公開資料

国際科学技術共同研究推進事業
地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）

研究領域「開発途上国のニーズを踏まえた防災に関する研究」

研究課題名「ブータンにおける組積造建築の地震リスク評価と減災技術の開発」

採択年度：平成２８年度/研究期間：６年/相手国名：ブータン

終 了 報 告 書

国際共同研究期間*1
２０１７年4月２７日から２０２３年4月２６日まで

JST 側研究期間*2
２０１６年6月１日から２０２３年3月３１日まで
（正式契約移行日　２０１７年4月１日）

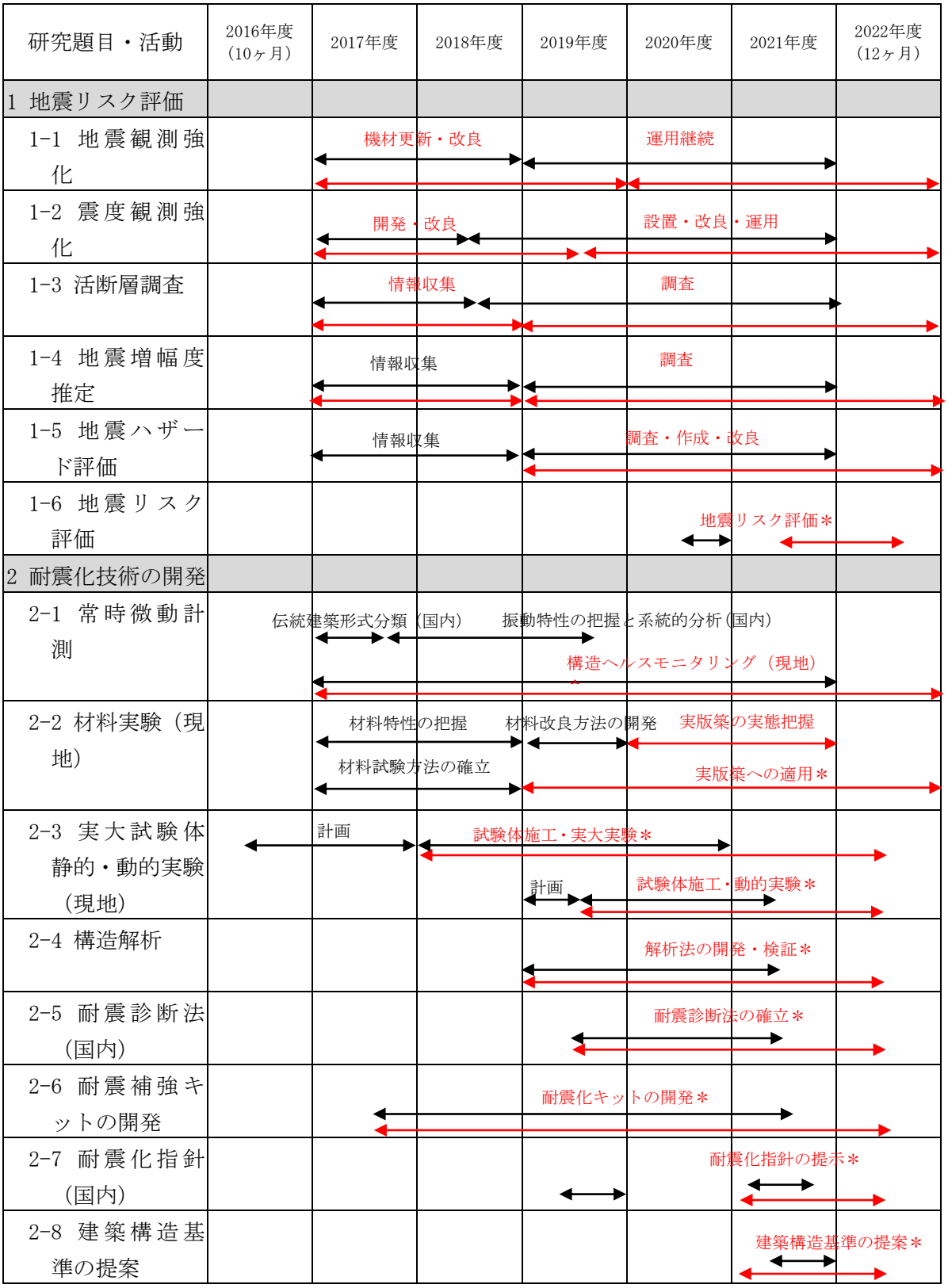
*1 R/D に基づいた協力期間（JICA ナレッジサイト等参照）
*2 開始日=暫定契約開始日、終了日=JST との正式契約に定めた該年度末

研究代表者： 青木　孝義
名古屋市立大学・教授

Ⅰ．国際共同研究の内容（公開）

１．当初の研究計画に対する進捗状況

(1)研究の主なスケジュール(実績)



3 耐震化技術の普及							
3-1 実施体制の確立		実施体制の確立				実施体制の確立＊	
3-2 教材・普及プログラムの開発		資料収集、教材・普及プログラム開発（国内・現地）＊					
3-3 指導者教育（現地）				講習実施（現地）＊		講習実施（現地）＊	
3-4 技術者・施工者教育（現地）						講習実施（現地）＊	
3-5 住民教育（現地）						講習実施（現地）＊	

＊：新型コロナウィルスによる渡航制限で遅れることになった。
：研究題目・活動：１ 地震リスク評価の見直し・適正化
（1-3 地震増幅度マップの作成→活断層調査、1-4 ハザードマップの作成→地震増幅度推定、1-5 構造物の脆弱性評価→地震ハザード評価）

(2)中間評価での指摘事項への対応

・この課題の難しいところは、一方では組積造建築を主体とする美しいブータン集落の保存、他方ではそれ故に脆弱で耐震性に劣ることから地震災害を受けやすいという２面性である。こうした文化面と生活実用面を両立させるには、どのような方策が必要かをブータン側に常に問いかける必要があるのではなかろうか。ブータン側の考え方を取り入れつつ研究開発成果の社会実装を目指していただきたい。

ブータン側と議論を重ね、伝統的民家の 9 割を占める平面プラン 3 種類を対象に、生活実用面から必要とされる平面プランと耐震性の面から必要とされる壁量を検討し、仕様規定と構造検討が必要な場合分けを行い、それに従ってガイドラインの作成を実施している。

・今回の研究開発成果を受けブータン国内の民間建築の耐震化が進展するのか、疑問の余地がある。現状想定しているリスクマップのレベルでは開発した耐震化技術と統合し、社会実装の道筋をつけることさえも、困難ではなかろうか。むしろ、DoC が政策とするであろう文化遺産の保護を重視し、たとえば「このエリアのこの建築物だけは文化遺産として残しておく。そのための耐震化は国費で賄う」といった意思決定ができる道筋をつけることを目指した方がよいと思われる。これにより、成果としては小さいが確実な成功事例を出すことが持続性の面でも有用かもしれない。

ブータン側と議論を重ねてきたが、民間の建物の耐震化に対する費用を国費で賄うといった意思決定ができる道筋を付けることはできなかった。ブータン南西部の M7.8 シナリオ地震によるパイロットサイトの強震動マップ（Essuna では 0.64G～0.70G、Ura では 0.12G）とリスクマップに基づき、新築の場合には推奨する伝統的民家の構造種別を示すことを考えている。

・研究開発成果を相手側の政策に反映するには時間が必要であるため、プロジェクト終了後も継続して研究活動が実施できる体制を整えておく必要がある。相手側のリーダーを育成することも重要であるが、それと同時に、日本の民間企業などのリソースを活用し易い仕組みにしておくなど、工夫の余地が残されているのではなかろうか。

