

高強度土壁の持続可能性と構造性能に関する総合的研究 —現代建築への応用 ～ドイツ・フランスでの調査を通じて～

熊本大学：小倉花(M1) 宮元沙貴(M1) 吉村樹音(M1)

1. はじめに

■ 本視察の目的・背景

近年、環境負荷の低減や資源循環を重視した建築が求められる中で、土壁は優れた断熱性や湿度調整機能を有し、解体後も再利用が可能な**持続可能な建材**として再評価されている。特に、土木工事等で発生する廃土を建築材料として再利用できる点は、循環型社会の実現に貢献する重要な特性である。一方で、現代建築に適用するにあたっては、耐震性や耐久性、構造的性能の向上が課題となっている。日本において土壁は、主に木造構造と併用される形で用いられており、これは土壁利用を考える上での重要な前提条件である。しかし、土壁の高強度化を過度に追求すると、解体や土の分解が困難となり、地産地消や再利用が容易であるという本来の利点が損なわれる可能性がある。そのため、**構造的性能の向上と持続可能性を両立させる手法**の検討が求められている。

本視察は、ドイツおよびフランスにおける土壁技術を対象に、使用材料、施工方法、強度向上のための工夫などを調査し、高強度化と持続可能性を両立させるための知見を得ることを目的とする。これらの国際的な事例を日本の土壁技術と比較・分析することで、材料調合および施工技術の改良策を検討し、現代建築への応用可能性を探る。本視察を通じて、土壁が持つ環境性能と構造的特性、さらには文化的価値を最大限に活かし、日本における土壁利用の更なる拡大と、持続可能な建築手法の新たな方向性を提示することを目指す。

■ 調査スケジュール

訪問先については、当初フランスおよびドイツの二か国を選定していたが、専門家とのアポイントメントを得ることができたため、より多角的な知見を得ることを目的として、スイス、デンマークの二か国を追加した。その結果、**表1**に示す計四か国を訪問し、土壁建築の視察ならびに現地研究者とのディスカッションを実施した。各訪問先は、申請者本人および申請者らの指導教員がこれまでに交流を有する大学や企業の中から選定し、指導教員を交えたうえで事前に訪問申請を行った。



表1 調査スケジュール

日程	訪問先	訪問目的
10/31-11/1	ドイツ（フランクフルト、ダルムシュタット、ケルン）	土壁建築の視察
11/2-11/3	フランス（パリ）	ENSA-PVS 訪問、インタビュー
11/4	スイス（バーゼル）	土壁建築の視察
11/7-11/8	デンマーク（コペンハーゲン）	big 見学、建築の視察
11/9-11/12	ドイツ（ベルリン）	ベルリン工科大学訪問、土壁建築の視察

高強度土壁の持続可能性と構造性能に関する総合的研究 —現代建築への応用 ～ドイツ・フランスでの調査を通じて～

熊本大学：小倉花(M1) 宮元沙貴(M1) 吉村樹音(M1)

