

—: この記号は水の流入が無かったことを示す

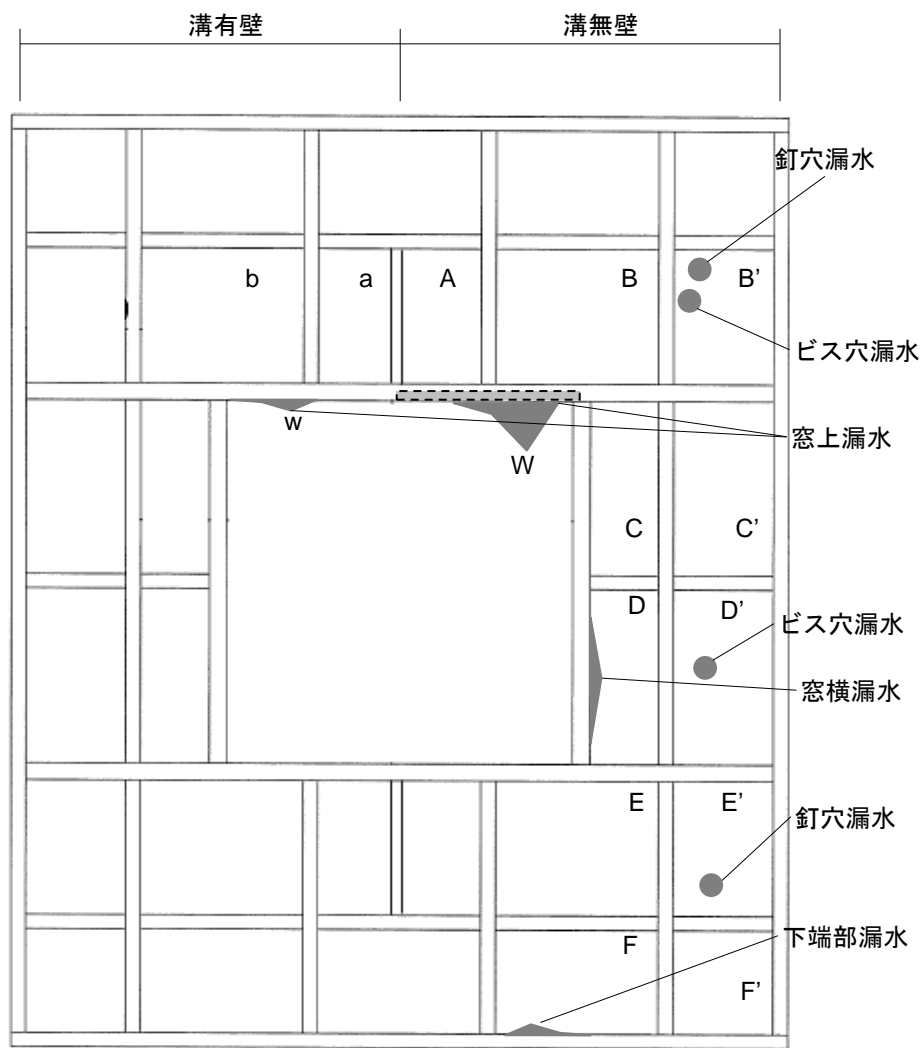


図 4.7 加圧試験漏水状況図

4.7 まとめ

湿式外張り断熱工法における、表面止水の破損により断熱材裏面に雨水が侵入した場合の、排水性能、および、構造部に対する防水性能について、試験方法を開発すると共に、断熱材裏面排水溝の設置による漏水リスク低減手法を開発し、実大実験並びに実験室実験によって、その性能を明かにした。

研究結果を以下にまとめる。

4.7.1 排水性能に関する実大実験のまとめ

屋外の実験建屋の外壁を用いて、外張り EPS 裏面における、侵入雨水の挙動を明らかにした。排水層の有無が排水性に及ぼす影響を検討するため、EPS 裏面に溝を切った場合と通常の溝無のものを同時に試験した。実験棟に設置した壁体に 10L の色紅水を注入し、目視によって排水性能の確認をした。得られた知見は以下の通りである。

- 壁面全体の排水状況として溝無壁は特定の水路が生じて排水が集中して起きるが、溝有壁では排水溝全体に分散して流れて部分的な集中を避けることが示された。
- 横下地木部分の排水状況としてビスを打っている横桟で、特に下端部において溝無壁では流れが妨げられ、侵入雨水が滞留することが明らかになった。一方、溝有壁では排水溝によってスムーズに排水され、水が滞留しないことが明らかになった。
- 溝有断熱材の縦方向接合部では水が滞留しており、排水を促進する溝形状の検討が課題となった。

4.7.2 防水性能に関する実験室実験のまとめ

湿式外張り断熱工法の実大試験壁を作製し防水性能の実験を行った。EPS の室内側裏面への溝有、溝無両試験結果を比較し、排水溝の有効性を確認した。防水性能試験は JIS に準じた試験法で行い、湿式外張り断熱工法の防水性能を評価するための試験方法を確立した。得られた知見は以下の通りである。

- 無加圧時の実験結果として溝無壁では試験開始、1分27秒後には窓上から室内に漏水が発生し、6分38秒後には下端部からも室内に漏水が発生した。一方、溝有壁では、溝やテーパーカットした空間を水が流れて裏面には水は留まらず、室内側に漏水は発生しなかった。
- 加圧時の実験結果として溝無壁では 100Pa の加圧でビス穴や窓上から室内側に漏水した。更に 500Pa では、下端部から室内側に漏水し、裏面には水位 10cm ほどの水が溜まっていた。700Pa ではビス周りからも漏水し、2.0KPa では釘周りからも漏水が確認された。
- 加圧時の溝有壁では、溝やテーパーカットの空間を水が流れて裏面に水は溜まらず、窓上部のわずかな漏水が見られたが全ての圧力条件で他に漏水は生じなかった。以上の結果、溝有壁は水が排水されるため、室内側には漏水する危険が少ないことが明らかになった。

本研究では通気層無し工法による湿式外張り断熱工法の排水性能, および防水性能の実験方法を開発し, 実験を行った。この結果, EPS の裏面に排水溝を設けることにより建物構造部への漏水リスクが生じないことが明らかになった。EPS 排水溝形状は, 1)および2)の実験結果から, 2)で採用した斜め格子溝が適切であるとの評価が得られ, さらに改善を進め実用化に取り組む予定である。

【第4章の参考文献】

- 4.1) 札幌市：札幌版次世代住宅基準について，入手先 <<https://www.city.sapporo.jp/toshi/jutaku/10shien/zisedai/zisedai.html>>，参照 2020.09.07
- 4.2) 鈴木大隆，廣田誠一，福島明：シート状防風材を用いた木造断熱壁における通気層空隙の確保に関する研究，日本建築学会計画系論文集，No.480，pp.123-128，1996.2
- 4.3) 鈴木大隆，廣田誠一，本間義規，鎌田紀彦：傾斜屋根における天井断熱・屋根断熱モデルの冬季温度特性について，日本建築学会計画系論文集，No.486，pp.27-34，1996.8
- 4.4) 鈴木大隆，本間義規，廣田誠一，鎌田紀彦，坂本浩志：30° 勾配屋根住宅の立地条件や断熱・換気条件を考慮した小屋裏・通気層温度解析結果と考察，日本建築学会計画系論文集，No.504，pp.25-31，1998.2
- 4.5) 野上在，齋藤宏昭：漏水を考慮した外壁通気層の湿気性状に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学-II，pp.469-470，2016.7
- 4.6) 齋藤宏昭，三浦尚志，桑沢保夫：木造断熱外壁の防湿・気密措置と防露性能に関する研究－繊維系断熱材充填工法に対する要求性能－，日本建築学会環境系論文集，第78巻，第688号，pp.461-470，2013.6
- 4.7) 日本工業規格：JIS A 1414-3: 2010，建築用パネルの性能試験方法－第3部：温湿度・水分に対する試験，入手先 <<https://kikakurui.com/a1/A1414-3-2010-01.html>>，参照 2020.09.08
- 4.8) 国土技術政策総合研究所：木造住宅の耐久性向上に関わる建物外皮の構造・仕様とその評価に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，No.975，入手先 <<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn/tnn0975.htm>>，参照 2019.09.9
- 4.9) 松下清夫：雨仕舞法の理論，工学図書出版社，1948.2
- 4.10) 伊庭千恵美，鈴木大隆：複合劣化試験装置を用いた建築外皮の耐久性評価手法の開発その2 湿式外断熱壁体の劣化性状と温度変動，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.77，pp.445-446，2004.7

第5章 EPS 断熱材に設ける排水溝形成手法の開発

5.1 本章の目的

木造建築物木造建物における湿害を防ぐ方法は、通気層を設けることが一般的である。通気層の防水効果は、鈴木ら^{5.1) 5.2)}や齋藤ら^{5.3)}によって明らかにされつつある。一方、湿式塗り材で外装を仕上げ、かつ通気層を設けない外張り断熱工法は、経年劣化等により表面止水が破損した場合、室内側に雨水が浸入することが懸念される。通気層のない木造外壁の防水性に関する既往の研究をみると、透湿防水シートの捲れが壁内への雨水侵入の危険性を高めることが指摘されている^{5.4)}。また、開口部まわりの防水性能を向上させる目的で、塗膜防水^{5.5)}や粘着性防水シート^{5.6)}の適用、透湿防水シートと防水テープの組合せ適性^{5.7)}や施工手順^{5.8)}に関する検討が行われている。このように、いずれの研究においても、透湿防水シートで雨水の侵入を防止しようとするものである。

これに対して、木造建物湿式外張り断熱工法におけるビーズ法ポリスチレンフォーム断熱材（以下、EPS という。）の室内側、すなわち、透湿防水シートの屋外側に排水溝を設けて防水性能を向上させることに着目した。

第4章では^{5.9)}、EPS の裏面に2種類の切削加工による排水溝を設けて、試験壁を製作し実大建物で排水性能実験を行っている。縦方向に50mm 間隔でVカット溝を設け、幅と深さが共に5mm の3角形の断面形状（写真）では、一般部や下端部での排水性は確保されたが、縦の継ぎ目で排水が滞ることが明らかとなった。そこで改良を図り、溝形状を幅10mm、深さ10mm の矩形断面とし、斜め格子状の形状（写真2）では、円滑な排水が可能となった。また、窓廻りやビス貫通部のような2次防水層を対象とした検討を行っており、EPS 裏面に侵入した雨水が排水溝によって速やかに排水され、その排水性によって室内側への目立った漏水が無いことを確認した。

しかし、住宅用の一般工法として商品化を検討する中で、切削による溝加工は、人力に頼らざるを得ないため生産効率が低く、さらに廃棄物の発生などが課題となった。

本章では、商品化を目指すため、低コストで量産化できる溝加工の方法として、プレス加工による溝形成手法を開発した。また、これにより製造したEPS を用いた外壁の排水性および防水性を、実験により明らかにした。



写真 5.1 第 4 章で採用した溝付き EPS

5.2 排水溝形成手法の開発

5.2.1 排水溝形成手法の検討

これまでの EPS 裏面排水溝の形成手法として、成型済み EPS ブロックをボード状に加工したものの平面部分を切削により形成する方法を用いてきた。しかし、一枚ごとに作業するため生産性が低く、切削時の大量に発生する端材の処理が煩雑で、製造コストに負担となっている。端材の出ない、専用の金型を用いて加圧発泡による製造方法もあるが、材料厚さが金型ごとに決められるため、要求される断熱性能や設計仕様に応じた複数の厚さの金型が必要になる。

開発したプレス機を用いる方法は、ローラーの間を既成の材料を通して溝を形成するため、生産性が極めて高く、端材処理も不要である。しかし、プレス加工で得られる溝の深さには限界があり、浅い溝で十分な排水性が確保できることを示す必要がある。

5.2.2 プレス加工方法による溝成型の検討

JIAA9521 によると^{5.10)}、EPS は 1 号品～4 号品の 4 段階に分類される。表 5.1 に、本開発で使用した断熱材の物性値および 1 号品から 4 号品の物性値を示す。密度が低い 3 号品～4 号品の柔らかいものを用いた場合、プレス加工に所定の時間をかけ、プレス機から EPS を取り外すと、突起の形状が崩れたり、成形前の形状に戻ったりしてしまい、所定の構造の排水溝を形成することができないことが明らかになった。一方、採用した EPS は 2 号品に相当しており、プレス加工機にかけ加工を施して成形された EPS は突起形状が崩れることなく、養生期間を経てなお、成形前の形状に戻ることはなかった。これらのことから、溝付き外張り断熱材としては、2 号品以上を用いることとした。

表 5.1 用いた EPS と JIS 断熱材の規格表 JIS A 9521

項目(種類)	用いたEPS の数値	EPS JIS規格			
		1号	2号	3号	4号
密度 Kg/m ³	29	30 以上	25 以上	20 以上	15 以上
熱伝導率 W/(m·K)	0.033	0.036 以下	0.037 以下	0.040 以下	0.043 以下
曲げ強さ N/cm ²	42	32 以上	25 以上	18 以上	10 以上
圧縮強さ N/cm ²	21	16 以上	12 以上	8 以上	5 以上
透湿係数 ng/(m ² ·s·Pa)	185	145 以下	205 以下	250 以下	290 以下
酸素指数		26以上			

5.2.3 プレス加工方法による排水溝寸法の検討

プレス加工寸法を図 1 に示す。プレス加工による排水溝は、下地である構造用面材との接合を確実にできる形状であること、排水性能を損なうことのない溝形状であること、そして EPS 同士の縦接合部においても排水溝の連続性を確保できる形状とすることが必要である。排水溝の連続性については、第 4 章の研究結果^{5,9)}によると格子状に比べて曲線状とすることが望ましいことが分かっている。排水溝の幅については、少なくとも 12mm 程度必要となる。排水溝を設計した結果、直径 60mm の円柱状の突起を芯々で 72mm 間隔並列状に配置することで条件を満たすことができた。一方、突起の高さについては、2.0mm が上限である。2.0mm を超えて突起の高さが形成されるとセルが破壊されて材料自体の性能に影響を及ぼすおそれがある。従って突起高さの設計値は 1.5mm ± 0.5mm とした。