プロジェクト終了後も継続して研究活動が実施できる体制を整えておくため、カウンターパート機関からの JICA 技術協力の支援の要請を行っている。また、重複申請の制限で応募ができなかった科研費は来年度申請する予定で、今年度は財団への応募を行った。

・メインの補強方法となる金網メッシュ＋モルタルセメントについては、厚さが 20cm と薄く、その品質が作業員（施工者）の力量に大きく左右される。補強技術の仕様だけを規定するのではなく、施工法についても詳細に記述し複数の管理項目を設けることが必須であろう。

施工方法については、F 型モックアップを用いた耐震化工法の施工を説明するホームページを作成し、ハンズオン研修の教材として使用することを考えている。また、技術者の施工時の動きをキャプチャした教師モデルを表示して、その動きをさまざまな角度から任意の速度で繰り返し観て、その動きを真似て習得するといったような体験等、VR ならではのインタラクティブ訓練システムのデザイン・実装を検討している。

・現地の土を使用したマッドセメントをあきらめ、モルタルセメントを採用したとのことだが、相手国の文化的景観に重要な素地の色合いを損なうモルタルセメントでよいのか、相手側と良く話し合って欲しい。街並みの色合いを再現するのにより好適なマッドセメントについて、技術の実用可能性や評価をさらに詰める余地があると思われ、それこそが、技術で課題を解決し、技術で現地ニーズを満足させることにつながるのではなかろうか。

現地の土を使用したマッドセメントでは、強度に問題があったため、補強としてはセメントモルタルを採用した。その上に仕上げとして、マッドモルタル、漆喰や白ペイントを塗ることで文化的景観を保つ。

・補強方法の金網メッシュ＋モルタルセメントの施工費用は単位面積あたりの金額として是非算出しておいてほしい。建造物のサイズにより金額が変わりうるため、普及の道筋をたてる方針が大きく変わることも予想される。

2022 年における単位壁面積当たりの施工費用は、材料費 334.09Nu、人件費 26.34Nu、計 360.43Nu である。これを建築面積に換算すると、単位建築面積当たりの材料費は約 1670Nu、人件費は約 130Nu、計約 1800Nu である。

(3)プロジェクト開始時の構想からの変更点(該当する場合)

・該当なし。

2．プロジェクト成果目標の達成状況とインパクト（公開）

(1) プロジェクト全体

・成果目標の達成状況とインパクト等

2019 年度末から 2022 年度前半は新型コロナウィルスのパンデミックによる移動制限の影響があったが、2016 年度に策定した 2017 年度以降の地震リスク評価、耐震化技術の開発・普及に関する実施計画に基づき、研究題目 1 「地震リスク評価」（研究グループ A 地震ハザード評価、研究グループ B 地震リスク評価）、研究題目 2「耐震化技術の開発」（研究グループ C 耐震化技術の開発）、研究課題 3 「耐震化技術の普及」（研究グループ D 耐震化技術の普及）の各研究課題、研究グループの活動を実施した。成果目標の達成状況は、図 1-1 に示すとおりである。

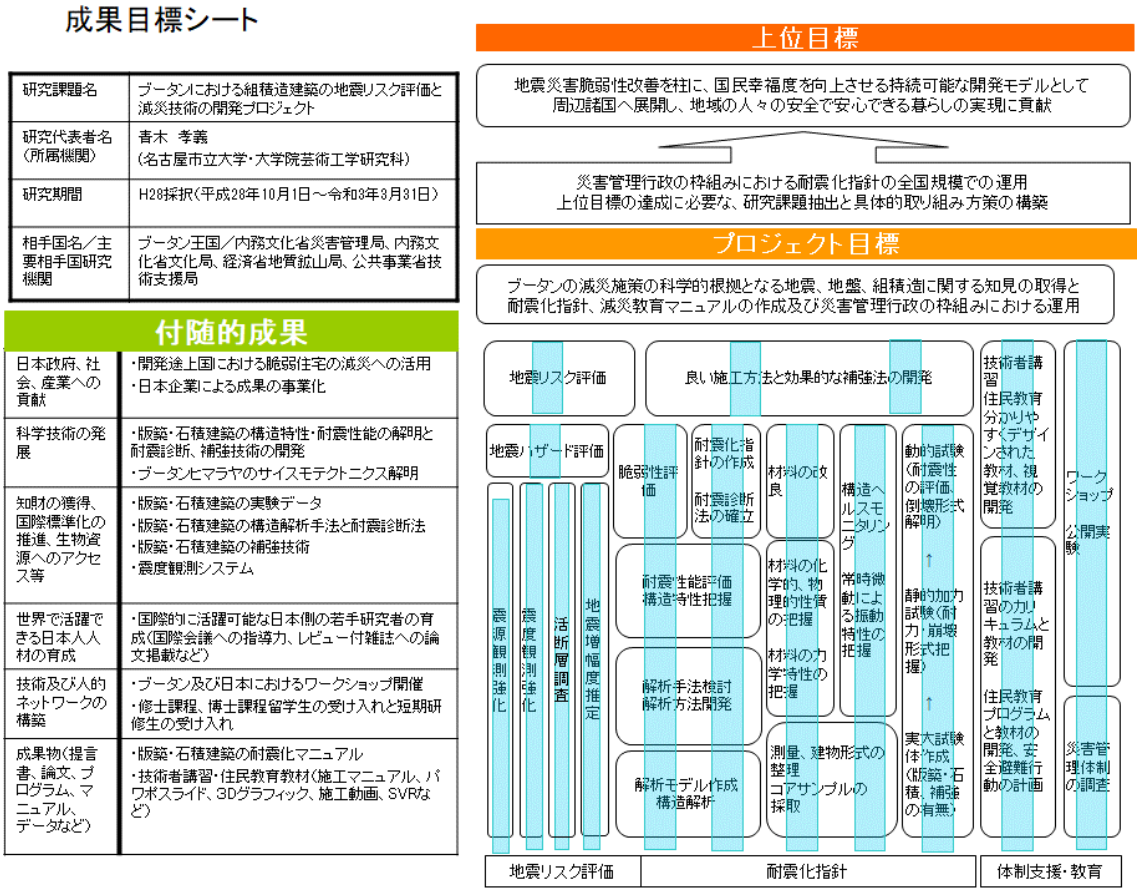


図 1-1：成果目標の達成状況

・プロジェクト全体のねらい

ブータンでは、首都をはじめとする一部の市街地で地上 5 階までを上限とする鉄筋コンクリート建築と 2 階建てまでの煉瓦建築がみられる以外、ほとんどの民家と公共施設が版築あるいは割り石積みで工学的なバックグラウンドのない（ノンエンジニアド）人々によって建てられている。こういった伝統建築は地震に弱く、過去には、ブータン東部（2009 年 9 月 21 日 M6.1）とインドーネパール国境地域（2011 年 9 月 18 日 M6.9）で発生した地震により、国内の多くの版築・石積建築が倒壊・半壊した。本プロジェクトは、版築・石積建築の耐震性能評価法を開発し、実大試験体を用いた静的実験と縮小試験体の動的実験で検証する一方、新築および既存建物の耐震化に有効な補強方法や模範となる施工方法を確立し、併せて実施する地震ハザード評価の結果を加味した耐震化指針をまとめる。また、技術者・施工者講習によって指針を普及させ、住民教育により建物挙