2. 各訪問先における調査内容

■ Alnatura Campus(ドイツ・ダルムシュタット) 視察



写真1 正面ファサード



写真2 表面



写真3 ファサード

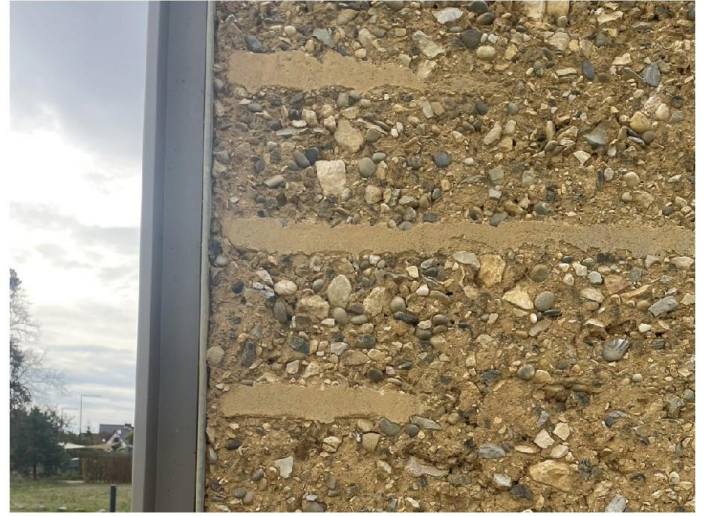


写真4 端部目地

ドイツ最大の**版築建築**。仕上げ材としての土壁の利用だった。あくまで環境へのアプローチとして土壁の採用。構造としては木フレームによる構造形式だった。骨材は大きいもので2,3cm程度だった後の Ricola herb center でもでてくるが、**端部**には日本で見ない**コンクリート**でできた**目地**があった。理由としては曲げ負担と乾燥収縮が大きいことが原因として考えられる。現代版の土壁建築への応用の一つだと感じた。

高強度土壁の持続可能性と構造性能に関する総合的研究 —現代建築への応用 ～ドイツ・フランスでの調査を通じて～

熊本大学：小倉花(M1) 宮元沙貴(M1) 吉村樹音(M1)

■ 聖コロンバ教会ケルン大司教区美術館（ドイツ・ケルン）視察



写真5 ファサード

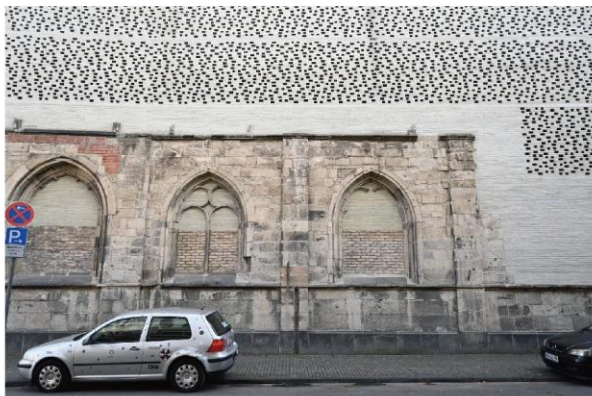


写真6 道路側ファサード

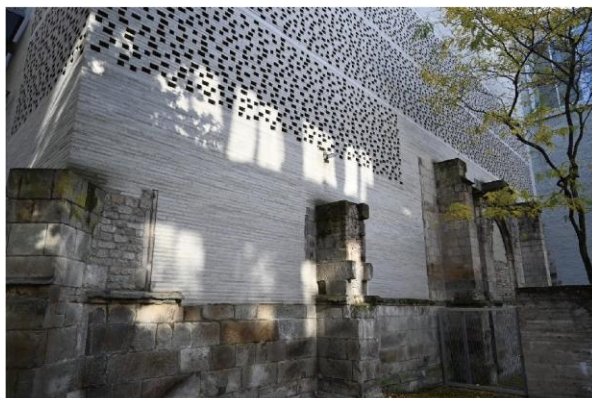


写真7 遺構と現代建築がつながる



写真8 グラデーション

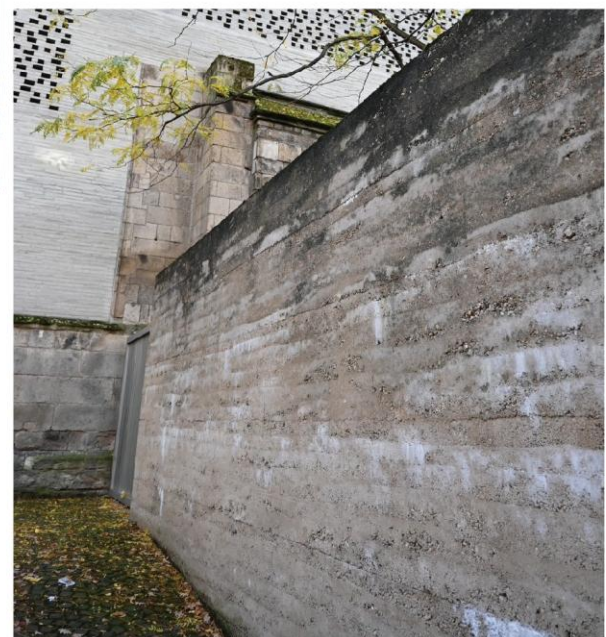


写真9 周囲の版築

ピーターズンドーによる教会＋美術館機能を持つ複合建築。教会跡地に建てられた建築でその遺構を壊さずに、重ねていく形で建築された。現代建築と歴史的遺構を混ぜ合わせグラデーションしていく様子が今までに見たことのない美しさを生み出していた。構造としてはRC+レンガの構造形式だった。なかでもレンガ（焼成土）は一部耐力壁、一部仕上げ材として機能しているとのことだった。そこにはレンガでしか生み出せない光の内部空間が広がっていた。また周辺には版築とみられる壁が何か所かで見られた。触ってみた所、だいぶ固いもので、固化材が多く入っているのではないかと考えられる。