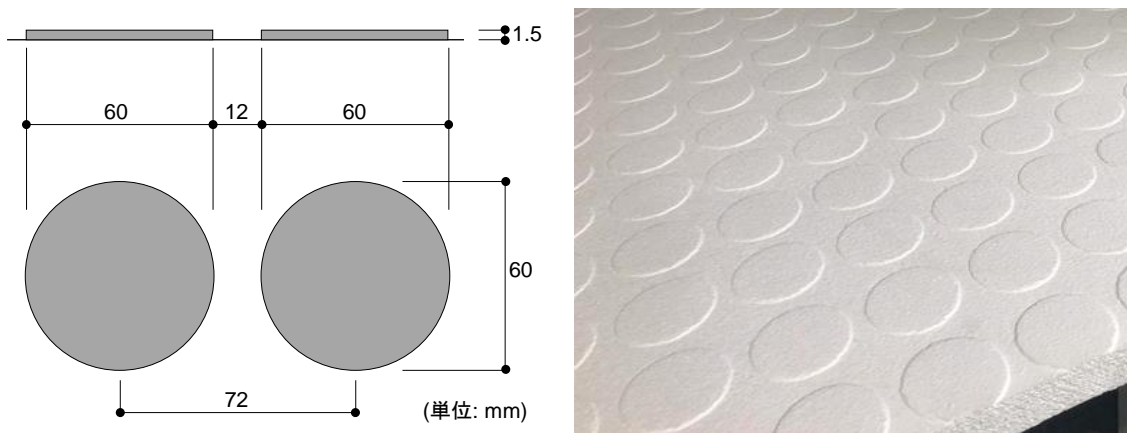


図 5.1 プレス加工排水溝寸法および溝の形成状況

5.2.4 プレス加工の工程

プレス加工機械を用いた排水溝付き EPS の製造フローを写真 5.2 に示す。プレス加工機はベルトコンベア式でローラーの間を通すことでプレスする仕組みである。EPS 成形済みブロックを厚さ 40mm から 150mm の間でボード状に加工し、プレス加工機ローラーの間に流し込む。プレス加工機ローラーの隙間を調整することによって様々な厚さの断熱材を加工できる。



EPSブロック加工機



プレス加工機



溝付きEPSプレス加工品



溝付きEPSプレス加工機

写真 5.2 プレス加工製造ライン

5.3 排水性能および防水性能の試験結果

5.3.1 試験の目的

前節までに記載したプレス加工方法により新たに開発した EPS 排水溝を使用した壁体が、暴風雨時に経年劣化した窓廻りや換気口廻りなどから侵入した雨水を室内側に漏水することなく排出することを確認するため、北海道立総合研究機構建築研究本部北方建築総合研究所内にある試験装置にて試験を行った。

5.3.2 JIS 試験法に準拠した試験方法

試験は JIS A-1414-3:2010 の 5.7 (水密試験)^{5,11)}に基づき行った。毎分 4L/m²(試験体仕上げ面の見付面積)の水を試験体全面に噴霧し、上部に設けたスリット状の欠損部から EPS 裏面に水を流入させ、無圧および有圧、2 種類の試験を行い目視によって観察した。JIS における水密試験では、一次防水層を主な対象として評価するのが一般的であるが、本試験では、断熱システムが長期に供用されることを想定し、外装材の表面が破損した状態を想定した水密試験を実施した。

試験条件を表 5.2 に示す。有圧試験では 100Pa から表に示すように 10 分ごとに圧力条件を変更して行った。なお、脈動は加えていない。

表 5.2 試験条件

試験条件	無圧試験	有圧試験
温度	24°C	24°C
湿度	60%RH	60&RH
噴霧継続時間	10 min	10 min
設定圧力	0 Pa	100 Pa→300 Pa→ 500 Pa→700 Pa→ 1 kPa→1.5 kPa→2 kPa
噴霧水量	毎分 4 L/m ²	毎分 4 L/m ²

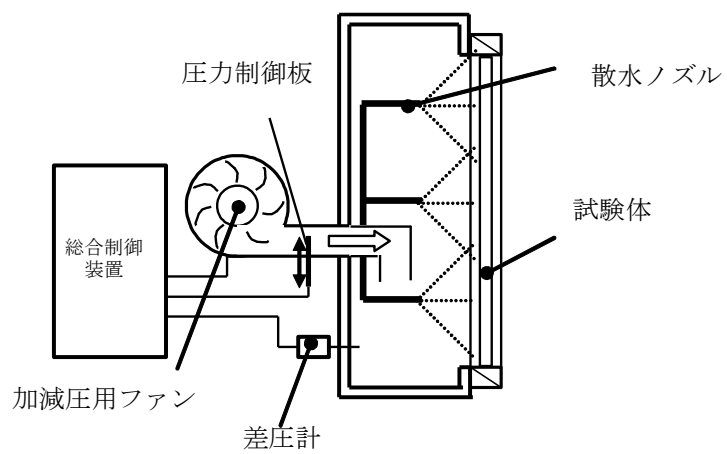


図 5.2 実験方法

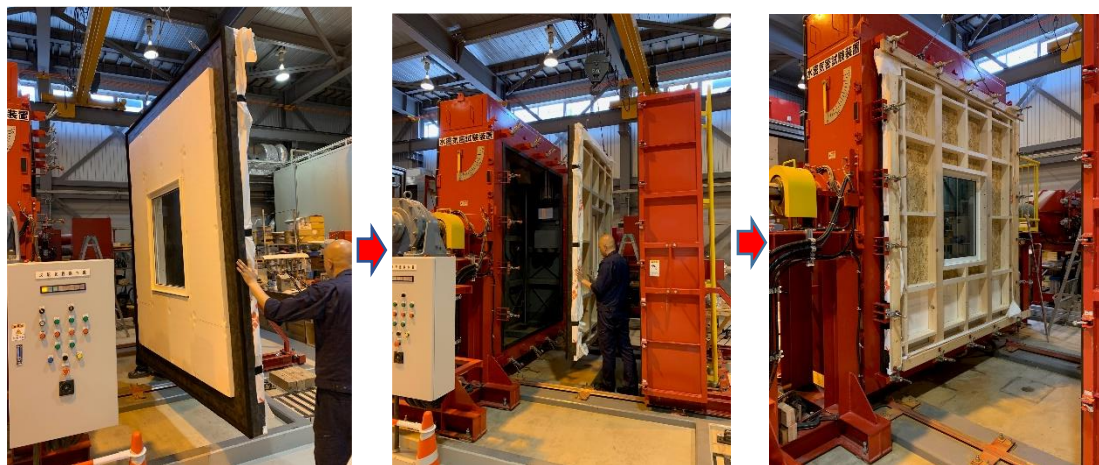


写真 5.3 試験体の設置状況

5.3.3 試験体の詳細

試験体を図 5.3 および写真 5.4 に示す。新築住宅を想定しているため、幅 1,990mm×高さ 2,490mm の木造壁体を構成し、構造用面材として 9mm の合板を張り付けた。中央部には樹脂製窓を設け、窓廻りにはドイツ製のシーリングテープを採用し、ノンシール工法で防水施工している。外部側は厚さ 150mm の溝付き EPS を、専用ステンレスビスおよび、ポリプロピレンワッシャーで木造軸組みに留め付けた。窓廻りの EPS は侵入した雨水が排水され易くするよう 25mm のテーパカットを設けている。EPS 外壁側仕上げは湿式塗り壁材にて左官仕上げをしている。窓廻り、および枠廻りの詳細については、図中に示す通りである。EPS の室内側(裏面)の構造用面材(厚さ 9mm)と透湿防水シートの一部を透明アクリル板(厚さ 10mm)とし、裏面の排水状況を確認できるようにしている。試験体の上部、左右は通常開放とならない部分であるため、気密テープで密閉しているが、外張り断熱材の下端部は一般外壁と同様に開放し、裏面を流れる水が屋外側に排水できるようにした。

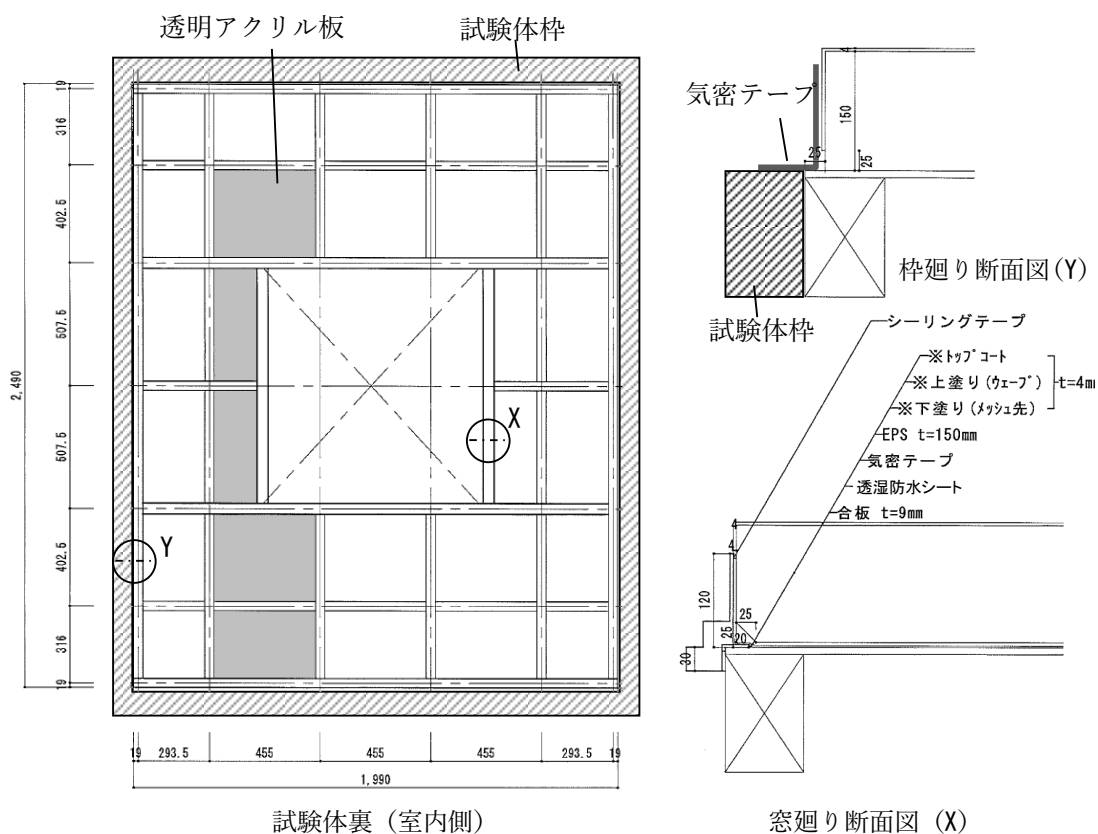
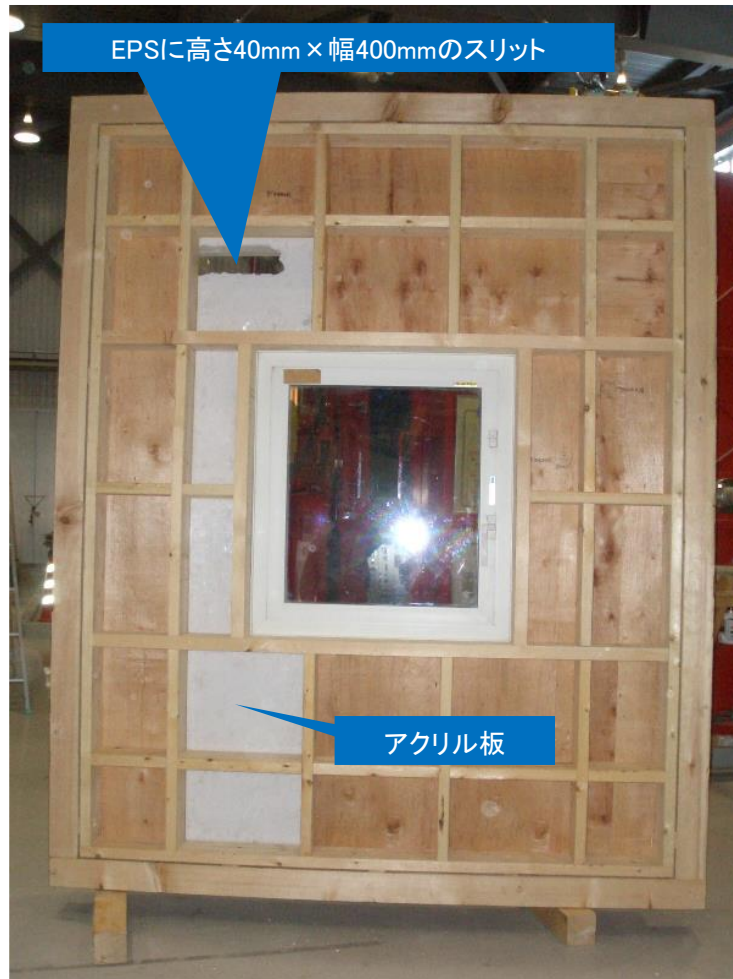


図 5.3 試験体図



EPSに高さ40mm × 幅400mmのスリット

アクリル板







写真 5.4 試験体室内側

5.3.4 試験結果

(1) 無圧試験の結果

試験結果を図 5.4 に示す。A0 欠損部から EPS 裏面に流入した水は、壁中央の B1 部および壁下端部 C1 に示すようにプレス加工によって設けた突起の溝を流れ、滞留することなく排出された。第 4 章では^{5,9)}、溝深さ 5mm~10mm で検討してきたが、深さ 1.5mm の溝形状であっても A1 窓上以外は問題なくスムーズに排水できることが明らかになった。一方、窓上 A1 部では、実験開始直後から裏面に高さ 6cm 程度の溜まりが生じた。水の噴霧を停止した後、A1 窓上には 30 秒後に 3cm、5 分後に 2cm 程度の高さで溜まりが残った。この溜まりは、その後 30 分以内に解消した。他の部位では EPS 裏面の水は滞留することなく全て排出され、室内側に漏水することはなかった。

表 5.3 無圧試験の結果

時間	漏水状況	
直後～	A0: 欠損部からEPS裏面(アクリル板との間)に流入 B1: EPS裏面の溝を水が筋状に流れ落ちる C1: 下端部から排水 A1: EPS裏面の窓上に水位6cm溜まる。	
試験終了後 30秒	A1: EPS裏面の窓上水位3cm	
	C1: EPS裏面の溝の間は流れ落ちて排水	
試験終了後 5分	A1: EPS裏面の窓上水位2cm	
	A0 : 流れ状況	B1 : 流れ状況
		