動と地域危険度に基づく避難行動を周知するなど、実効的な地震災害管理の枠組み作りを支援する。加えて、伝統建築の耐震性能向上を普及できる国内外の人材育成と起業支援を行い、地震に強い国づくりに協力し、将来的には、本プロジェクトで作成した耐震化指針をベースとして、社会的、工学的実態に合わせて、インドの建築基準を輸入するしかない現状を改定し、ブータン国民幸福度指標に地震災害に対する住民の安全確保を具体的に反映させ、災害脆弱性克服開発モデルとして他の国々にも寄与することを目指す。

・地球規模課題解決に資する重要性、科学技術・学術上の独創性・新規性

地震による世界中の人的被害の殆どは開発途上国における土や石を建築材料とした脆弱な住宅の崩壊によって発生しており、その対策は地球規模での最重要課題である。本プロジェクトでは、版築・石積建築の耐震性能評価法を開発し、実大試験体を用いた静的実験と縮小試験体を用いた動的実験で検証する一方、新築および既存建物の耐震化に有効な補強方法や模範となる施工方法を確立する。地震ハザード評価の結果を加味し、わかりやすい耐震化指針にまとめる。技術者・施工者講習で指針の確実な普及を担保し、住民教育では建物挙動と地域危険度に基づく安全避難行動を周知し、指針を軸にした実効的な地震災害管理行政の枠組み作りを支援する。伝統建築の耐震性能向上を普及し、地震に強い国づくりに貢献できる国内外の人材育成と、起業支援を行う。これが、本プロジェクトの科学技術・学術上の独創性・新規性である。

・研究運営体制、日本人人材の育成(若手、グローバル化対応)、人的支援の構築(留学生、研修、若手の育成)等

日本側は、名古屋市立大学を中心とした研究運営体制の構築を行った。名古屋市立大学では 2017 年 4 月に、ブータンの隣国であり組積造の専門家である博士学位を有するネパール人特任助教を採用して研究の推進を図った。ガイドライン、ToT や住民教育の重要性が高まったプロジェクトの後半 2020 年 3 月に、ブータン王国内務文化省文化局（DoC）での 8 年間にわたる勤務経験のある日本人建築家を特任助教として採用し、社会実装の推進を図っている。日本大学では日本人 PD 研究員を採用し、研究運営体制の強化を行った。2018 年度に、日本大学で採用した PD 研究員が、プロジェクト 2 年目に日本大学理工学部の助手（現在、ものつくり大学助教）になったため、新たに韓国人 PD 研究員を採用し、研究運営体制の強化を行った。一方ブータン側各局は、人事異動に伴い本プロジェクト実施体制の再構築を行った。内務文化省災害管理局（DDM）は情報通信省から異動してきた新局長が転出になり、GIS を専門とした新プロジェクトマネージャが着任したが、再び転出になり空席のままである。経済省地質鉱山局（DGM）は 1 名のリーダー的職員が異動したが、1 名の新人職員が入省し 2 名技術スタッフを採用し計 6 名の実施体制となった。内務文化省文化局（DoC）は、1 名の新人職員が入省し計 4 名体制となっている。公共事業省技術支援局（DES）に変化はなく、計 3 名体制である。名古屋市立大学と香川大学においては、大学院生、学部生向けのプロジェクト説明会を実施し、学生にプロジェクトへ積極的に参画してもらうことで、プロジェクトを通した人材育成を計画した。説明会の結果、本研究プロジェクトに興味を持った学生が、それぞれの教員の研究室の学生となり、名古屋市立大学の学生は 2016 年度名古屋市立大学芸術工学部建築都市デザイン学科論文賞「ブータン王国版築造建築物の耐震性能向上に関する研究」に引き続き、2017 年度は名古屋市立大学芸術工学部産業イノベーション学科作品賞「ブータンの版築造における施工工程のマニュアル」を受賞している。また、荒巻氏は、「セメントの添加による版築の強度向上に関する検討」で 2018 年度セメント技術大会優秀講演者賞を受賞している。香川大学の大学院生は、在学中の 2019 年に 2019 年度日本建築学会大会（北陸）学術講演会に論文を投稿して発表して若手優秀発表賞を受賞し、修了後の 2021 年に 2021 年度日本建築学会大会（東海）学術講演会に論文を投稿して発表して若手優秀発表賞を受賞している。また、名古屋市立大学の大学院生がインターンシップを活用し、DDM

の遠隔指導により減災教育用 VR（新規バージョン）の開発を進めている。

2018 年 1 月に、DoC のスタッフ 2 名を日本に出張させ、研究打合せを行うとともに供与機材の使用方法、メンテナンスのトレーニング、歴史的建造物の保存活用に関する研修を実施した。2018 年 2 月に、経済省地質鉱山局(DGM)のスタッフ 2 名を日本に出張させ、研究打合せを行うとともに、微動観測の講義・実習を行った。2019 年 11 月に、DDM、DoC、公共事業省技術支援局(DES)のスタッフ各 1 名計 3 名を日本に出張させ、名古屋市港防災センターにて防災体験ツアーに参加してもらうことで、防災教育のあり方に関する研修を実施した。また、歴史的建造物の保存活用に関する研修を実施するとともに、研究打合せを行った。2019 年 2 月に、DGM のスタッフ 1 名を日本に出張させ、活断層マッピングの実習を行っている。2023 年 1 月に、DDM、DoC、DES のスタッフ各 1 名計 3 名を日本に出張させ、名古屋市港防災センターにて防災体験ツアーに参加してもらうことで、防災教育のあり方に関する研修を実施した。また、歴史的建造物の保存活用に関する研修を実施するとともに、名古屋市立大学で VR 教材の打合せを行った。

SATREPS 枠の国費留学生として、2017 年 9 月に DoC から 1 名を外国人研究生として受け入れ、これまでの研究成果をまとめた国際雑誌論文の執筆指導を行った。2018 年 4 月に博士後期課程学生として受け入れ、実験や解析に関する研究指導を行い、本プロジェクトを通して博士学位を 2021 年 3 月に取得した。

DoC のカウンターパート 1 名が、2019 年 9 月から JICA 課題別研修「地震学・耐震工学・津波防災」に参加開始、筑波の建築研究所等で 1 年間研修し必要単位を取得し修士論文の審査後、政策研究大学院大学から修士号（防災政策）が 2020 年 9 月に授与された。DGM のカウンターパート 1 名が、2020 年 10 月から JICA 課題別研修「地震学・耐震工学・津波防災」に参加し、建築研究所で 1 年間研修し、DES のカウンターパート 1 名が同研修に参加し、建築研究所と香川大学・名古屋市立大学で 1 年間研修し必要単位を取得し修士論文の審査後、政策研究大学院大学から修士号（防災政策）が 2021 年 9 月に授与された。DoC のカウンターパート 1 名が、2021 年 9 月から同研修に参加し、筑波の建築研究所と香川大学で 1 年間研修し必要単位を取得し修士論文の審査後、政策研究大学院大学から修士号（防災政策）が 2022 年 9 月に授与された。現在、DES のカウンターパート 1 名が、2022 年 9 月から同研修に参加し、筑波の建築研究所と日本大学で 1 年間研修し必要単位を取得し修士論文の審査後、政策研究大学院大学から修士号（防災政策）が授与される予定（2023 年 9 月見込み）である。

SATREPS 枠の国費留学生として DoC から受け入れ、2021 年 3 月に博士学位を取得して帰国した Wangmo さんが、第 17 回世界地震工学会議(17WCEE)で論文を発表し、17WCEE Early Career & Student Award を受賞している。さらに、トリノ工科大学の研究者とブータンで行った調査研究を、修士論文としてまとめるために名古屋市立大学に短期留学していた学生の修士論文が、世界で最も権威のある RIBA（英国王立建築家協会）の建築部門における名誉ある建築賞（President’s Medals）を受賞している。このように、学位授与や国内学会や国際会議での発表で受賞するなど、若手の人材育成が順調に進んでいる。