高強度土壁の持続可能性と構造性能に関する総合的研究 —現代建築への応用 ～ドイツ・フランスでの調査を通じて～

熊本大学：小倉花(M1) 宮元沙貴(M1) 吉村樹音(M1)

■ ENSA-PVS 建築パリ・ヴァル・ド・セーヌ国立高校（フランス・パリ）訪問

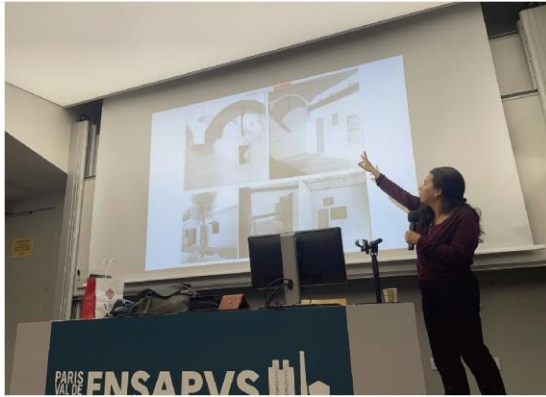


写真 10 レクチャーの様子



写真 13 Nadya 先生(左)と吉村(右)



写真 11 アーカイブ施設



写真 12 QR コードの貼られた見本品



写真 14 Nadya 先生設計の版築建築

パリにある建築の大学で Nadya 先生による土に関するレクチャーを受けることができた。ヨーロッパでは現在、日干しレンガ、版築が主な土構造であることが確認できた。また、現在は構造体としての利用はほとんどないことがインタビューにより分かった。また土壁を利用した建築は施工コストが高くなかなか普及が進んでいない事実もあった。ただし、モロッコのような人件費が安価な地域では多くの土壁建築が施工されているとのことだった。そして大学内には土のアーカイブ施設があった。見本品には QR コードが貼られており、そこから材料調合の割合や、素材、色を分かりやすくまとめてあり日本でもこういった施設は重要であると感じた。

高強度土壁の持続可能性と構造性能に関する総合的研究 —現代建築への応用 ～ドイツ・フランスでの調査を通じて～

熊本大学：小倉花(M1) 宮元沙貴(M1) 吉村樹音(M1)

■ Ricola herb center(スイス・バーゼル)視察



写真 15 ファサード



写真 16 表面



写真 17 端部と目地



写真 18 周辺の版築

ヘルツォーク&ド・ムーロンによる**版築**の建築物。インターネット上の調査では版築が構造体なのかと思っていたが、実際に行くと仕上げ材としての機能にとどまっていた。骨材はトンネル工事などの掘削土から持ってきており、大きさに明確な決まりはないと考えられる。また**目地**がここでも見ることができた。一層の幅は約 30cm あり、今まで見た版築で最も大きいものだった。また周辺でも版築を利用した仕上げが多々見られ、環境への意識が見られた。

高強度土壁の持続可能性と構造性能に関する総合的研究 —現代建築への応用 ～ドイツ・フランスでの調査を通じて～

熊本大学：小倉花(M1) 宮元沙貴(M1) 吉村樹音(M1)