	C1 : 流れ状況	A1 : 溜まり状況
		
	C1 : 終了後の排水状況	A1 : 終了後の溜まり状況
		

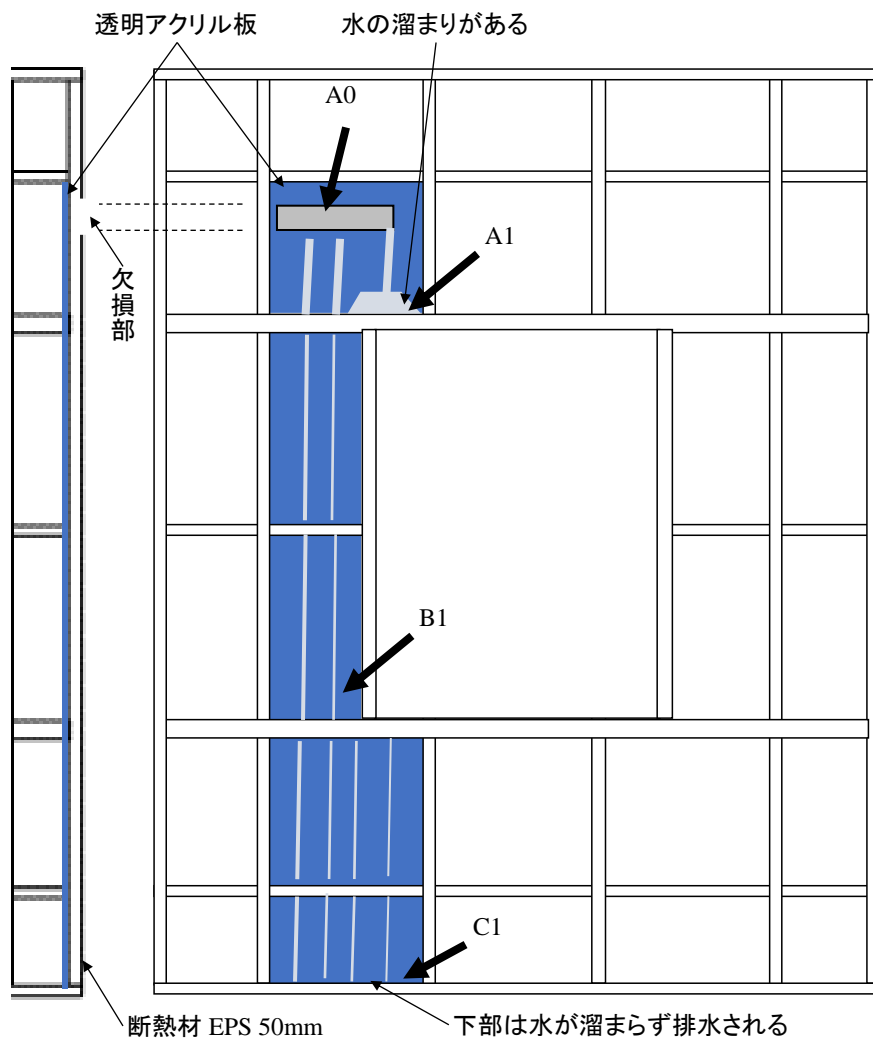








図 5.4 無圧試験の結果

(2) 有圧試験の結果

試験結果を表 5.4 および図 5.5 に示す。100Pa で加圧した 30 秒後には、A1 窓上部に無加圧時と同様 6cm 程度の溜まりが生じた。また、B1 横棧部に 3cm 程度の溜まりが生じたが、C1 の下端部では、排水され溜まりは生じなかった。300Pa で加圧した 4 分後には、D1 窓枠下の隅角部から漏水が見られた。1kPa で加圧した 3 分後には、D2 窓枠下中央部で漏水が生じた。試験終了直後は、無圧試験と同様に A1 窓上には 2cm 程度の溜まりが残ったが、この溜まりは 30 分以内に解消した。なお、B1 についてはすみやかに排水された。

窓枠下の EPS をはがして確認したところ、窓枠と EPS の間に窓廻り気密材に使用したシーリングテープが水を含んでいた。これらのことから、EPS 裏面(室内側)に流入した水は外壁下端部から排出されることは確認できたが、窓上の水の溜まりと窓廻りの気密処理に課題があることが分かった。また、透湿防水シートを固定したステーブルの貫通部については漏水が無かった。

表 5.4 有圧試験の結果

時間	漏水状況
100Pa 30秒	A1:EPS裏面の窓上に水位6cm溜まる B1:EPS裏面の横桟上に3cm溜まる C1:下端部からは排水される
300Pa 4分	D1:窓枠隅角部水で室内側に漏水
1kPa 3分	D2:窓下枠から室内側に漏水
試験終了後 5分	A1:EPS裏面の窓上に水位2cm B1:排水される
A1:溜まり状況	B1:溜まり状況
	
C1:流れ状況	D1:漏水状況
	
D2:漏水状況	A1, B1: 終了後の排水状況
	

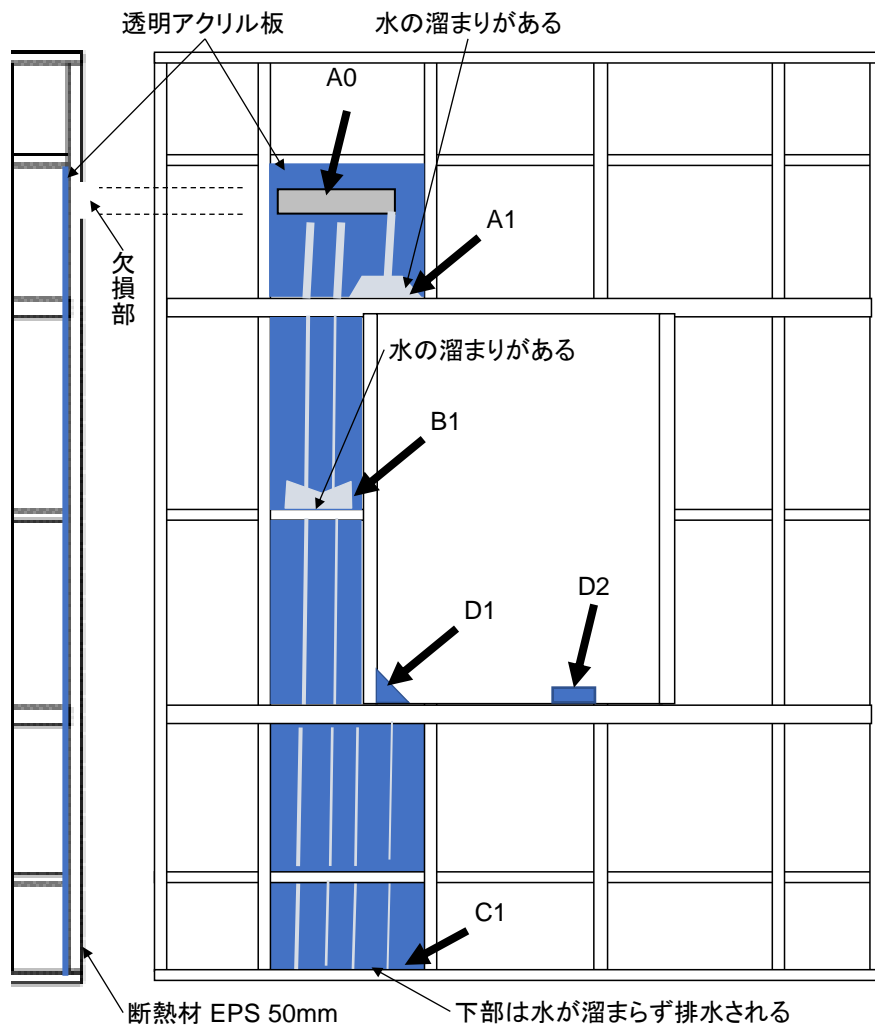


図 5.5 有圧試験の結果

5.4 まとめ

湿式外張り断熱工法における EPS の裏面排水溝形成手法をプレス加工により製造する方法を開発した。なお、この加工方法は、高密度 EPS の特徴を生かした加工法として、製法特許^{註2}を取得した。また、プレス加工手法により形成した EPS 裏面排水溝によって縦接合部において排水性能が確保されることを示した。今後は下記の件を課題として改良を進める予定である。

- 1) 窓廻りの水の溜まりを解決するために、侵入した雨水が横に排水され、縦方向の排水溝をつたって外部へ流れるよう EPS のテーパカット(角を落とす)を入れるなどディテールの整備が必要である。
- 2) 窓枠と EPS 裏面室内側の透湿防水シートとの防水施工を確実にできるように仕様書を整備する必要がある。特に EPS 裏面は通気層と同等の排水性が確保されていると考えられることから、通気工法と同等の透湿防水シート施工法とすることができるか否かの検証が必要である。

【第5章の参考文献】

- 5.1) 鈴木大隆, 廣田誠一, 福島明: シート状防風材を用いた木造断熱壁における通気層空隙の確保に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.480, pp.123-128, 1996.2
- 5.2) 鈴木大隆, 廣田誠一, 本間義規, 鎌田紀彦: 傾斜屋根における天井断熱・屋根断熱モデルの冬期温度特性について, 日本建築学会計画系論文集, No.486, pp.27-34, 1996.8
- 5.3) 齋藤宏昭, 三浦尚志, 桑沢保夫: 木造断熱外壁の防湿・気密措置と防露性能に関する研究—繊維系断熱材充填工法に対する要求性能—, 日本建築学会環境系論文集, 第78巻, 第688号, pp.461-470, 2013.6
- 5.4) 宮村雅史, 石川廣三, 梅田泰成, 牧田均, 木村雄太, 西田和生: 木造住宅の雨水侵入に関する実験的研究 その1 屋根, 外壁, バルコニー, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.79-80, 2011.7
- 5.5) 大原信二, 小嶋秀典, 上村昌樹, 渡部嗣道: 木造軸組ラスモルタル壁の防水性能評価試験(その2. 防水性能試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.471-472, 2010.7
- 5.6) 毛利聡, 大久保孝昭, 李亮, 高橋芳徳, 根元央希, 流田靖博: 粘着型防水紙の活用による木造ラスモルタル外壁の品質向上の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第721号, pp.415-423, 2016.3
- 5.7) 榎本孝之, 北野公一, 宮村雅史, 森田育男, 石川廣三: 木造住宅の耐久性向上に関わる建物外皮の構造・仕様とその評価に関する研究 透湿防水シートと防水テープとの組合せ適性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.1103-1104, 2015.7
- 5.8) 梅田泰成, 石川廣三, 宮村雅史, 牧田均, 中野一郎, 河村優輝: 木造住宅の耐久性向上に関わる建物外皮の構造・仕様とその評価に関する研究 外壁通気構法窓まわりの防水施工方法による防水性の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.1117-1118, 2016.7
- 5.9) 小松幸雄, 千葉隆弘, 福島明, 村田さやか, 高倉政寛, 遠藤卓: 湿式外張り断熱外装システムの防水性向上に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第85巻, 第767号, pp.11-18, 2020.1
- 5.10) 日本工業規格: JIS A 9521: 2014, 建築用断熱材, 入手先 <<https://kikakurui.com/a9/A9521-2014-01.html>>, 参照 2020.09.08
- 5.11) 日本工業規格: JIS A 1414-3: 2010, 建築用パネルの性能試験方法—第3部: 温湿度・水分に対する試験, 入手先 <<https://kikakurui.com/a1/A1414-3-2010-01.html>>, 参照 2020.09.08

第6章 湿式外張り断熱外装システムにおける防火性能の向上

6.1 本章の目的

建築基準法第 22 条が適用された区域に木造住宅を建築しようとする場合、延焼のおそれのある部分の耐力壁は、20 分間の非損傷性と遮熱性を満たした準防火構造とする必要がある。これに対し、準防火地域内に木造住宅を建築しようとする場合、延焼の恐れのある部分の耐力壁は、建築基準法施行令第 108 条に示されている 30 分間の非損傷性と遮熱性を満たした防火構造（以下、30 分防火構造という。）とする必要がある。このような状況をみると、本研究で開発した湿式外張り断熱外装システムでは、適用範囲を幅広く考え、準防火地域内に建築される木造住宅を想定し、30 分防火構造の耐力壁を目指す必要がある。

木造住宅における一般的な耐力壁については、防火構造が仕様規定化されている。しかし、外張り断熱外装システムについては、仕様規定化されておらず、防火実験に基づいて非損傷性および遮熱性に対する防火性能を明らかにする必要がある。糸毛らは^{6,1)}、性能規定が制定された以降、30 分防火構造が 4,760 件認定されていることを報告している。このように、仕様規定以外の新技術に基づく防火構造が性能評価されることによって様々な建築物に適用されていることを示唆している。

一方、糸毛らが行った発砲プラスチック系断熱材を外張りした木造耐力壁の防火性能に関する研究をみると^{6,2)}、厚さ 15 mm と 100 mm の EPS では、断熱材が厚いほど遮熱性が高いことを明らかにしている。しかし、加熱側表面では、熔融した断熱材の燃焼により、その厚さが大きいほど急激な温度上昇がみられ、延焼による火災の拡大など、火災安全性への影響を指摘している。趙らは^{6,3)}、湿式外断熱工法の上方延焼予測のモデル化に関する研究において、防火構造の壁体に外張り断熱を施工した場合における可燃性外装の燃え拡がり試験を行った。その結果、燃焼開始から 400 秒経過した際の表面温度は、EPS の厚さが 200 mm で最大値を示し、50 mm および 100 mm の試験体では、加熱開始から 200 秒後に熔融落下することが示されている。また、200 mm および 300 mm の試験体では、外装表面温度が急上昇し、その後、最終的に試験体上方まで延焼が拡大したことが示されている。このように、外張り断熱材が厚いほど熔融した断熱材の燃焼によって火災安全性の低下が懸念されている、すなわち、断熱性能と火災安全性との間に反比例の関係がある。本研究で開発した湿式外張り断熱外装システムでは、木造住宅の高断熱化、すなわち、外張り断熱材を厚くすることを目指していることから、外張り断熱材の厚さと防火性能との関係を明らかにする必要がある。

このような背景から本章では、湿式外張り断熱外装システムにおける断熱材の厚さが大きい場合の防火性能を向上させるための施工方法を確立することを目的に、本外装システムにおける防火性能の発現メカニズムを分析するとともに、その分析結果に基づいて開発した外装工法とその防火性能との関係を実験的に検証した。

6.2 外張り断熱外装システムにおける防火性能の発現メカニズム

図 6.1 に、外張り断熱外装システムにおける防火性能の発現メカニズムを示す。乾式工法による外張り断熱外装システムの場合は、通気胴縁が長いビスによって断熱材背後の躯体に留め付けられることから、火災による火熱が加えられて断熱材が燃焼・溶融したとしても外装材がすぐには脱落しない。このことによって防火性能が一定時間維持されるものと考えられ。これに対し、本研究で開発した湿式外張り断熱外装システムは、外張り EPS 断熱材の表面に樹脂モルタルを直接施工するものである。この外装システムの周囲で火災が発生して火熱が加えられた場合、樹脂モルタルよりも先に外張り断熱材が燃焼・溶融することが予想される。従って、樹脂モルタルの下地がなくなることから躯体から脱落し、防火層がなくなった耐力壁に火熱が加えられ、防火性能が極端に低下するものと考えられる。このように、本研究で開発した湿式外張り断熱外装システムにおいて防火性能を向上させるためには、樹脂モルタルを外張り断熱材背後の躯体に留め付け、外張り断熱材が消失した直後に樹脂モルタルが脱落しないようする必要がある。