研究題目１：「地震リスク評価」
研究グループ A：地震ハザード予測（リーダー：井上公）
①研究題目１の当初の計画（全体計画）に対する成果目標の達成状況とインパクト
(1-1) 地震観測強化

地震ハザード予測グループは、本 SATREPS 計画開始以前から実施中の京都大学防災研究所、防災科学技術研究所、および世界銀行 PHRD の 3 機関の合同プロジェクトで、ブータン経済省地質鉱山局(DGM、MoEA)に協力し、ブータン国内に 6 か所からなる高感度地震観測網、および 20 か所からなる震度観測網を完成させた。高感度観測点のうちリアルタイムでのデータ伝送を行っているオンライン観測点は Thimphu、Bumthang、Trashigang、Samtse、Gelephu、S/Jongkhar の 6 か所である。これらの観測点では、世銀課題で建設された観測小屋内に、3 成分短周期地震計(勝島 PK110)と実効分解能 18 ビット 6 成分デジタイザ(白山工業 LS7000)が設置されている。データは無線モデムによって、最寄りの Bhutan Telecom 局舎に送られ、そこから Thimphu の本局を経由して、経済省地質鉱山局(DGM)の計算機サーバ室で受信されている。観測点の電源は太陽光パネルと蓄電池によって供給されている。本 SATREPS 課題ではこれらの 6 点の観測機器（デジタイザ他）の更新を実施したが、COVID-19 による渡航・出張制限により、接続すべき広帯域地震計および強震計の設置が完了していない点が残された。図 2-1 に 2019 年 3 月時点での観測点の分布を示す。ここには後述のオフライン観測点も記載している。また、図 2-2 にオンライン観測点のうち、Thimphu 観測点の例を示す。

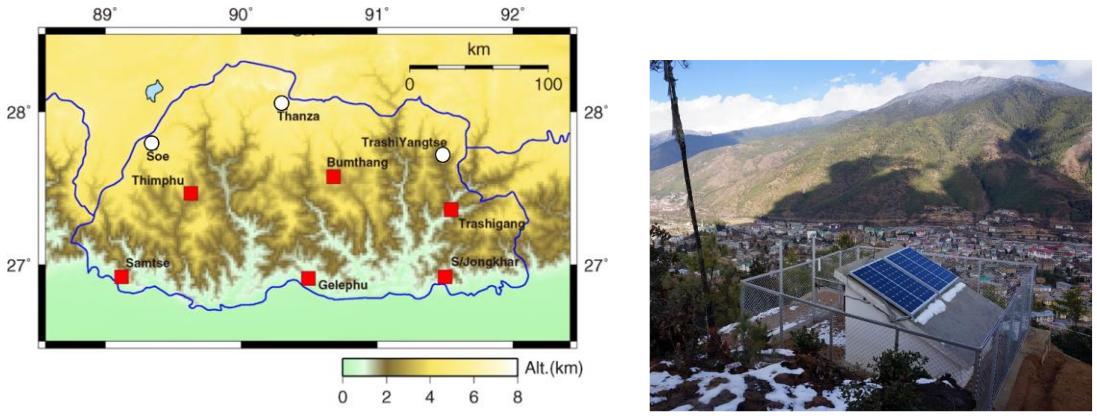


図 2-1：(左) 2019 年 3 月現在の地震観測点分布。■オンライン観測点、○オフライン観測点、(右) Thimphu 観測点の外観。

これら 6 点のオンライン点のみではブータン全土の均質な地震活動の把握には不十分であるため、これらを補完するためのオフライン観測点の運用も開始した。SATREPS 計画では新規に北部国境に近い 3 点のオフライン観測点の運用を実施し、2017 年 10 月に北西部の Jangothang（2019 年 2 月に近隣の Soe に移設）、2018 年 3 月に北部の Thanza(ヘリコプターを利用)、2019 年 5 月に北東部の TrashiYangtse に機器を設置して観測を実施した。

また、これらのオフライン点には、その後セルラー通信網の観測設備を増設し、通信状況が良好な際にはデータがリアルタイムで伝送されるように設定を行ったが、通信環境が必ずしも充分ではなく初期の目的は果たせなかった。その後、ブータン側による現地保守経費の捻出等が実現しなかったこともあり、2023 年 3 月までに一旦全点（3 点）を撤収することになった。

図 2-2：(左) Thimphu 観測点の機器キャビネット内部。(右) 2018 年 3 月の Tanza での機器保守作業。

図 2-3 には、2016 年 10 月から 2022 年 12 月までのデータ取得状況を示す。6 点のオンライン点すべてが稼動を開始したのは 2017 年夏であるが、その後も通信回線の品質が不安定であるためにオンライン点のデータ取得状況は不安定な状況が続き、観測網の稼働率（リアルタイムでのデータの取得率）は低い。図 2-3 は、事後のデータ補完処理の後の取得状況であり、リアルタイムでのデータ取得率はさらに低い。この状況を打破するために、経済省地質鉱山局(DGM)は、データ伝送用の TCP/IP ネットワークを、半官半民企業である Bhutan Telecom 社の回線から、政府直轄の GWAN (Governmental Wide Area Network)に移行する計画を立案し、2019 年 8 月に試験的に Thimphu と Trashigang の 2 点の回線の移行実験を日本側と合同で実施した。その結果、GWAN への移行により観測網の稼働率のある程度の向上は望める可能性があることが判明したが、移行実験の段階で新たなセキュリティ上の問題が浮上し、災害発生時の輻輳時等に安定的な運用が可能であるかどうか等々の課題が残ったままになっている。観測網運用のための基本的なインフラである TCP/IP ネットワークの安定運用については、その GWAN 移行後は本プロジェクトの責任範囲外となるため、ブータン側の奮起を望みたい。なお、新たに明らかになったセキュリティ上の問題の解決を含めた GWAN への移行の作業完了時期は現状では見通せてはおらず、当面の間、現状のような不安定な稼働状況が継続することを憂慮している。その後の COVID-19 禍により現地保守が困難になったこと等により、DGM による現地でのデータ回収も不十分で、残念ながらプロジェクト期間中に均質な地震活動のカタログを作成することはできなかった。

また、当初計画よりも稼働観測点数が少ない場合にも震源決定等を容易にするために、DGM のサーバ上の地震活動解析プログラム SeisComp をアップグレードし、併せて 2022 年 8 月には DGM スタッフに対する同ソフトウエアの使用法のトレーニングコースを、同ソフトを使用している RIMES の関係会社に委託して実施した。

観測通信網ネットワークが不安定な状況を打開する可能性を探るためにプロジェクト期間中の最後の試みとして 2023 年 3 月に、５か所のうち Bhumthan, Trasigang, Gelephu の３か所を RIMES 観測網と同様の携帯回線に切り替えて復活させることができた。地理的に重要な Tanza のオフライン観測点の継続を DGM が希望したため、2023 年 3 月にメンテナンスの容易な水文気象局(NCHM)の観測点に改良型の機材を再設置する予定であったが、利用する予定だったヘリコプターが事故を起こしたため中止した。