■ TU Berlin ベルリン工科大学(ドイツ・ベルリン)訪問



写真 19 土壁モックアップ

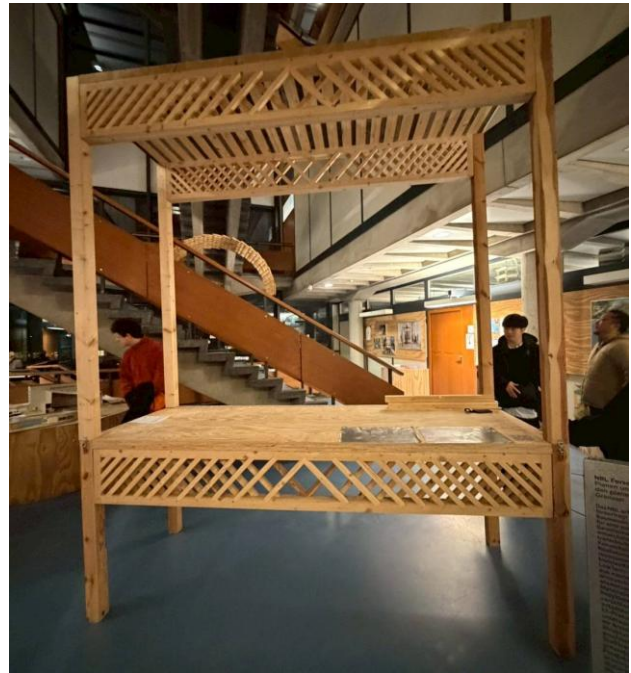


写真 20 純木造モックアップ



写真 21 アンドレア先生との記念写真



写真 22 レクチャーの様子

ベルリン工科大学は、ドイツの首都ベルリン西部のシャルロッテンブルク地区に位置する工科大学である。同大学において、カールスルーエ工科大学のアンドレア先生と面会し、土壁を含む循環型建築に関する意見交換およびディスカッションを行い、関連する技術や研究動向について多くの知見を得た。

日本の木造建築が現在も数多く残っていることから分かるように、自然素材で作られた建築は長い時間を経ても存続しやすい。一方で、近年の高度なテクノロジーを多用した建築は維持や修繕に手間がかかり、寿命も 20～30 年程度と比較的短い場合が多い。そのため、建築においては

高強度土壁の持続可能性と構造性能に関する総合的研究 —現代建築への応用 ～ドイツ・フランスでの調査を通じて～

熊本大学：小倉花(M1) 宮元沙貴(M1) 吉村樹音(M1)

使用するテクノロジーをできる限り最小限に抑え、素材の再利用や自然素材の活用を積極的に行うことが重要である、という考えが示された。

最初に紹介されたのは、再利用木材、ウッドファイバー、土を組み合わせた壁のモックアップである（※写真 19）。使用されている土は、性質の非常に似た 2 種類の土を混合したもので、水分や湿気に対して強い特性を持っている。この壁は、再利用木材の間に空気層を設けた構造となっており、土を含むことで高い耐湿性を持つ。特に日本を含む夏季に高温多湿となる地域では、この土の層が建築の主要構造や設備を暑さから保護する役割を果たすという。なお、外壁については降雨の影響を受けるため、土のみで構成することは現時点では難しいとされている。耐火性能については現在も多くの研究が進められており、実用化の目処は近い段階にあるとのことであった。

次に、アースプラスターについて説明があった。ドイツにはアースプラスターを製造する工場が存在し、日本の漆喰とは異なる点が特徴である。日本の漆喰にはライムや石膏などが含まれるのに対し、アースプラスターは土のみで構成されている。その最大の利点は、水を加えることで**再び使用可能**になる点である。他の材料を含む場合は再利用の際に再焼成が必要となり、多くのエネルギーを消費するが、アースプラスターはその必要がない。この手軽さから、大学では学生がレクリエーションとして制作することもあるという。

さらに、ドイツには土を用いた構造壁の建築が存在し、ヨーロッパにおける新たなスタンダードとしては**アースブロック**が注目されている。アースブロックはレンガとは異なり、**焼成せず乾燥**によって製作される。主な材料は泥、砂、場合によってはシルトであり、4～5 階建て程度の建築が可能である。現在のところ、土構造の中ではアースブロックが最も**高い強度**を持つとされている。版築構造も存在するが、現段階ではアースブロックの方がより高層の建築に適しており、壁厚も版築に比べて**薄く**抑えることができる。

また、土ではないが、再利用木材を使用した建設中の純木造建築についても紹介があった（※写真 20）。この建築では約 12m のスパンを飛ばしており、その梁部分にはどうしても短くなってしまう**再利用木材**を活用している。モーメントが大きくなる部分では梁の密度を高めるなどの工夫を行い、大スパン建築においても可能な限り再利用木材を用いる試みがなされていた。