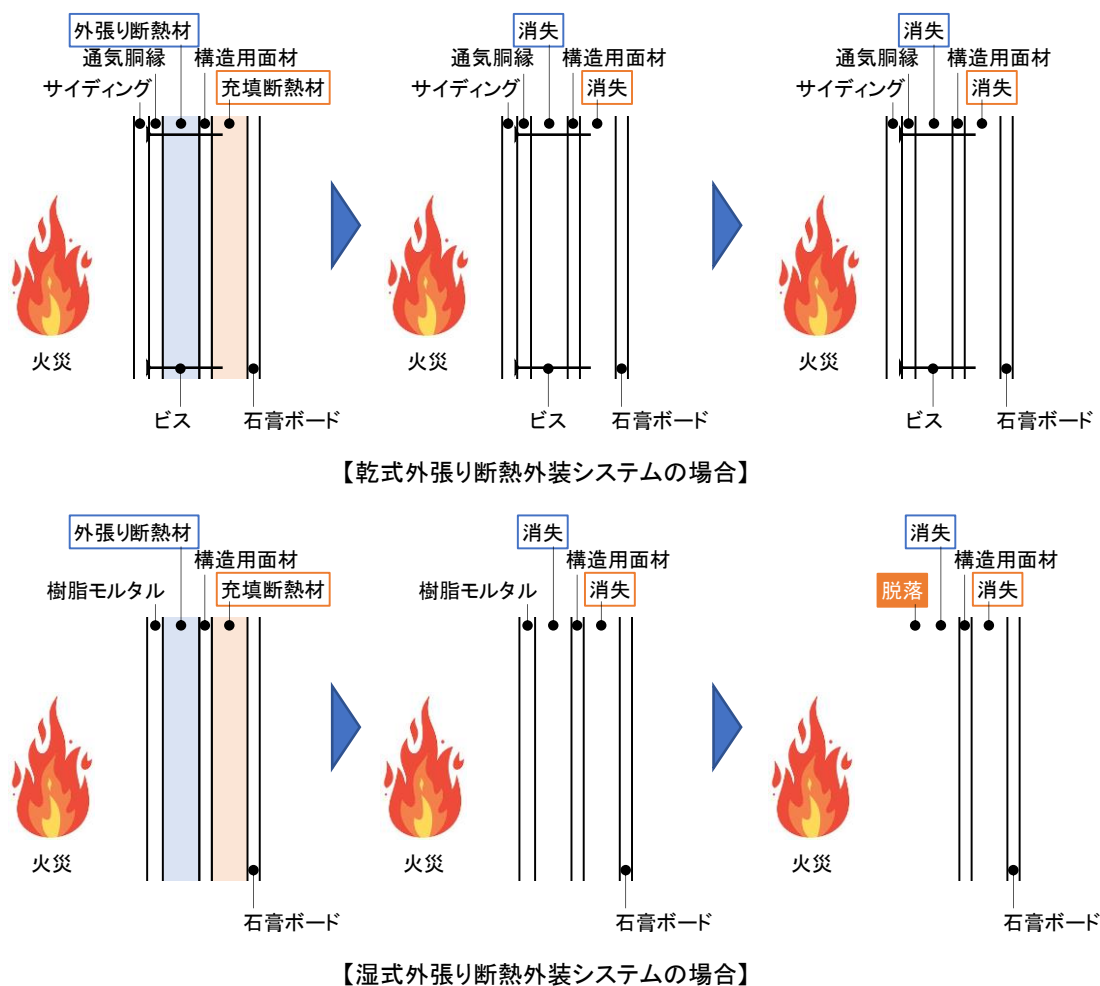


図 6.1 外張り断熱外装システムにおける防火性能の発現メカニズム

6.3 防火性能向上を目指した湿式外張り断熱外装工法の開発

以上に示すように、湿式外張り断熱外装システムの防火性能を向上させるためには、樹脂モルタルを外張り断熱材背後の木造躯体に留め付ける必要がある。本研究では、図6.2に示すように、外張り断熱材を躯体に留め付けるビスを利用し、樹脂モルタルのクラック防止を目的としたガラス繊維メッシュの上からビスを施工してそのメッシュと外張り断熱材を躯体に留め付け、その後、樹脂モルタルをガラス繊維メッシュが巻き込まれて一体化されるように施工する工法を考えた。樹脂モルタルはビスで躯体に留め付けられている状態になることから、火災による火熱が加えられた際に外張り断熱材が消失した直後には脱落しないものと考えられる。

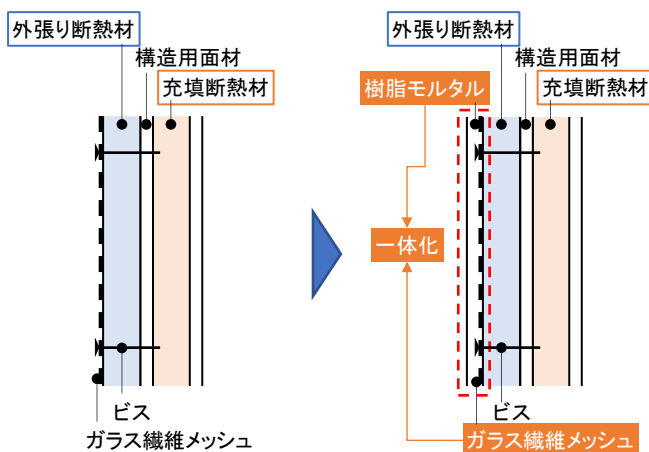


図 6.2 防火性能向上を目指した湿式外張り断熱外装工法

具体的な施工手順を図 6.3 に、ガラス繊維メッシュの固定状況を写真 6.1 に、ガラス繊維メッシュにおける見付け面の配置を図 6.4 に示す。ガラス繊維メッシュは、比較的硬い素材であることから、平坦ではなく若干のうねりを有している。従って、樹脂モルタル下塗り材を先に施工し、ガラス繊維メッシュを下塗り材に伏せ込むように施工するのが一般的である。本工法では、大きさ 150×150 mm のガラス繊維メッシュを EPS の面に固定用留め付け材（ポリプロピレン製ワッシャー）およびステンレスビスで外張り断熱材背後の躯体に緊結し、次に、樹脂モルタル下塗り材を EPS の前面に施工してからガラス繊維メッシュを伏せ込んで一体化させるようにした。

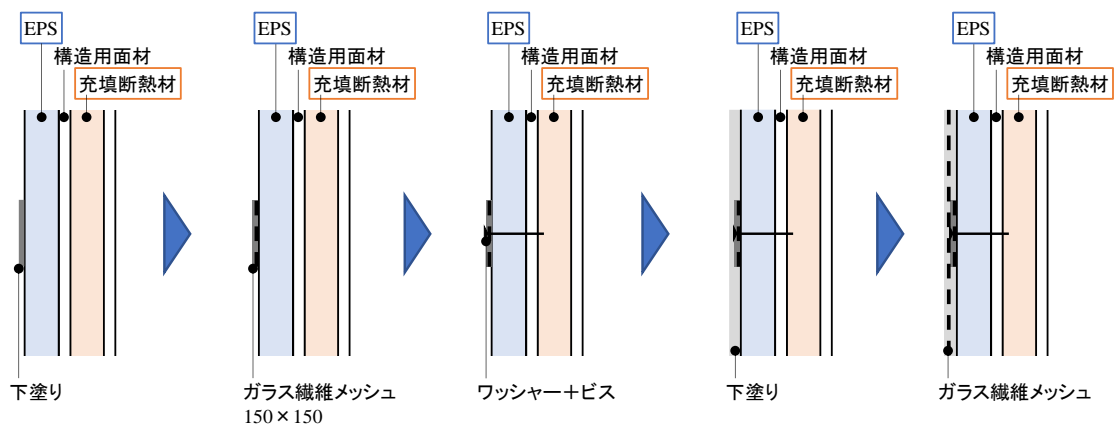


図 6.3 ガラス繊維ネットの施工手順

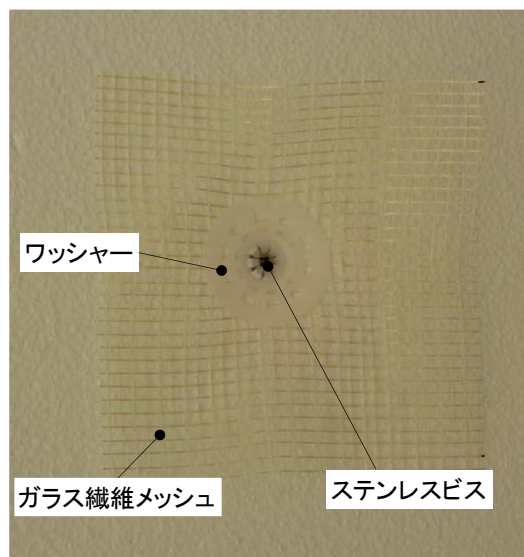


写真 6.1 ガラス繊維メッシュの固定状況

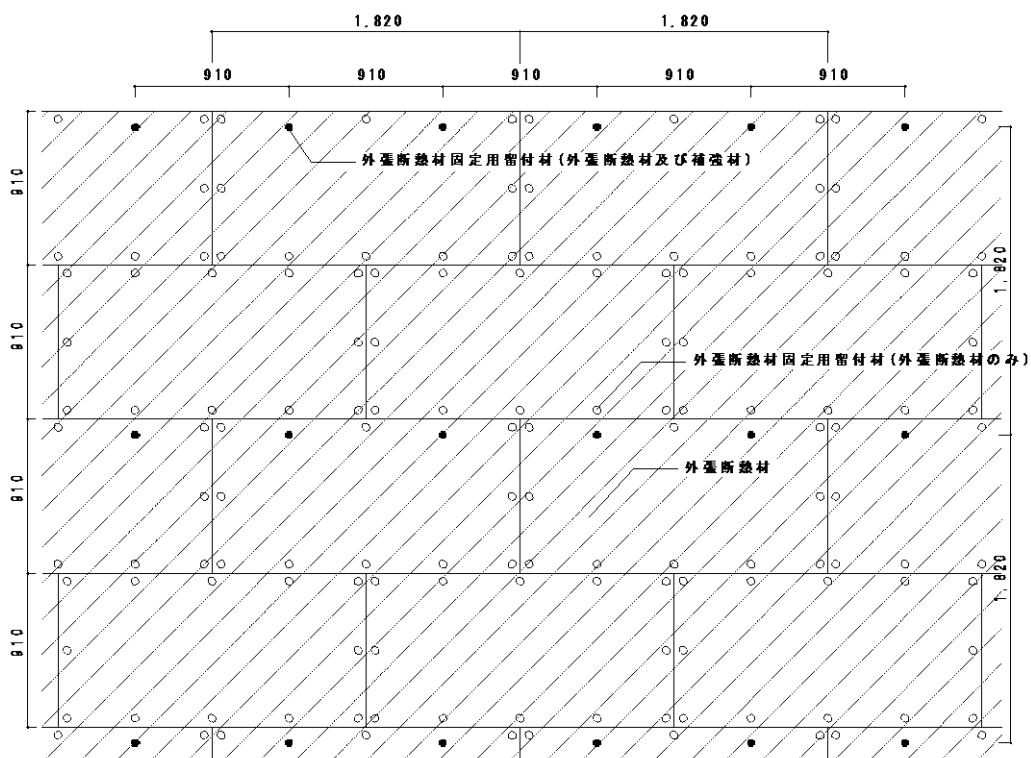


図 6.4 ガラス繊維メッシュ (補強材) における見付け面の配置

6.4 防火実験

6.4.1 試験体の概要および実験方法

防火実験は、地方独立行政法人北海道総合研究機構建築研究本部北方建築総合研究所が所有する防火実験装置を用いて行った。試験体の概要を図 6.5 に示す。大きさは幅 3,135 mm×高さ 3,200 mm，すなわち，幅は 2 間分，高さは 1 層分の試験体である。耐力壁の仕様は本研究で開発した湿式外張り断熱外装システムに従い，屋外側から屋内側に向かって樹脂モルタル，EPS（外張り断熱材），透湿防水シート，構造用合板，軸組み躯体（グラスウール充填），石膏ボード，という構成である。本実験では，EPS の厚さをパラメータとし， $t=40$ mm および $t=150$ mm の 2 種類に対して防火実験を行った。

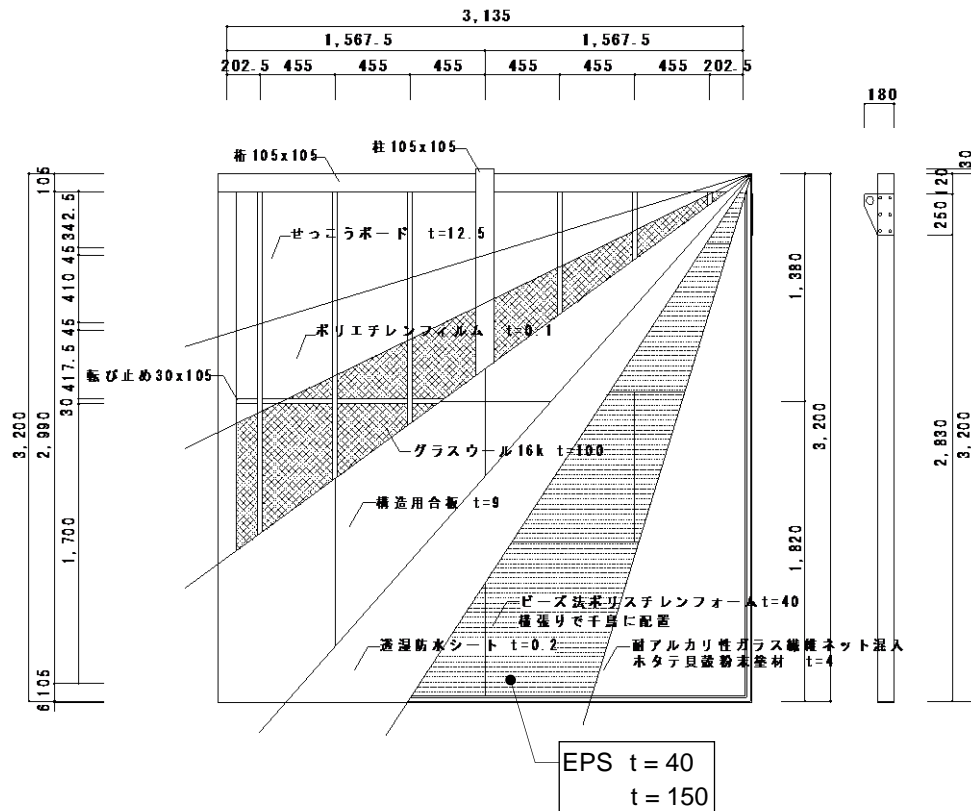


図 6.5 試験体の概要

試験体の実験装置への設置状況を図 6.6 に示す。鉄骨骨組みの治具に試験体を設置し、下側にあらかじめ設置した油圧ジャッキを用いて試験体に 2 階および屋根の固定荷重に相当する軸方向力を載荷した状態で防火実験を行った。また、図 6.7 に示すように、試験体の加熱面および非加熱面には熱電対を取り付けて温度を測定するとともに、試験体下側の土台に変位計を設置し、加熱している間の軸方向変位を測定した。加熱時間は 30 分とし、加熱温度は防耐火実験で用いられる標準加熱曲線に基づいた。加熱温度の目安としては、2.5 分で約 500℃、5 分で約 600℃、12.5 分で約 700℃、22.5 分で約 800℃ である。