最後に、限られたデータではあるが、これまでに観測されたデータの preliminary な解析結果として 2016 年 3 月から 2020 年 5 月半ばまでの震央分布を図 2-4 (左) に示す。これは、2015 年の観測開始以来の、全データを解析した結果である。すなわち、DPRI/NIED/DGM のオンライン及びオフラインデータおよびクラッシュしたサーバからサルベージ可能であった RIMES データに加え、西部・南部国境付近の震源精度向上のため

に、同期間に利用可能であったカトマンズ（ネパール）およびシロン（インド）のデータを 2022 年度に導入した SeisComp/scanloc を使用して解析を行った自動処理結果である。なお、データ取得状況が不安定であるため、データ品質は均質ではない。これを図 2-4（右）に示す 1990 年以降の ISC カタログによる震央分布と比較すると、4 年弱の観測データであるにもかかわらず、南西部の帯状の震央分布等、両者には共通の特徴を見ることができることから、観測網が安定稼動すれば比較的短期間に全土の地震活動の把握も可能であるかもしれない。

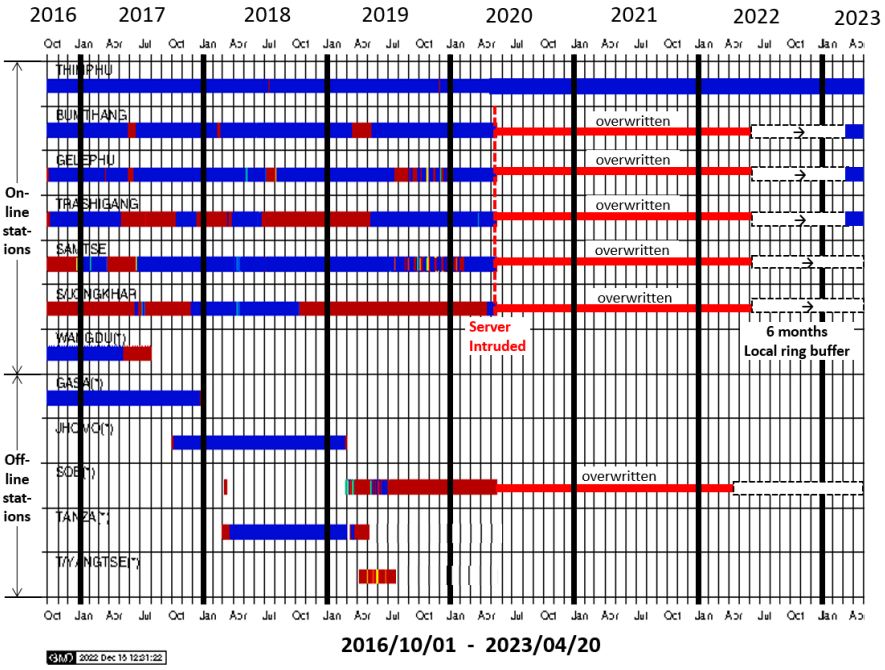


図 2-3：2016 年 10 月から 2023 年 4 月までのデータ取得状況。上から 6 点がオンライン観測点、下の 6 点が撤収済を含むオフライン点。赤線はデータを取得できていない期間。

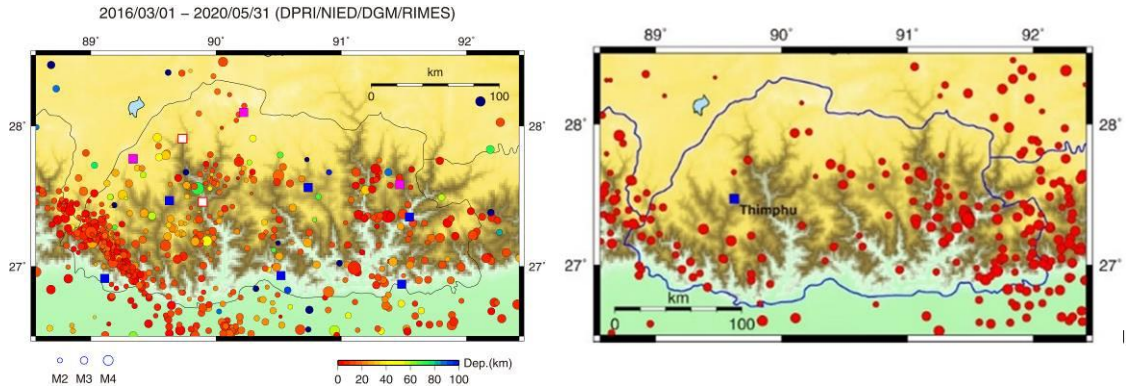


図 2-4：新設した観測網による 2016 年 3 月から 2020 年 5 月までの震央分布（左）と ISC カタログによる 1990 年からの震央分布（右）。観測点（青および紫の四角）は図 2-1 を参照。白抜きの赤い四角は SATREPS 開始以前のオフライン観測点。RIMES 観測点はデータが少量であることから示していない。ブータン国内の観測網による震央分布は短期間のデータでありながら ISC の長期間のカタログと共通の特徴を示している。観測網の安定運用が実現すれば、短期間で全土の地震活動を把握することも不可能ではないと考えられる。

(1-2) 震度観測強化

本副課題では、ブータンの地震動災害対応に必要な、震度情報によるリアルタイム地震ハザード評価を行うための観測網をブータン全土に整備する。同時に、蓄積される加速度波形データを、建物被害が発生した場合の原因分析に活用する。全国 20 か所の県庁庁舎には防災科学技術研究所と DGM との共同研究として、SATREPS フィリピン課題で開発された震度計が既に整備され稼働していた。本課題ではフィリピン SATREPS 型震度計を、安価な Linux 搭載マイコンとして普及している Raspberry Pi と、安価な高精度 MEMS 加速度センサのアナログデバイセズ社製 ADXL-355 を用いて更に安価に改良したブータン SATREPS 型震度計を 2018 年度までに製作を終え、全国 205 か所の村(Gewog)庁舎に整備している。

震度計の部品は日本から輸送し、筐体と電源資材は DGM が現地で調達し、組み立てた。震度は USGS の計算式を用いて最大加速度と最大速度から MMI 震度に変換している。図 2-5 に DGM がデザインした震度計の筐体とその内部の震度計本体を示す。蓋の内側に Raspberry Pi と 7 インチタッチスクリーン、底（壁側）に MEMS 加速度センサ基板 ADXL-355-PMDZ が張り付けてある。内部右側の白い箱は雷サージ対策のためのイーサネットアレスタである。電源は壁のコンセントから直接結線してあり、筐体の横には電源スイッチが取り付けられている。DGM が震度表示プログラムのソースコードを改造してブータン文字による表示（画面では No Earthquake）を行っている。

図 2-5：205 か所の Gewog に設置するブータン型震度計

設置作業は DGM スタッフがまず Gewog スタッフに震度計と震度階を説明したのち、技師が設置作業を行う（図 2-6）。

図 2-6：Gewog（市町村）オフィスの震度計設置作業（左）。職員への説明（右）

205 か所の Gewog のうち 2020 年度末までに 78 か所、2021 年度末までに 147 か所、2023 年 1 月までに 201 か所のブータン型震度計が整備された（図 2-7)。プロジェクト前から整備されていた 20 か所の県庁のフィリピン型震度計とあわせて全国 221 か所の震度観測網が完成した。北部 4 か所の未整備の Gewog は車両によるアクセスが困難なため計画を検討中である。