さらに、エジプトの建築事例から得られている知見として、コンクリートは暑い時期に熱を溜めやすいのに対し、土を用いた建築は夏は涼しく、冬は暖かいという特性があることが紹介された。これは土が持つ吸湿・調湿機能により、室内の温度と湿度が安定するためである。

今回のディスカッションを通して特に印象的であったのは、ヨーロッパの大学における教育環境である。建築における土や自然素材に関する講義やレクリエーションが多く、学生がそれらに触れる機会が非常に多い。そのため、自然素材を建築に積極的に取り入れていこうとする意識が全体として根付いていると感じた。実際に、私たちが訪問する 2 週間前にも、大学で土による構造建築の展示が行われており、他大学から来た学生も交えて解体を行い、その土を再び別の用途に活用するというレクリエーションが実施されていたという。これらの取り組みは、日本の大学においても大いに参考にすべき点であると強く感じた。

高強度土壁の持続可能性と構造性能に関する総合的研究 —現代建築への応用 ～ドイツ・フランスでの調査を通じて～

熊本大学：小倉花(M1) 宮元沙貴(M1) 吉村樹音(M1)

3. まとめ

本調査では、ドイツおよびフランスを中心としたヨーロッパにおける土壁技術の活用状況を調査し、日本における今後の発展に向けた知見を得ることを目的とした。本調査において、以下に示す知見が得られた。

- ▶ ヨーロッパの現代建築において、土は環境負荷の低い材料として評価されているが、土の利用は主に仕上げ材に限定され、構造体としての採用例は少ない
- ▶ 多くの建築では、構造は木造やRC造が担い、土は調湿性・断熱性などの環境性能を補完する役割を果たしている
- ▶ 乾燥収縮や曲げ負担への対策として、版築の端部に目地の設置や材料調合の工夫など、現代建築に適応させるための技術的配慮が行われている
- ▶ 一方でアースブロックや再利用木材と土を組み合わせた壁など、持続可能性と一定の構造性能を両立させる新たな試みも数多く進められている
- ▶ 教育・研究機関では、土や自然素材を扱う講義やレクレーション、QRコードを利用した材料アーカイブの整備が進められており土を循環可能な建築材料として捉える意識が、教育・研究の場を中心に広く共有されている。これらの取り組みは、今後の日本の土壁建築の発展において重要な基盤となると考えられる。

4. 謝辞

本調査研究を実施するにあたり、海外においてこれほど有意義な調査・研究を行うことができたのは、本研究を特別研究テーマとして採択し、助成金をご支援くださった前田工学記念財団の皆様のおかげです。渡航までの過程において、申請内容の変更等により多大なご迷惑をおかけしましたが、その都度親身にご対応いただき、多くのご支援を賜りましたことに、心より感謝申し上げます。また、このような貴重な経験の機会を与えていただいたことに、深く御礼申し上げます。

加えて、本調査に際し、訪問を快諾してくださった各国の大学・研究機関の先生方ならびに企業の皆様にも、心より感謝申し上げます。現地での視察や意見交換を通じて得られた知見は、今後の研究活動において非常に貴重なものとなりました。本調査で得た経験と学びを、今後の研究および技術の発展に必ず活かすべく、引き続き研究に精進してまいります。

We would like to express our sincere gratitude to the professors of universities and research institutions, as well as to the representatives of companies in each country, who kindly agreed to our visits. The knowledge gained through on-site observations and discussions has been extremely valuable for our future research activities. We are committed to making full use of the experiences and insights obtained from this survey in our ongoing research and in the further development of related technologies.

高強度土壁の持続可能性と構造性能に関する総合的研究 —現代建築への応用 ～ドイツ・フランスでの調査を通じて～

熊本大学：小倉花(M1) 宮元沙貴(M1) 吉村樹音(M1)

5. その他の活動

■ 建築事務所 big 見学（デンマーク・コペンハーゲン）



写真 19 big



写真 20 big 1F

世界的建築家ビャルケ・インゲルスが率いる建築集団 big の事務所見学をしてきた。1F は撮影可能で多くのこれまでの模型や今年開催されたヴェネツィアビエンナーレのモックアップが飾られていた。2, 3F では写真撮影は禁止となっていたが、未発表の作品も観ることができるのは非常に驚きだった。またそこには同年代の日本人インターン生が所属しており、多くの刺激を頂けた