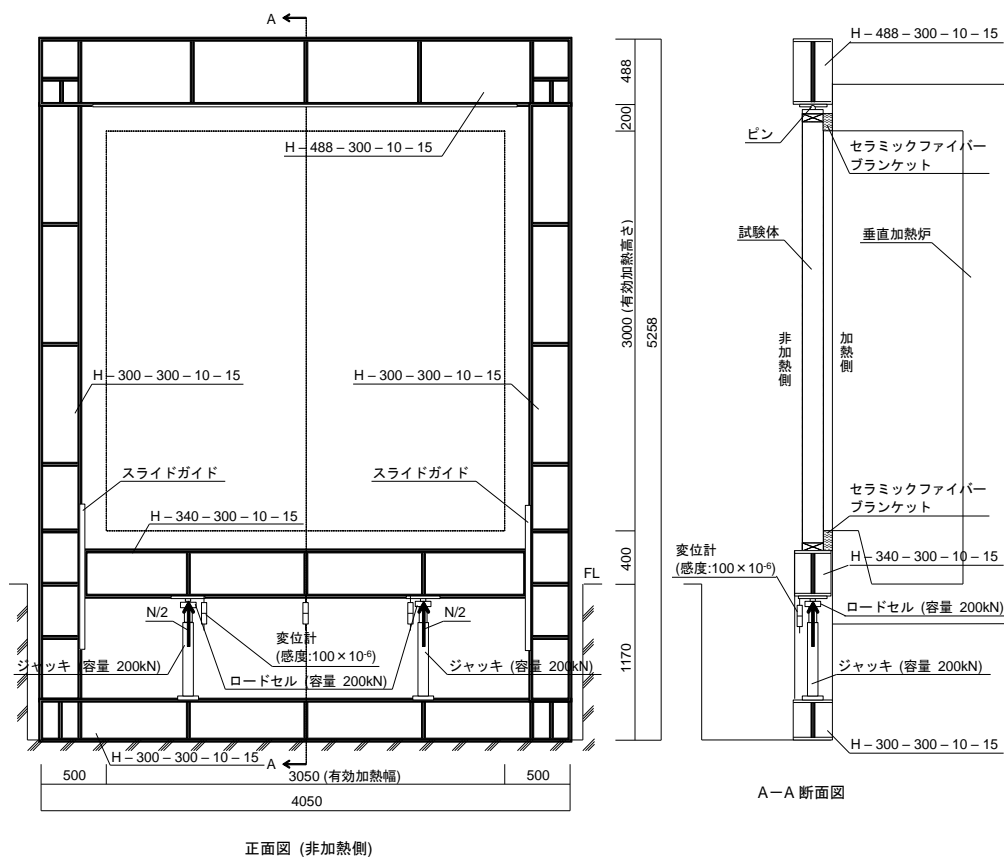
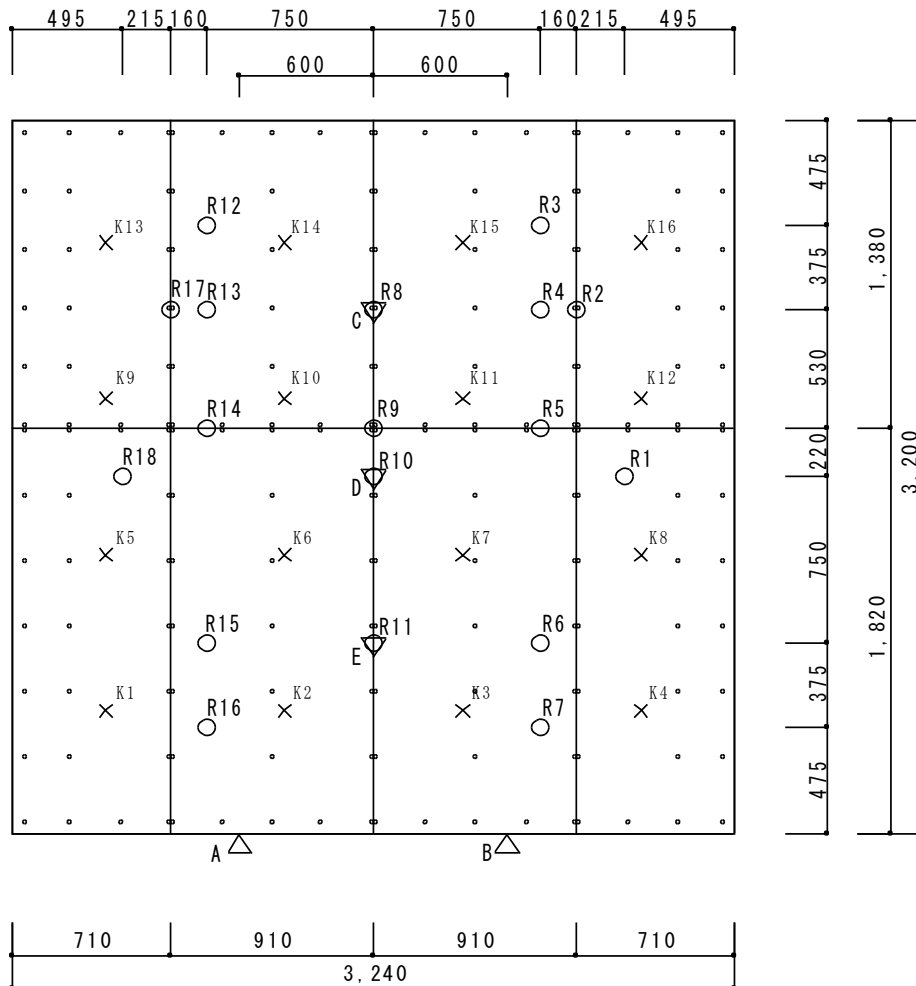


図 6.6 試験体の実験装置への設置状況



凡例

- × : 加熱温度測定位置 (K1~K16)
- : 裏面温度測定位置 (R1~R18)
- △ : 軸方向収縮量測定位置 (A~B)

図 6.7 熱電対および変位計の設置個所

6.4.2 試験体の作製状況および防火実験の流れ

試験体の作製状況を写真 6.2 に示す。木造軸組み壁体にはグラスウールを充填し、外張り断熱材には厚さ 150 mm の EPS を用いた。



写真 6.2 試験体の作製状況

実験状況を写真 6.3 および写真 6.4 に示す。実験時間は 30 分間であり、加熱から 15 分で炉内温度が 850℃、22 分で 950℃に達するような実験を行った。実験終了後の炉内をみると、EPS 断熱材の大半は溶融し、燃焼による火炎が発生していた。



写真 6.3 実験状況 (1)

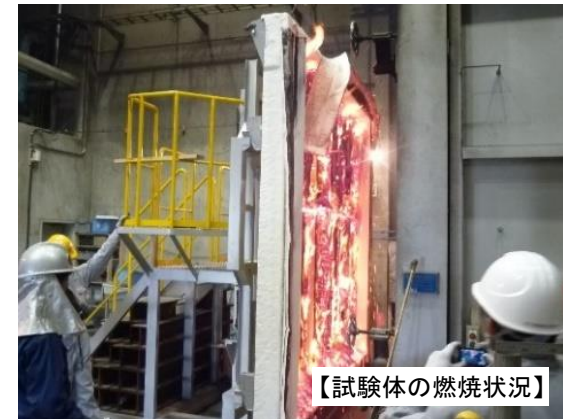
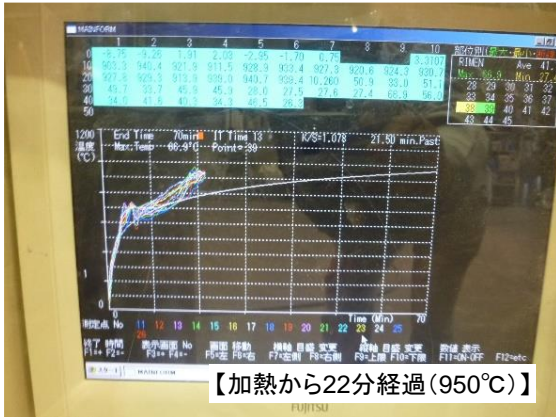


写真 6.4 実験状況 (2)

試験体の炭化状況を写真 6.5 に示す。壁体内部のグラスウールは、その大半が溶融し、壁体下部に滞留していた。柱材の炭化深さは、1~2 cm 程度であり、柱断面のおよそ 20% が炭化していた。

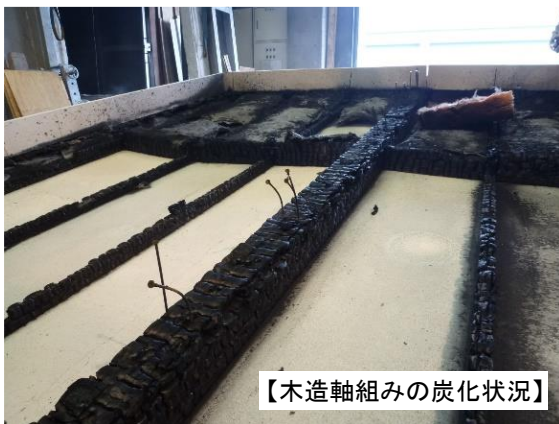


写真 6.5 試験体の炭化状況

6.4.3 実験結果

1) EPS の厚さ $t = 40 \text{ mm}$ の実験結果

実験で得られた炉内温度の推移を図 6.8 に示す。炉内温度は標準加熱曲線に従うように手動で制御するが、加熱開始から 7 min 以降に炉内温度が若干減少するように推移し、10 min 以降になると温度の減少傾向が顕著となった。これは、7~10 min の間で EPS が燃焼して消失し、その後、外壁と躯体との間に形成された空気層の形成によって断熱性が低下し、炉内温度が減少したものと考えられる。また、加熱開始から 23 min 程度で急激な上昇が見受けられるが、その時点で外装材が躯体から脱落したためであると考えられる。このように、炉内温度の推移をみると、EPS が燃焼し消失した直後に外装材が脱落するような状況は、確認されなかった。

図 6.9 に、試験体裏面温度（室内側表面温度）の推移を示す。初期温度は 18°C であり、加熱開始から 12 min 以降に裏面温度が上昇し始め、加熱開始から 30 min の温度上昇は、最大で 70°C 、平均で 43°C となり、いずれも 30 分遮熱性の規定値を下回った。また、表面温度と裏面温度との関係をみると、EPS が燃焼して消失した後に裏面温度が上昇し始め、外装材脱落后においても裏面温度の上昇がみられる。しかし、これらの現象は 30 分遮熱性には影響を及ぼさなかったと言える。

図 6.10 に、試験体軸方向収縮量の推移を示す。加熱開始から 5 min 以降から収縮量が増加し始め、外装材脱落后から収縮量の増加傾向が顕著となるものの、30 分非損傷性の規定値を大幅に下回る結果となった。

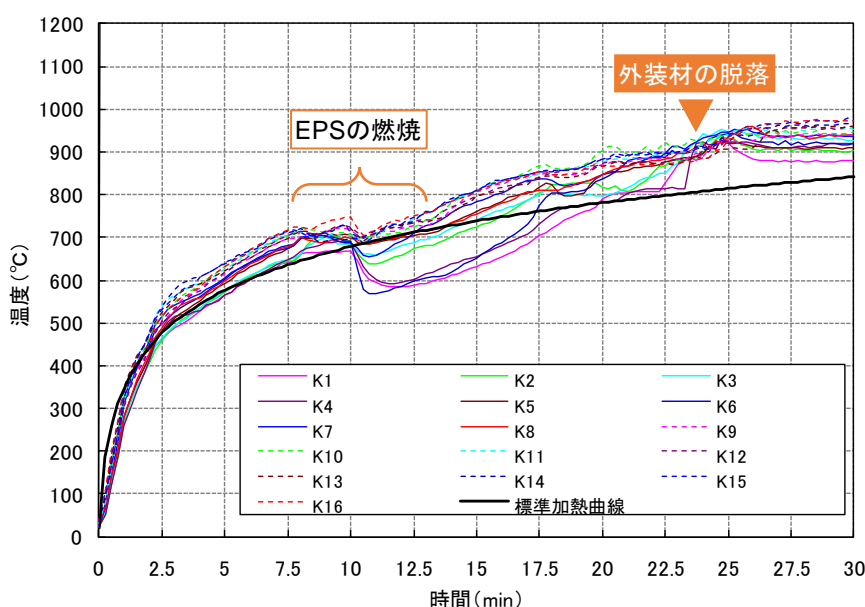


図 6.8 炉内温度の推移 ($t = 40 \text{ mm}$)