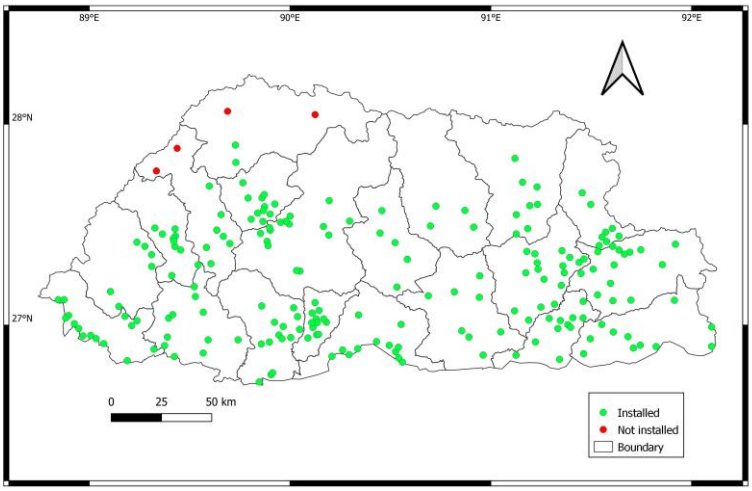


図 2-7：ブータンの 205 Gewogs（市町村）震度計分布。
緑丸：整備済、赤丸：未整備（2023 年 1 月末時点)。

図 2-8 に 2023 年 2 月 6 日のリアルタイム震度監視画面を示す。稼働率は県庁（赤）が 15/20、市町村（青）が 142/203(DGM 構内含)、合計 157/223 で 70.4%となっている。電源と通信の不安定により、この程度の稼働率となることは設計通りである。特に南部地域は落雷が多く、事務所や家庭では雷が予想されると電気器具の電源を落とすため、落雷の発生している時間だけでなく夜間や休日も電源が遮断されたままになることがある。被雷で破壊する AC アダプタとネットワークアダプタを 2023 年 3 月に予備部品として追加供与した。

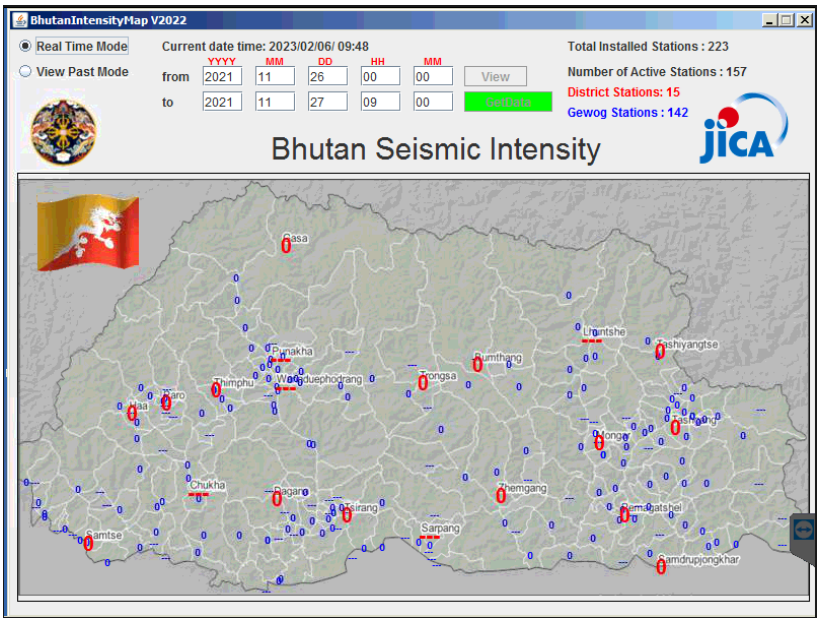


図 2-8 リアルタイム震度表示。赤が県、青が市町村。
ゼロ表示が稼働中、マイナス表示が非稼働。

図 2-9 に 2021 年 11 月 25 日のミャンマーの地震(M6.2)の MMI 震度分布を示す。表示は小数点以下 1 桁までの算用数字だが、震度計は I から XII までのローマ数字で示されている。

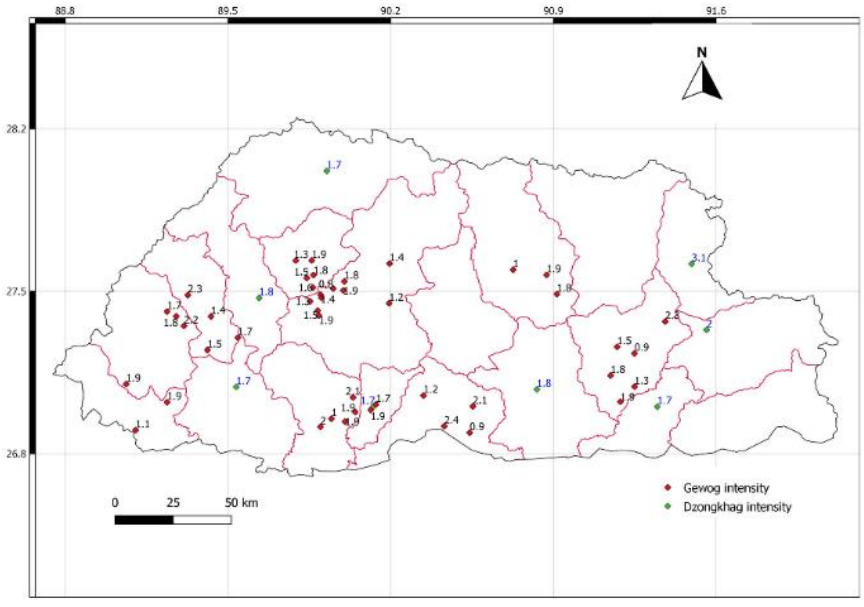


図 2-9：2021.11.25 ミャンマーの地震(M6.2)の震度

ブータン型震度計の価格は、日本の気象庁震度計の 200 万円、フィリピン SATREPS 型震度計の 20 万円とくらべて主要部品が 2 万円と非常に安価であるが、205 か所という数の多さから長期的には持続困難性が発生する恐れがある。そこで感度を多少犠牲にして震度 1 の検知を諦めた主要部品が 1 台 4 千円の簡易地震計を試作したが動作には至らず

今後の課題とした(図 2-10)。

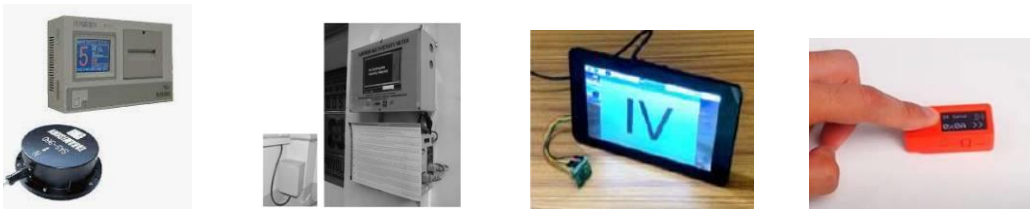


図 2-10：気象庁震度計、フィリピン震度計、ブータン震度計、ブータン簡易震度計（試作）

2023 年３月に蓄積された震度データの整理、震度計プログラムの改修、震度サーバプログラムの更新を実施した。震度階を説明したパンフレットは、自治体向けの文章版を製作した。住民向けのマンガ版の製作は今後の課題とした。