■ コペンハーゲン建築見学（デンマーク・コペンハーゲン）

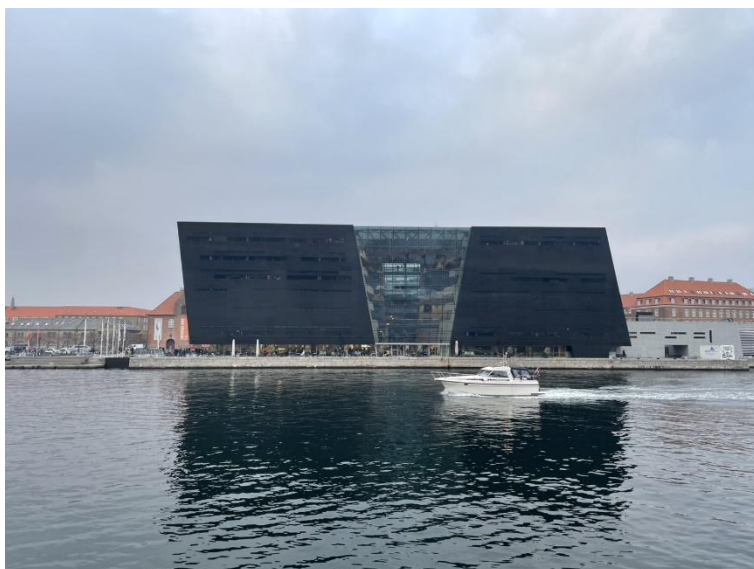


写真 21 デンマーク王立図書館



写真 22 カクタスタワーズ

ブラックダイヤモンドと呼ばれるデンマーク王立図書館や big 設計のカクタスタワーズを見てきた。前者は遠めからみると日本の中之島美術館を彷彿させるファサードだったが、近くで見るとその素材の違いは明らかなものでデンマークの町でも一際目立っていた。また後者は日本では見られないような新しいデザインで、なにか私たちの創造性に刺激をくれたように感じる。

高強度土壁の持続可能性と構造性能に関する総合的研究 —現代建築への応用 ～ドイツ・フランスでの調査を通じて～

熊本大学：小倉花(M1) 宮元沙貴(M1) 吉村樹音(M1)

■ ベルリン建築見学(ドイツ・ベルリン)



写真 22

新国立ギャラリー



写真 23

DZ Bank

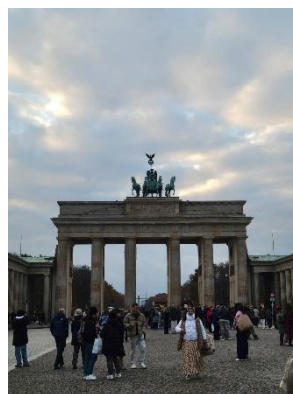


写真 24

ブランデンブルク門

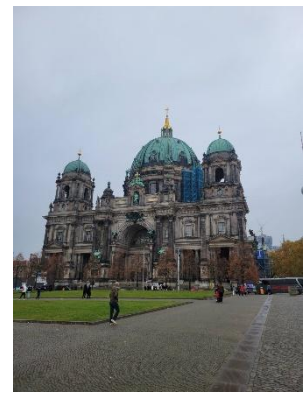


写真 25

ベルリン大聖堂



写真 26

国会議事堂



写真 27

国会議事堂ガラスドーム



写真 28

クナイペでの食事



写真 29, 30

(上) クリスマスマーケット

(下) 食事の様子

ベルリン工科大学でのレクチャーの前後には、ベルリン市内の代表的な建築を実際に見学した。ベルリンの建築は、歴史的建築を保存しながら新しい建築と融合させている事例が多く、都市全体として時間の積層を感じさせる印象を受けた。なかでもベルリン大聖堂は、日本では見ることのできないスケールの大空間の中に、精緻な彫刻が数多く施されており、メンバー一同大きな感銘を受けた。また、11月の渡航であったため本場のクリスマスマーケットも体験することができ、建築だけでなく、ベルリンの都市文化や人々の暮らしを身近に感じられる貴重な経験となった。