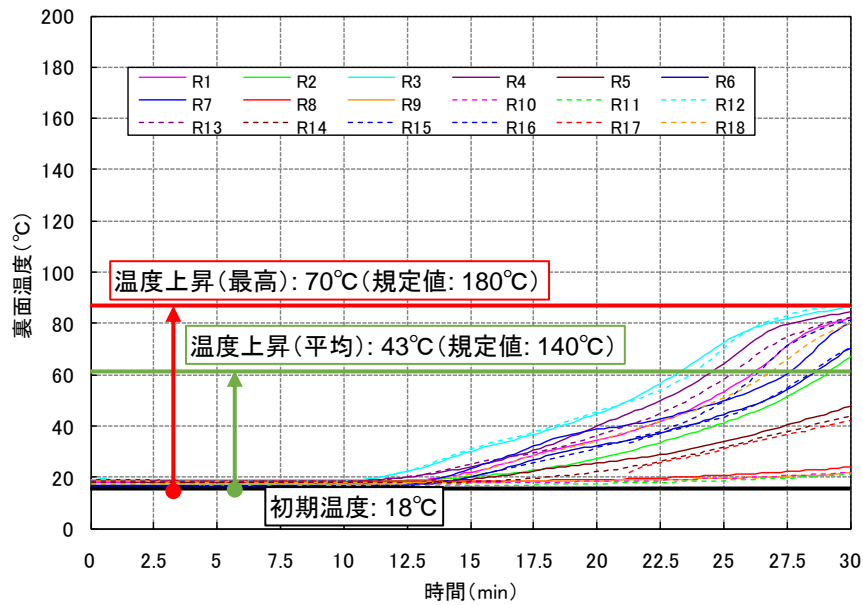


図 6.9 試験体裏面温度の推移 (t = 40 mm)

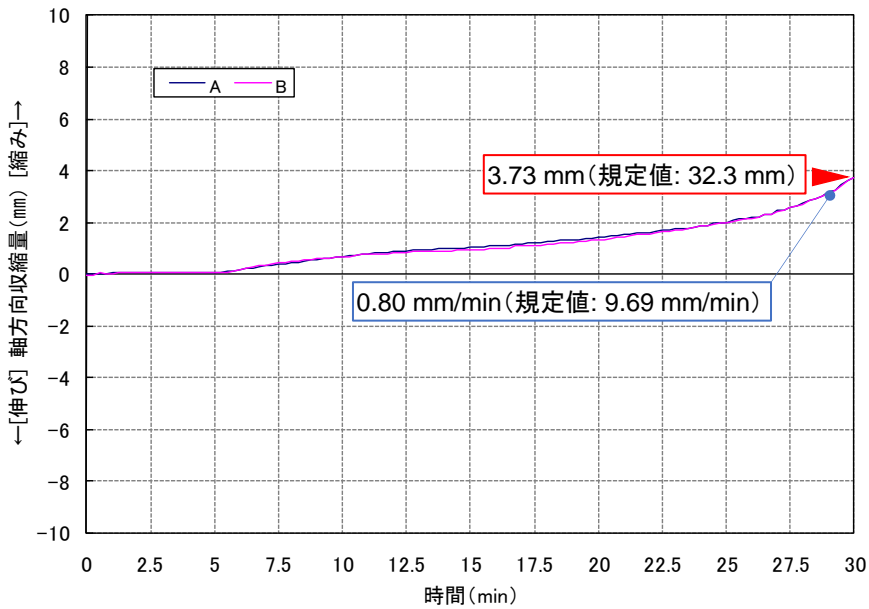


図 6.10 試験体軸方向収縮量の推移 (t = 40 mm)

図 6.11 に、試験体面外方向変形量の推移を示す。前述の収縮量に比べて面外変形量は大きくなり、外装材が脱落した加熱開始から 23 min 以降で変形量が急増している。しかし、試験体裏面には、火炎が噴出するような亀裂等は確認されなかった。

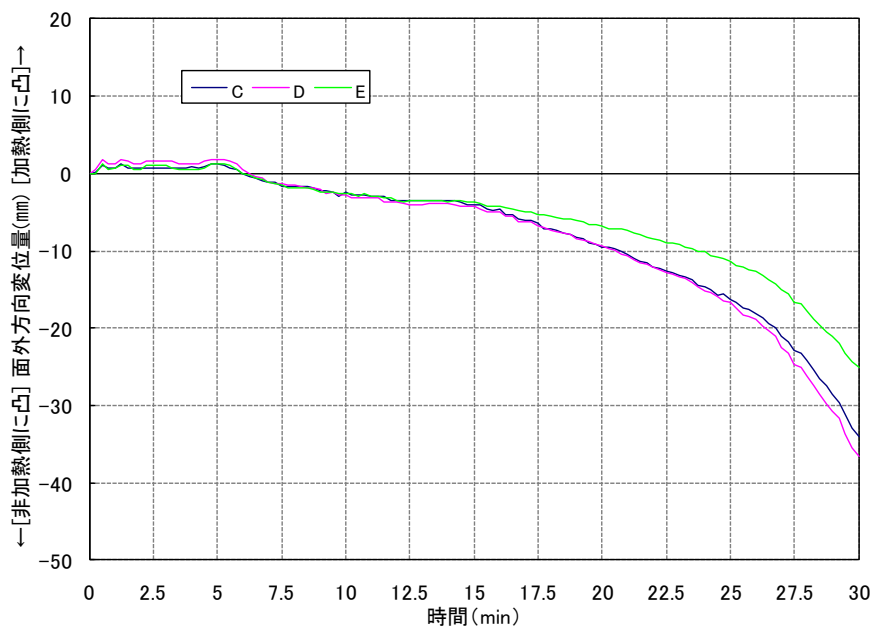


図 6.11 試験体面外方向変形量の推移 (t = 40 mm)

2) EPS の厚さ $t=150\text{ mm}$ の実験結果

実験で得られた炉内温度の推移を図 6.12 に示す。炉内温度は標準加熱曲線に従うように手動で制御するが、加熱開始から 2~3 min 以降に EPS が燃焼し始めて炉内温度が急上昇し、その後は一定の温度で推移している。これは、EPS の厚さ $t=40\text{ mm}$ に比べて断熱性が高いとともに、燃焼した EPS の量が多くなったことが主な要因であると考ええる。また、加熱開始から 20 min 程度で急激な上昇が見受けられるが、その時点で外装材が躯体から脱落ためであると考えられる。このように、炉内温度の推移をみると、EPS が燃焼し消失した直後に外装材が脱落するような状況は、確認されなかった。

図 6.13 に、試験体裏面温度（室内側表面温度）の推移を示す。初期温度は 23°C であり、加熱開始から 12 min 以降に裏面温度が上昇し始め、加熱開始から 30 min の温度上昇は、最大で 76°C 、平均で 45°C となり、いずれも 30 分遮熱性の規定値を下回った。また、表面温度と裏面温度との関係をみると、EPS が燃焼して消失した後に裏面温度が上昇し始め、外装材脱落后においても裏面温度の上昇がみられる。しかし、これらの現象は 30 分遮熱性には影響を及ぼさなかったと言える。

図 6.14 に、試験体軸方向収縮量の推移を示す。加熱開始から 5 min 以降から収縮量が増加し始め、EPS 消失後から収縮量の増加傾向が顕著となるものの、30 分非損傷性の規定値を大幅に下回る結果となった。

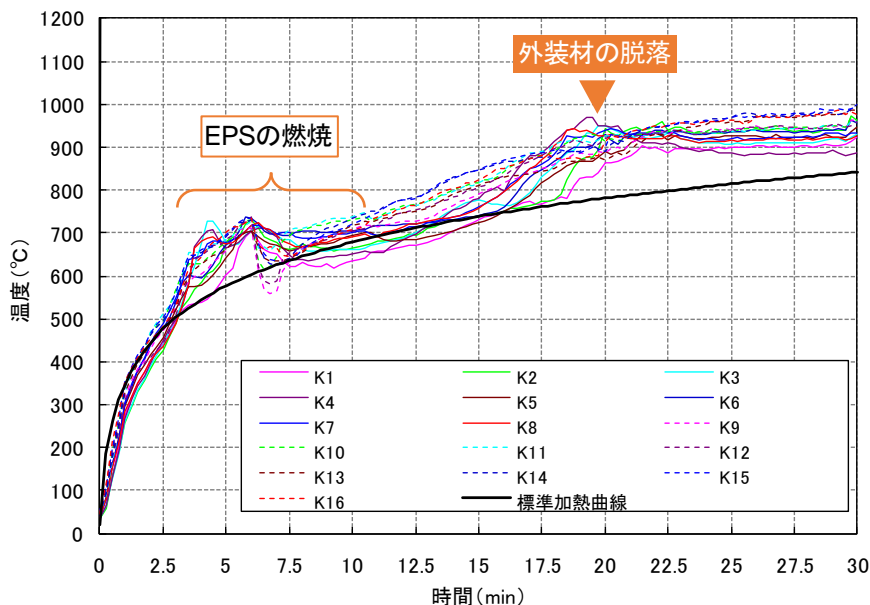


図 6.12 炉内温度の推移 ($t = 150\text{ mm}$)

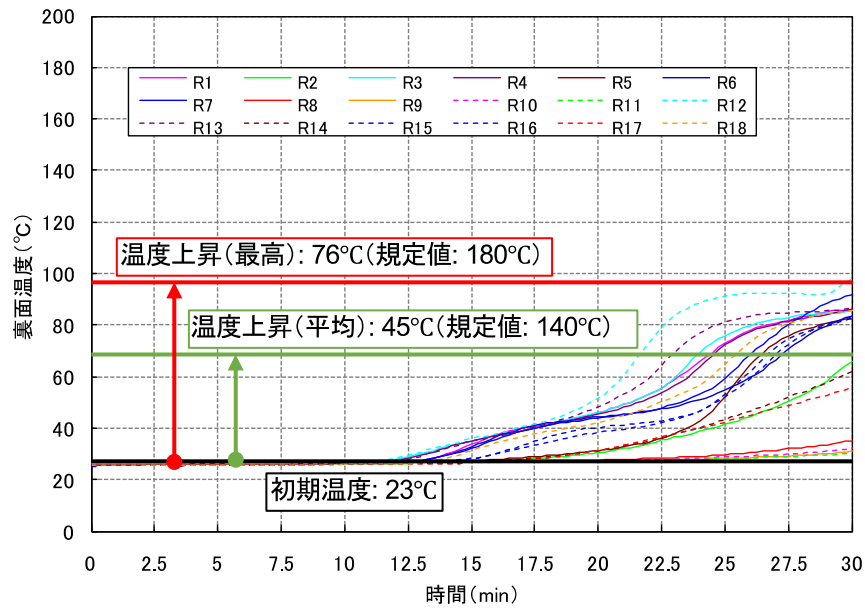


図 6.13 試験体裏面温度の推移 (t = 150 mm)

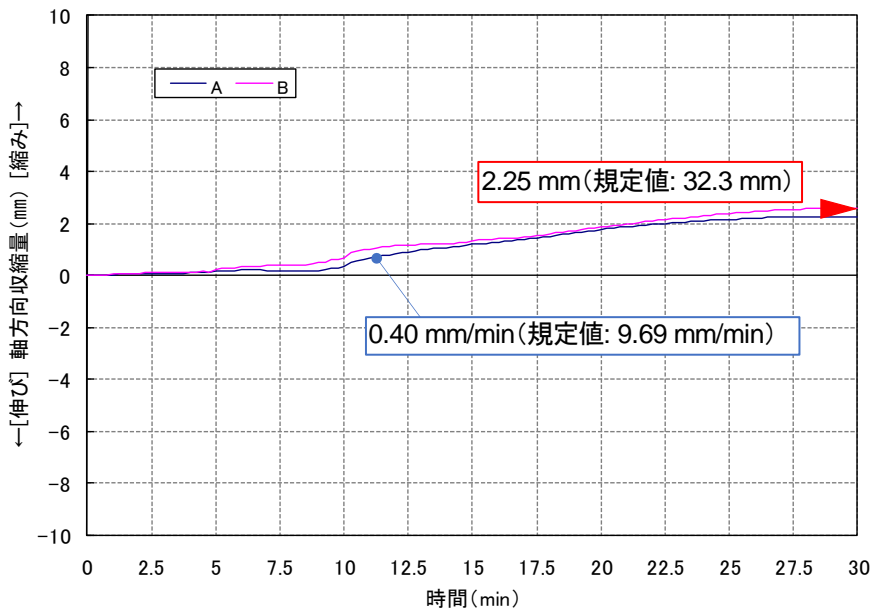


図 6.14 試験体軸方向収縮量の推移 (t = 150 mm)

図 6.11 に、試験体面外方向変形量の推移を示す。前述の収縮量に比べて面外変形量は大きくなり、外装材が脱落した加熱開始から 20 min 以降で変形量が増加し、30 min で約 10 mm となった。しかし、試験体裏面には、火炎が噴出するような亀裂等は確認されなかった。

以上に示すように、EPS の厚さ $t=150\text{ mm}$ では、EPS の燃焼が影響して $t=40\text{ mm}$ の場合に比べて試験体裏面温度が高くなる傾向を示すものの、30 分遮熱性は十分に確保されていると言える。非損傷性や遮炎性については、EPS が厚いほど有利な結果となった。

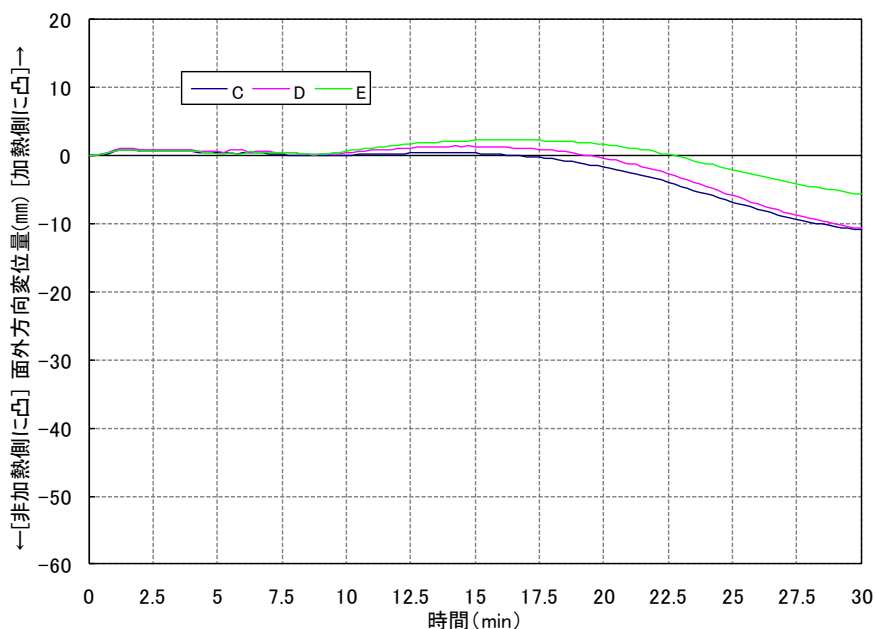


図 6.15 試験体面外方向変位量の推移 ($t = 150\text{ mm}$)