(1-3) 活断層調査

1-3-1) ブータン全域活断層図作成

ブータンでは南部の主前縁スラスト（MFT）における活動履歴の古地震学的な研究は実施されているものの、国全体の地震ハザード評価に必要な活断層マップが整備されていない状況にあった。活断層マッピングの基本手法は地形判読であり、基となるデータはデジタル地形データであるが、残念ながらブータンには詳細な DEM(デジタル標高モデル)が存在しない。最近の JICA 技術協力で NLC(国家土地委員会、日本の国土地理院に相当)がブータン国の南半分の 2.5 万分の 1 スケールの地形図を作成した。しかし、成果物はコンター（ベクトル）データで DEM（メッシュデータ）は作成されていない。我々は、NLC が保存するデジタル化した空中写真（約 3000 枚）に加え、DGM と NLC が所有する古い空中写真（約 6000 枚）をデジタル化し、リポジトリーとした。これらの空中写真、USGS による CORONA 衛星画像、活断層図と DEM を作成した。全土 DEM の空間分解能は 3m、Thimphu 付近のみ 0.5m 分解能である。これらの空中写真・CORONA 衛星画像、および ALOS 30 のアナグリフ画像をあわせて用いてブータン全域の地形判読を行い、活断層図を作成した（図 2-11)。

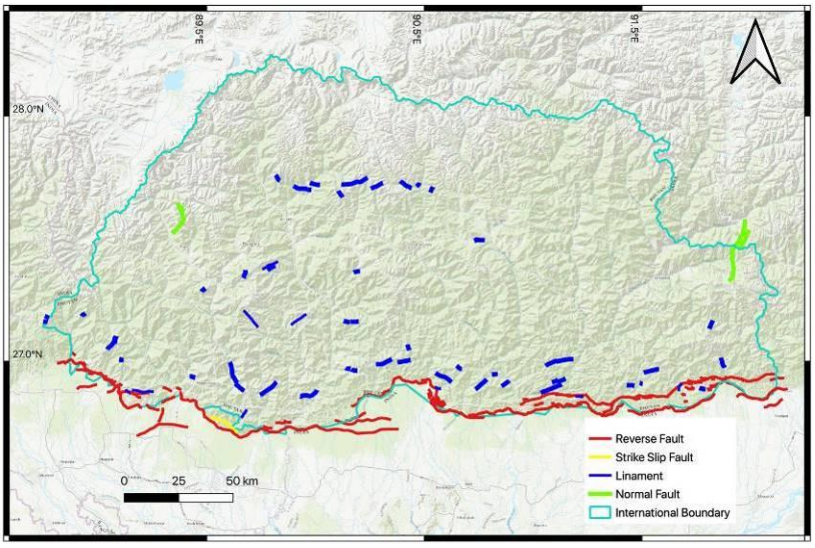


図 2-11：ブータン全域の活断層マップ

1-3-2) ブータン南東部における古地震調査

写真判読で得られた活断層の存在と活動履歴を確認するため、Samtse の西約 10km に位置する Norgugang で主境界断層(MBT)に関連する活断層のトレンチ掘削調査を実施した。ここでは、活断層が Daina 川の河岸段丘を変位させ顕著な低断層崖が発達している。低断層崖に直交するように掘削したトレンチは、深さ最大約 6m、長さ約 15m で、活断層は低断層崖の基部から北に約 20° 傾斜した状態で露出した（図 2-12)。断層の上盤では、河岸段丘を構成する砂礫層（直径数 10cm の巨礫から粗粒の砂層）が撓曲し、断層に接する部分ではオーバー・ターンする典型的な逆断層の露頭を確認した。ただし炭化物など、過去の断層変位時期を推定するために必要な年代試料を得ることができなかった。

図 2-12：Norgugang における断層崖（左）とトレンチ壁面（右）

また、Samtse 市街地に近い断層崖基部の土取り場で断層露頭を確認した。露頭では、扇状地性礫層中に約 25 度北に傾斜する断層面と、断層上盤側で断層崖に平行して傾斜し、断層崖基部で大きく褶曲する構造が観察された。また、礫層中に含まれる砂層から炭化物を採取し、加速器放射性炭素同位体年代測定を行った。その結果、いずれも 8000-8250yrBP の年代値を示し、少なくとも 8250 年以降に断層変位が生じているが明らかとなった。

1-3-3) 微地形からみた Thimphu 盆地の地震ハザード

Thimphu 盆地の地形災害環境を把握するために、ALOS 30 DSM から作成したアナグリフ画像や、2004 年に撮影された縮尺約 5000 分の 1 の大縮尺空中写真判読と短期間の野外調査の結果に基づいて、山地斜面、土石流扇状地、扇状地、湖成段丘、河岸段丘、氾濫原、現河道に区分される微地形分類図（図 2-13）を作成した。

Thimphu 周辺の自然災害については、洪水の危険性についての評価に関するレポートがある(Merzet al., 2007)が、地震ハザードに関連する報告はない。王宮は現河道に近い氾濫原の中の旧流路に位置しており、地下浅部が軟弱層で構成されている可能性がある。地震動の増幅が地下浅部の軟弱層の分布と関連する例は少なからず報告されている。上述した通り、Thimphu の中心市街地は、西部の大規模斜面崩壊地から発源する土石流扇状地上にあり、この崩壊地が地震動に起因する可能性は否定できない。Thimphu 市街地では、至る所に土石流によってもたらされた巨礫が認められ、掘削工事の露頭では複数のユニットからなる比較的厚い未固結の堆積物が分布している可能性もあり、地震動増幅に繋がる可能性も否定できない。また、湖成層が広がる Dzong 周辺の盆地では、地震動の増幅と表層地滑り発生も懸念される。

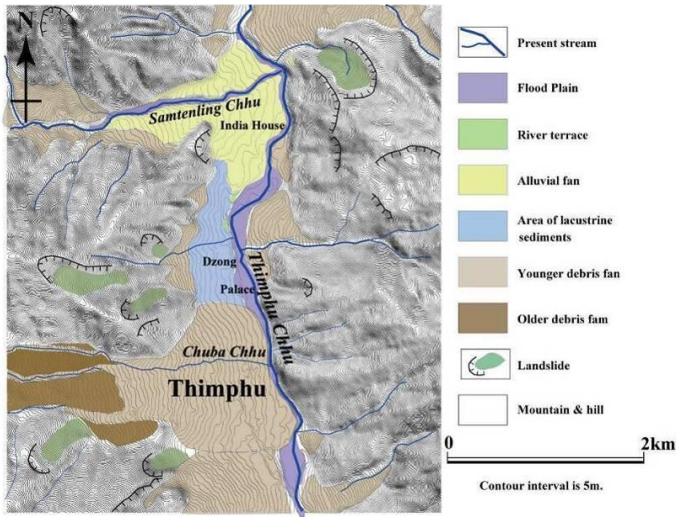


図 2-13：Thimphu 盆地の微地形分類図

(1-4) 地震増幅度評価

地震ハザード評価は、地震観測で得られる現在の地震活動と過去の地震の痕跡である活断層の調査・分析によって得られる地震発生予測に加えて、地域ごとの地震動の増幅度の違いの情報を用いて行われる。地震動増幅度の評価の標準的手法の１つが微動探査である。本課題では 2018 年度に Thimphu 市内の 5 地点において微動探査を試験的に実施し、地震波速度構造の特徴を把握するとともに、ブータンの微動探査において適切な地震計の配置（アレイ形状）を検討した。2019 年度末から 2021 年度にかけては、新型コロナウィルス感染症の流行に伴い日本側研究者の渡航が不可能であったため、探査の打ち合わせや当日の機材チェックは DGM 担当者とビデオ会議にて実施し、取得したデータおよびフィールドノートをオンライン上で共有しながら進めた。この方式により、2020 年 4 月に Thimphu 市北部の 25 地点、2021 年 12 月から 2022 年 1 月にかけてパイロットサイトである Essuna の 77 地点、2022 年 4 月に Ura の 26 地点において DGM 職員による微動探査が実施された。また、2022 年 10 月には Thimphu 市の中部～南部の 110 地点を対象とした微動探査が行われた。