6.5 まとめ

本章では、湿式外張り断熱外装システムにおける断熱材の厚さが大きい場合の防火性能を向上させるための施工方法を確立することを目的に、本外装システムにおける防火性能の発現メカニズムを分析するとともに、その分析結果に基づいて開発した外装工法とその防火性能との関係を実験的に検証した。その結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 本研究で開発した湿式外張り断熱外装システムは、断熱材の厚さ以外の部材厚さを極力小さくするため、外張り断熱材の表面に樹脂モルタルを直接施工している。その周囲で発生した火災による火熱が加えられた場合、外張り断熱材が始めに熔融・消失することから、その直後に防火層である樹脂モルタルが脱落し、防火性能が急激に低下することが予想される。このようなことから、外張り断熱材が消失した直後においても樹脂モルタルが防火層として機能するように、樹脂モルタルを外張り断熱材背後の躯体に留め付ける施工方法を開発した。
- 2) EPS の厚さ $t = 40 \text{ mm}$ と $t = 150 \text{ mm}$ の 2 種類の試験体を対象に、防火実験を行った。その結果、いずれの EPS 厚さにおいても 30 分遮熱性、非損傷性、および遮炎性が確保されることが明らかとなった。EPS が厚いほどその燃焼によって防火性能が低下する懸念があったものの、 $t = 150 \text{ mm}$ の場合における試験体裏面温度は $t = 40 \text{ mm}$ に比べて若干高い程度であり、非損傷性および遮炎性については $t = 150 \text{ mm}$ の方が優れている傾向を示した。

【第6章の参考文献】

- 6.1) 糸毛治, 鈴木淳一, 成瀬友宏: 防耐火構造外壁の大臣認定に関する調査～認定数に基づく充てん断熱材に関する考察～, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.92, pp.21-24, 2019.6
- 6.2) 糸毛治, 入江雄司, 小浦孝次, 鈴木大隆: 発砲プラスチック系断熱材を用いた木造外張り断熱壁体の防火性能に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), A-2, pp.307-308, 2008.7
- 6.3) 趙玄素, 坂本篤, 西尾悠平, 野口貴文, 田村政道, 吉岡英樹, 中村正寿: 湿式外断熱工法の上方延焼予測のモデル化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 防火, pp.345-348, 2014.7

第7章 結論

7.1 本研究のまとめ

本論文では、北海道で水揚げされたホタテ貝の貝殻を建築資材として利活用することを目的とし、建築物の内装材および外装材の開発を行うとともに、ホタテ貝殻粉末を用いた湿式外張り断熱外装システムの開発を行った。以下に各章の要点をまとめる。

第1章序論では、研究の背景としてホタテ貝殻養殖の歴史を振り返り、日本全国におけるホタテ貝水揚げ量の推移をはじめとし、北海道における水産系廃棄物発生量の推移や、ホタテ貝殻を利用した各種製品の調査を行い、建築資材として利活用することの可能性を述べた。それらを基に、木造住宅の高断熱化と建築外装材との関係を乾式工法および湿式工法の両面から調査・検証し、雨水等の排水性を確保することが課題であることが判明した。更に既往の研究において、漆喰をはじめとした塗り壁材の変遷、塗り壁材によるシックハウス対策に関する研究、木造住宅における外壁の防水性・排水性に関する研究、並びに外張り断熱外装システムの防火性能に関する研究について述べ、本論文の位置づけと目的を下記のように捉えた。

- 1) ホタテ貝殻の焼成温度を下げ、その組成を大きく変化させないとともに、ホタテ貝殻粉末の製造コストを低減させた内装用塗り壁材の開発
- 2) 安価な非焼成のホタテ貝殻粉末を用いた外装既調合モルタルの開発
- 3) 円滑な壁内排水を行うためのホタテ貝殻粉末を用いた湿式外張り断熱外装システムの開発
- 4) EPS断熱材に壁内排水が可能な排水溝を形成する方法の開発
- 5) 本研究で開発した湿式外張り断熱外装システムにおける防火性能の向上

第2章では、本研究において最初の取り組みである焼成ホタテ貝殻を用いた内装用塗り壁材の開発について述べた。ホタテ貝殻の焼成温度と組成との関係を、非焼成貝殻および700°Cで焼成したホタテ貝殻双方の貝殻表面を電子顕微鏡で撮影したデータを基に、ホタテ貝殻が持つ炭酸カルシウムの組成を変化させることの無い温度で焼成することとした。更にホタテ貝殻粉末の製造工程は、標津町にある㈱ビッシェルの加工方法による製造方法を基本とし、最終粉砕後の貝殻粒度を2種類に限定した粉末を用いて開発することに至った経緯を述べた。そして、この2種類の焼成ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の配合計画を作成し、試験施工を繰り返した上で、適切な配合比の内装用塗り壁材を開発した。本章では、この開発した内装用塗り壁材の理化学特性について、抗カビ試験および不快臭除去試験を行い、優位性を示すデータが得られたことを述べた。

第3章では、ホタテ貝殻を用いた既調合外装モルタルの開発について述べた。第2章において採用したホタテ貝殻粉末は約400°Cの温度で焼成をしたものを粉砕加工して開発したが、製品の普及拡大を目指すためには製造コストを削減し、更には地球温暖化防止対策を図るために、非焼成貝殻を活用することが必須と考え、開発の経緯を述べた。

非焼成貝殻が発する不快臭など、多くのデメリットを克服する可能性を検討した中で、非焼成ホタテ貝殻粉末を既調合軽量モルタル骨材として利用することが最適と考えた。

本章における非焼成ホタテ貝殻粉末は、製造コストや物流コストを調査し、鹿部町の(株)北海道スカラップで製造した非焼成貝殻粉末を採用することとした。最初に非焼成貝殻粉末を用いた外装モルタルの調合計画と製造コストの検討を行い、次に木造住宅外壁面を下地とした施工方法の検討を行った。続いて下塗り材の配合計画と上塗り材の調合計画を作成、屋内および屋外において実際に試験施工を繰り返した。その後、施工性や耐久性の比較検討を行った結果、非焼成ホタテ貝殻粉末を配合した既調合外装モルタルは、施工後は不快臭が残ることなく、経年劣化などにおいても問題を発生することがなく、実用性の可能性が大きいことを確認した。

第4章では、湿式外張り断熱外装システムの開発について述べた。本章では、ドイツで普及している樹脂モルタルの技術を参考にしてホタテ貝殻粉末を用いた樹脂モルタルの開発を行った。施工方法としては、EPS断熱材に下塗り材として直接樹脂モルタルを塗布すると同時にガラス繊維メッシュを伏せ込み伸縮性に富んだ下地面を作ることに至った。その後、上塗り用樹脂モルタルを施工し、仕上げ塗りとして下塗りおよび上塗り合計塗り厚さは4~5mmを確保、更に耐候性や耐汚性を高めるためのシリコーン系塗料によるオーバーコート仕上げを施すことにより、ドイツの技術を応用したホタテ貝殻入り湿式外張り断熱外装システムを構築することに至った。この際、ホタテ貝殻入り湿式外張り断熱外装システムの耐久性能を確認するため、JIS A 1435-2013に基づく凍結融解試験を400サイクルまで行い、耐久性能実験室試験を行った。一方EPSに樹脂モルタルを直接仕上げとする工法は外装材と断熱材との間に通気層を設けることができないことから、通気層に代わる雨水の排水層を設ける必要があり、EPSの裏面に排水溝を設けた湿式外張り断熱外装システムの試験体を対象に、排水性・防水性実験を行った。その結果雨水が室内へ漏水することなく、EPS裏面に設けた排水層が有効であることを確認した。

第5章では、EPS断熱材に設ける排水溝形成手法の開発について述べた。第4章で開発したEPS裏面の排水溝は人力で製造したが、排水溝付きEPSを低コストで量産化するためには工場での生産ライン化が必須であり、高密度のEPSの特性を生かしたプレス加工方式による生産ラインの手法を開発した。更に排水性が損なわれることない溝寸法や量産化が可能である排水溝形状を検討し、その結果、直径60mm、高さ1.5mm、の

円柱形の突起を 72mm 間隔で配置製造することとした。この手法により製造した EPS 排水溝が、経年劣化した壁体の窓廻りや換気口廻りから暴風雨時に侵入した雨水を室内側に漏水することなく排出することを確認するため、JIS A 1414-3「建築用パネルの性能試験方法—第 3 部：温湿度・水分に対する試験」の「水密性試験」に準拠した実験室実験を行い、EPS 裏面排水層が有効であることの検証を行った。その結果、開口部廻りやビス穴からの侵入した雨水が室内側に漏水することはなく、EPS 裏面排水層から屋外側にスムーズに排水されることが明らかとなった。

第 6 章では湿式外張り断熱外装システムにおける防火性能の向上について述べた。木造住宅の外壁には 30 分防火認定を有する遮熱性と非損傷性が求められることから、本章では EPS を用いた湿式外張り断熱外装システムの防火性能を高める施工方法について述べた。湿式外張り断熱外装システムの場合、EPS 断熱材から燃焼が始まり落下消失することから、火災が発生して数分で外壁が脱落する懸念がある。本章では EPS が消失しても外装システムのガラス繊維メッシュ樹脂モルタルが脱落を遅らせるための施工方法の検討を行った。その結果、EPS の厚さが 150mm の場合、EPS が燃焼すると試験体の温度が急上昇したものの、消失直後に塗り壁外壁が脱落せず、30 分防火性能を有していることが明らかとなった。

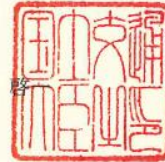
本章の結果に基づいて、国土交通大臣の防火認定を次項の通り取得した。

認 定 書

国住指第 4720 号
平成 28 年 12 月 26 日

あいもり株式会社
代表取締役 小松 幸雄 様
岩倉化学工業株式会社
代表取締役 原田 光弘 様

国土交通大臣 石井 啓



下記の構造方法等については、建築基準法第 68 条の 25 第 1 項（同法第 88 条第 1 項において準用する場合を含む。）の規定に基づき、同法第 2 条第八号並びに同法施行令第 108 条第一号及び第二号（外壁（耐力壁）：各 30 分間）の規定に適合するものであることを認める。

記

1. 認定番号
PC030BE-2301-1(1)
2. 認定をした構造方法等の名称
人造鉱物繊維断熱材充てん／耐アルカリ性ガラス繊維ネット混入ホタテ貝殻粉末塗材・ビーズ法ポリスチレンフォーム板・木質系ボード表張／せっこうボード裏張／木製軸組造外壁
3. 認定をした構造方法等の内容
別添の通り

（注意）この認定書は、大切に保存しておいてください。

7.2 ホタテ貝殻粉末の建材への利活用の展望

ホタテ貝殻粉末を用いた内装塗り壁材の施工事例を写真 7.1 に示す。白色の漆喰壁のような仕上げとなり、ホタテ貝殻粉末と消石灰を混入させた内装材には防カビ効果や不快臭除去効果を有していることから、典型的な石膏ボード+壁紙仕上げに比べて付加価値を有する内装仕上げが実現している。この結果、全国に販路が広がっており、今後もハイエンドの顧客向けに一定の需要が期待できると考えられる。



写真 7.1 ホタテ貝殻粉末を用いた内装塗り壁材の施工事例

次に、ホタテ貝殻を用いた樹脂モルタル仕上げを適用した湿式外張り断熱外装システムの施工事例を写真 7.2 に示す。白色の漆喰仕上げのようなデザインとなり、北海道や東北地方のみならず、中国地方での施工事例も存在する。本州では、窯業系サイディング仕上げに比べて在来湿式外装のニーズが高く、本外装システムが高く評価される傾向がある。なお、これまでの施工事例では、準防火地域に建築される木造住宅および長期優良住宅以外での施工であったが、第 4 章、第 5 章、および第 6 章で得られた知見に基づいて、これまで採用できなかった木造住宅に対しても本外装システムが採用可能となる。住宅の高断熱化は国家的な目標となっており、木構造の外側への断熱補強は、全国で需要増が期待できる。価格競争力があり壁厚増加が少ない湿式外張り断熱工法のアドバンテージは大きいと考えられる。



伊達市ゼロエネルギー実験住宅



伊達市一般住宅



青森県八戸高専実証住宅



山口県岩国市一般住宅

写真 7.2 ホタテ貝殻粉末を用いた湿式外張り断熱外装システムの施工事例（木造）

また、RC造建築物における湿式外張り断熱外装システムの施工事例を写真7.3に示す。3棟の全景と、バルコニー周りの外壁施工である。RC造建築物の場合、既存の外壁が防火構造であることから、断熱改修として本外装システムを適用しやすいことから、施工事例も多く存在する。道内の公共建築は、外断熱化が進んでおり、特に、乾式工法では施工が煩雑なバルコニー側の外壁では、採用例が増えている。



芽室町特別養護老人ホーム



北海道北見市営住宅末広団地



岩見沢市営住宅日の出団地



バルコニー側外壁施工例

写真7.3 ホタテ貝殻粉末を用いた湿式外張り断熱外装システムの施工事例（RC造）

7.3 今後の課題

7.3.1 建築分野におけるホタテ貝殻利用量の推定

前節に示すように、ホタテ貝殻粉末を用いた内外装材の施工事例をみると、広く普及するには至っていないものの、第4章、第5章、および第6章で得られた知見に基づいて、準防火地域に建築される木造住宅や長期優良住宅への適用も可能となり、普及拡大の可能性を有していると考えられる。

ここで、木造住宅の内装材、木造住宅の既調合外装モルタル、木造住宅の湿式外張り断熱外装システム、およびRC造の湿式外張り断熱外装システムのそれぞれにおけるホタテ貝殻の使用量を推定した。その結果を表7.1に示す。木造住宅におけるホタテ貝殻粉末を用いた内装塗り壁材の製品は1袋で20kgであり、そのうちホタテ貝殻粉末の質量は13kgである。塗厚3mmで施工面積が13m²となることから、1m²当たりのホタテ貝殻粉末の質量は1.0kg/m²となる。木造住宅におけるホタテ貝殻粉末を用いた既調合外装モルタルの製品は1袋で20kgであり、そのうちホタテ貝殻粉末の質量は下塗り材で9kg、上塗り材で8.5kgである。いずれも塗厚10mmで施工面積が1.5m²となることから、1m²当たりのホタテ貝殻粉末の質量は下塗り材で6.0kg/m²、上塗り材で5.7kg/m²、合計11.7kg/m²となる。木造住宅におけるホタテ貝殻粉末を用いた湿式外張り断熱外装システムの製品は1袋で20kgであり、そのうちホタテ貝殻粉末の質量は下塗り材で2kg、上塗り材で10kgである。いずれも塗厚2mmで施工面積が10m²となることから、1m²当たりのホタテ貝殻粉末の質量は下塗り材で0.2kg/m²、上塗り材で1.0kg/m²、合計1.2kg/m²となる。これら面積当たりのホタテ貝殻の質量から木造住宅1棟当たりの施工面積を200m²としてホタテ貝殻の使用量を算定すると、内装が200kg、外装モルタルが2,333kg、外張り断熱が240kgとなった。なお、RC造における外張り断熱外装システムの場合においては、面積あたりのホタテ貝殻の質量は木造住宅の場合と同様となるものの、1棟当たりの施工面積のばらつきが大きいことから、後述の年間当たりのホタテ貝殻使用量の推定で述べることにする。

表 7.1 ホタテ貝殻使用量の推定結果

構造種別	工種	面積あたりの ホタテ貝殻の 質量	施工面積	ホタテ貝殻 使用量
木造	内装	1.00 kg/m ²	200 m ² /棟	200 kg/棟
	外装モルタル	11.7 kg/m ²	200 m ² /棟	2,340kg/棟
	外張り断熱	1.2 kg/m ²	200 m ² /棟	240 kg/棟
RC造	外張り断熱	1.2 kg/m ²	—	—

次に、年間当たりのホタテ貝殻使用量について推定することとした。その推定結果を表 7.2 に示す。なお、木造住宅では新築を想定し、内装と外装の両方でホタテ貝殻粉末を用いた仕上げ材を用いることを想定した。想定年間棟数を 1,000 とすると、外装モルタルとした木造住宅では、年間 2,540 t のホタテ貝殻使用量と推定される。湿式外張り断熱外装システムとした木造住宅の場合では、年間 440 t のホタテ貝殻使用量と推定される。このような状況をみると、木造住宅の新築で積極的にホタテ貝殻を利用した場合、その使用量は 440~2,540t となり、平均でみた場合、1,490t の使用量となる。これに対し、RC 造における外張り断熱改修の場合をみると、北海道における外張り断熱改修の総施工面積は年間で 200,000 m²が見込まれ、その半数である 100,000 m²が湿式外張り断熱改修の施工面積であると想定すると、年間のホタテ貝殻使用量が 120t と推定される。これら木造住宅と RC 造の年間使用量を合計すると約 1,600 t となり、ホタテ貝殻における年間の発生量を 150,000 t とすると、建築分野でのホタテ貝殻の使用量は約 1.0%を占めることになる。

以上に示すように、建築分野において、積極的にホタテ貝殻を利用することを想定した場合、ホタテ貝殻発生量に対して年間使用量が約 1.0%を占めることがわかった。

表 7.2 年間ホタテ貝殻使用量の推定結果

構造種別	外装種別	想定年間棟数	施工面積	年間ホタテ貝殻使用量
木造	外装モルタル	1,000 棟	200,000 m ²	2,540 t
	外張り断熱	1,000 棟	200,000 m ²	440 t
RC 造	外張り断熱	—	100,000 m ²	120 t

7.3.2 ホタテ貝殻の付加価値と新たな商品開発

前節に示すように、建築分野において、積極的にホタテ貝殻を利用した場合、その使用量は年間発生量の約1.0%を占めるにとどまり、更なる利用拡大が必要である。また、近年の建設業界における左官職人の高齢化や技能工の減少を鑑みると、現場において熟練した職人でなければ施工することの出来ない工法は徐々に陰りを見せてきているのが現実である。これらの現状を考えると、現場で材料に水を入れミキシングなどを施す施工方式は今後、大きなマーケットを広げることは難しいとの見解を見出すことは否めない。これらを解決するためには、粉体をビニール袋で製品化するのではなく、工場内において、水を配合および攪拌し、練り上がったプレミックス製品として出荷をすることが求められる。プレミックスされた荷姿で製品化することにより、現場内において計量しながら水を入れる作業がなくなり、攪拌時の粉塵が発生することもなく、作業効率と共に現場環境の改善が図られる。熟練した左官工だけではなく、塗装工や内外装工でも扱える製品としての位置づけを築くことが出来れば、更なる利用拡大も現実となる。

更に、プレミックスでの製品開発が可能となれば、ホタテ貝殻の保持する特性に新たな付加価値が加わることとなり、技能工だけが扱うことができる建築材料ではなく、エンドユーザーがDIY感覚で簡単に施工することができる製品としての可能性がある。

現在では、ホームセンターおよび通信販売で、珪藻土壁材や漆喰壁材が練り上がった状態で誰でも簡単に購入することができる。プロ・アマチュアを問わずホームセンターなどでプレミックスされた材料を購入し、自宅などをDIYとしてリフォームしている。

廃棄されたホタテ貝殻の利活用を促進するためには、左官工だけが施工できる建築材料とするだけでは限界があり、一般の人々が簡単に手にいれることができ、簡単に施工することができるように製品化の改善をすることが今後の課題である。

7.3.3 むすびに

世界中には、人々を魅了してやまない建築物が多数存在し、毎年何千万人もの人々を呼び寄せ、多大な経済効果を生み出している。その源泉は、建築家に依頼したパトロンによって種が撒かれ、それを個性ある建築家が図面を起こし、数多くの職人が腕を競い合ってきた積み重ねではないかと思う。建築物を彩る材料や仕上げ材はその土地に見合った素材を使い、職人たちは地域に根付いた材料を駆使して後世に残る遺構をつくり上げてきた。その職人氣質が生み出した美しい造形に人々は心をうばわれ、幾度となく詣るのである。建築という有形・無形のエネルギーは無限の可能性を秘めている。

しかし、近年は大量生産や工期短縮が叫ばれ、途方もない利益追求を求めるがゆえに、建築材料は工場生産された既製品の集合体となり、手のかかる湿式工法は敬遠され、内外部の仕上げも乾式工法が主流となっている。更には、構造躯体から外部サッシ、屋根材や内外装材に至るまでフィリピンなどの専用工場で生産された部材をコンテナで日本へ運び、輸入したユニットを組み立てるだけの住宅が現れた。このように、日本国内

ではものづくりを一切していない住宅メーカーがトップシェアを取ることが許されても良いのであろうか。建築の方向性が問われる今、住宅など建築物を求める施主たちが国産材や地域材、ものづくりへの関心を持って希望の器づくりに邁進するよう、建築を志すものが一丸となって行動を起こしていかなければならない。一方では、大工や左官などの職人たちが安い賃金で雇われ、若い担い手は激減、技能工は自ずと高齢化している。今こそ我々建築に携わるものは、技能を持つ職人の待遇を改善し、若者を育成し、技能の伝承を支えていく役割を担わなければならない。

同様に毎年生み出されるホタテ貝殻の再利用は大きな問題である。養殖という栽培生産により、安定的な収入源を得た代償は、生産者がその責任を担わなければならない。しかしながら水産系廃棄物の再利用は、生産者自身が積極的行動を起こしてはいない。漁業者をはじめとした水産関係者の試行錯誤により、養殖技術の確立はできたが、一方では養殖残渣や汚泥によるホタテ貝生産地の海洋汚染が進んでいるのが実態であり、これらも大きな問題であることは明らかである。

SDGsの17の目標には「海の豊かさを守る」「つくる責任・つかう責任」「住み続けられるまちづくり」が掲げられており、持続可能社会を構築するためには、ホタテ貝殻生産者はもとより、北海道に生きるものとして廃棄された貝殻の利活用は避けて通れない課題である。これらの課題を後世に先送りすることがあってはならない。

水産系廃棄物の筆頭であるホタテ貝殻の利活用は、北海道や沿岸部の地域自治体をはじめとする官民が連携し、課題の解決へ向け一層の努力することが必要である。

私はこれからも建築というキャンパスを通して課題解決に向け更に新たな製品開発を続けていく所存である。



研究業績

【本学位論文に直接関わる論文】

- 1) 岸政美, 小松幸雄: ホタテ貝殻使用漆喰壁の理化学特性, 北海道工業大学研究紀要, 第 34 号, pp.97-100, 2006.3
- 2) 小松幸雄, 千葉隆弘, 福島明, 村田さやか, 高倉政寛, 遠藤卓: 湿式外張り断熱外装システムの防水性向上に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 85 巻, 第 767 号, pp.11-18, 2020.1
- 3) 小松幸雄, 千葉隆弘, 福島明, 高倉政寛, 糸毛治, 遠藤卓: 湿式外張り断熱工法における EPS 断熱材の裏面排水溝形成手法の開発, 日本建築学会技術報告集, 第 26 巻, 第 64 号, pp.990-994, 2020.10

【本学位論文に直接関わる国際会議論文】

- 1) Komatsu, Y., Chiba, T. and Fukushima, A.: The Method for Making Inside Drainage Groove on EPS with Stucco Finishing, Proceedings of 9th International Conference on Snow Engineering, アブストラクト査読通過, 2020.6 から 2022.6 に開催延期

謝辞

本論文は、筆者が北海道科学大学大学院博士課程工学研究科工学専攻に入学し、在籍している期間に諸先生の多大なるご指導とご援助を得ながら、約 20 年に渡り社会人として経済活動を続けながら進めてきた研究をまとめたものであります。

北海道科学大学工学部建築学科、千葉隆弘教授には、本論文を遂行するにあたり、幅広い見識を以って、終始、懇切丁寧にご指導ご鞭撻を頂戴しました。元北海道科学大学工学部建築学科教授、福島明博士には、筆者がホタテ貝殻利活用製品開発を始めた当初より、北方建築総合研究所の研究者として様々な試験方法のご提案など、公私ともに暖かいご指導並びにお力添えをいただくとともに、本論文におきましては、建築環境学をはじめ、研究テーマの設定から理論展開に至るまで熱いご指導を賜りました。お二人にはここに深く感謝申し上げます。また、副査としてご指導とご高閲を賜りました北海道科学大学工学部建築学科、川人洋志教授、谷口尚弘教授、北海道科学大学工学部都市環境学科、亀山修一教授に心から感謝申し上げます。

本論文は、北方建築総合研究所の存在無しには、なり得ませんでした。北方建築総合研究所との共同研究をはじめとし、多くのフィールド試験や実験室実験を重ねました。内外装塗り壁材や既調合外装モルタルの開発、湿式外張り断熱外装システムの開発において、糸毛治博士、村田さやか博士、谷口まどか博士、高倉政寛博士、遠藤卓氏には多くのご助言やご指導をいただきました。元北海道建設部建築企画監、須田敏則氏には北方建築総合研究所研究部長時代から貴重なご助言を賜り、湿式外張り断熱外装システムを大規模建築物採用へ向けて力強いご支援を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

また、岩倉化学工業株式会社の阿部泰之社長をはじめとする同社の多くの方々には、主に湿式外張り断熱外装システムの共同開発者として、たいへんお世話になりました。建築用ビーズ法ポリスチレン保温板を製造する道内唯一のメーカーとして、苫小牧市に本社・工場を構える同社とは、様々な情報交換や意見交換をさせていただきながら、木造およびRC造建築物の湿式外張り断熱外装システムの工法開発を一蓮托生で進めてきました。そして、岩倉化学工業株式会社には、同システムを施工した物件を北海道だけではなく、東北や北陸信越、更には西日本におけるマーケットを切り開いていただき、実験室実験で得られたデータだけではなく、実際の施工物件を基に実績を重ね、経年劣化を経て顕在化した問題点を改善することができたのも、同社のご尽力の賜物であります。岩倉化学工業株式会社役職員の皆様に感謝と敬意を表します。

第 4 章湿式外張り断熱外装システムの開発において、ドイツの Helmut Reichel 社の Helmut 社長やご子息の Florian 氏には貴重なノウハウを提供していただき、改めて感謝申し上げます。幾度も続いた訪独の際には家族のように接していただき旅の疲れを癒してくれました。また、ケルン在住の建築家小室大輔氏にはドイツにおける湿式外張り断熱外装システムの歴史からディテールまでを詳しくご指導いただきました。時にはツア

ーコーディネーターや通訳までを務めていただき、ここに深く感謝を申し上げます。

20年に渡る研究にお世話になった方々の中で、残念ながらご逝去された方もおられました。第2章ホタテ貝殻粉末を用いた内装用塗り壁材の開発の際、塗り壁材の理化学特性の実験を行っていただいた故・岸正美北海道工業大学教授には、理化学特性という筆者自身が知見の無いテーマを分かり易くご指導いただき、各種実験も行っていただきました。初めての経験であった大学との委託研究ということに対し、真摯にご対応・ご配慮をいただき、たいへん貴重な成果も残していただきました。

また、第3章ホタテ貝殻を用いた既調合外装モルタルの開発の際、既調合外装モルタル壁の施工方法を探るため、先行事例調査を島根県鹿足郡吉賀町柿木村において建築工務店を営む株式会社リンケンに訪問しました。当時の社長である故・田村浩一氏は突然の申し入れにも、建築中の物件をはじめ、竣工建物などを懇切丁寧に案内してくださいました。更に第4章湿式外張り断熱外装システムの開発において、ドイツでのミーティング時、ドイツ企業と日本企業のマッチングをコンサルタントするECOS社の故・ユリ子メームケン夫人には幾度も通訳として同席していただきました。ユリ子さんの真摯に対応する姿を忘れることはできません。故人となられました各氏に対しまして、在りし日を偲びながら、心からの御礼と論文の報告を申し上げたく存じます。

三十年前、伊達市北黄金町にあったぎょれん胆振工場新築工事の施工監督をした際、海岸沿いにうず高く山のようになっている貝殻の山を初めて見ました。ホタテ貝の貝柱を乾燥させて黄金色になった状態で製品化された乾燥ホタテ粒は中国やヨーロッパへも輸出され、まさにドル箱商品となっていきました。浮き沈みの激しい漁業従事者の所得は飛躍的に伸び、けっして豊かとは言えなかった暮らしは1年を通して安定的な生活をおくることのできるようになったのです。一方では、ホタテ貝殻の山は増えていくばかりでした。「これを何とかしなければならぬ」との問題意識に、自分には何ができるのか、思案を重ねていく中で、結論は建築材料として再生させることを考えました。

この二十数年、ホタテ貝殻利活用による建材開発と施工方法を研究する中で、私自身にとっての一番の財産は、様々な業界の方々との出会いと交流でありました。国籍も日本国内にとどまらず、ドイツ・中国・ベトナムなどにおいて多くの友人ができました。

内外装塗り壁材の販促活動で、日本全国津々浦々の建築工務店の社長や左官職人とも親しく懇談をすることができました。現場で実際に施工する職人の忌憚のない意見を聞くことにより、自ら開発した製品の長所・短所が明らかとなっていきました。少々大袈裟な言い方かもしれませんが、製品開発のヒントは現場にあることを実感しつつ歩んできた半生であったと思います。

最後に、仕事を続けながら本論文の作成に充てていた私に対して、温かく見守ってくれた妻や息子たち、そして会社の役職員一同に心より感謝を申し上げ謝辞と致します。

2021年 9月

小 松 幸 雄