各地点において、空間自己相関（SPAC）法の適用を念頭に置き、4 台の地震計（Guralp 社製の可搬型広帯域地震計 CMG-40T）を用いた半径 5m ならびに半径 10m の円形アレイ（中心１点、円周上３点）を展開し、各地点 15～30 分間の測定を実施した（図 2-14）。また、測定中の風によるノイズを低減するため、微動測定中には地震計にバケツを被せた。半径 10m のアレイ測定を行うための用地が確保できない地点では、2 台の地震計を 10m 以上離して同時測定する探査手法（2 点 SPAC 法）を代用した。3 地域で測定された微動はいずれも 2Hz 以上の周波数帯域でパワーを持ち、周囲を走行する車両から生じた地盤震動を反映していると考えられる。また、微動の空間自己相関係数（SPAC 係数）は概ね 5～30Hz の範囲で周波数の増加と共に低下しており、浅部の地盤（地表から 30m 程度）に関する情報が抽出可能であると判断される。SPAC 係数から Rayleigh 波の位相速度分散曲線を推定し、分散性を適切に説明することが可能な表層地盤の S 波速度構造を推定した（図 2-15）。

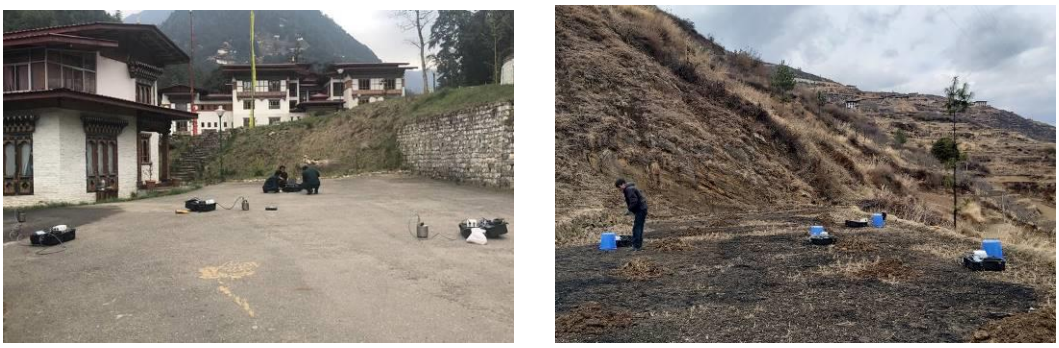


図 2-14：Thimphu（左）および Essuna（右）における微動探査の様子。

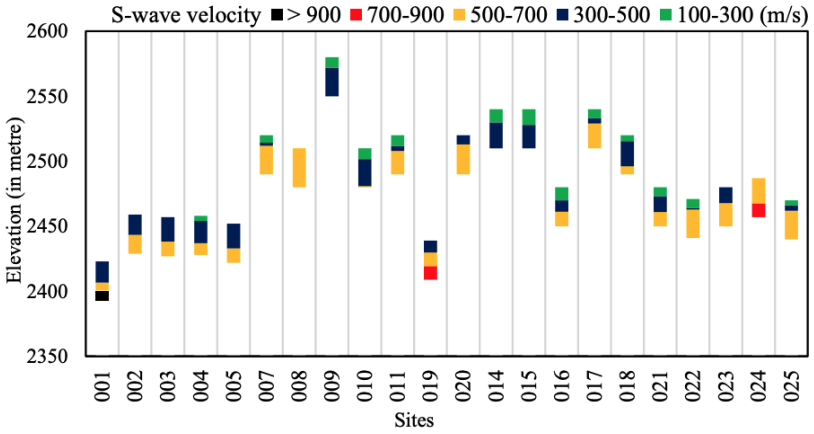


図 2-15：Thimphu 市北部の微動探査より推定した浅部 S 波速度構造。
Sites 001～005 は Dodeyna 地区、Sites 007-0011, 019, 020 は Boegana 地区、
Sites 014-018 は Chadagang 地区、Sites 021-025 は Kabesa 地区での結果を示す。

地表から深さ 30m までの地盤の S 波速度構造の平均値（Vs30）は、その地点における地震動増幅の指標として、地震動予測式等において幅広く用いられている。ここでは推定した S 波速度構造から Vs30 を推定し、空間的な Vs30 のバリエーションを求めた。S 波速度構造の推定が困難である場合には、Rayleigh 波位相速度や SPAC 係数から Vs30 を推定する既存の経験式を用いて簡易的に推定した。

その結果、Thimphu での Vs30 は 261～704 m/s（図 2-16）、Essuna では 298～711 m/s（図 2-17）であり、概して硬質な地盤条件から成ることを確認した。僅かな距離で Vs30 がばらつく要因は、地表の土地利用および表層の堆積環境の違いを反映したものと考えられる。一方、Ura では西側の川沿いで Vs30 が小さくなる傾向があり（180～300m/s）、堆積環境を反映した特徴が見られた（図 2-18）。なお、微動探査では探査地点直下の地盤に関する情報しか得ることができない。近年、地表面の傾斜量と Vs30 との経験的な関係式を基に、全世界を対象とした Vs30 分布図が USGS によって公表されているが、空間分解能が約 820m メッシュ（30 arcsec）であることから、各地域の細やかな地形の影響は反映されていない。そこで、NASA の Shuttle Radar Topography Mission（SRTM）によって得られた高解像度の標高データを基に約 250m メッシュ（9 arcsec）間隔で傾斜量を求め、非探査地点の Vs30 値を補完した。

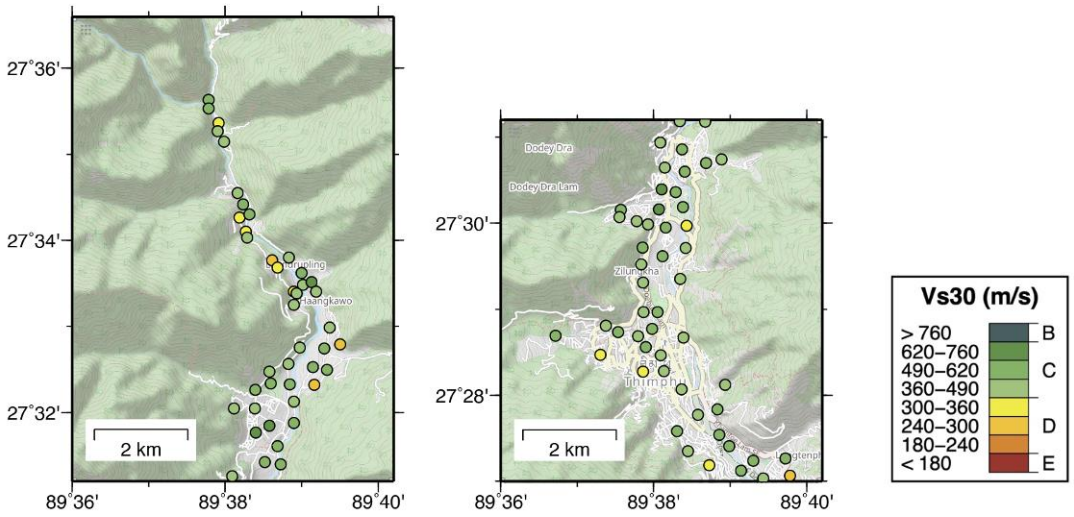


図 2-16：Thimphu 市の微動探査より推定した地表から深さ 30m までの平均 S 波速度（Vs30）。

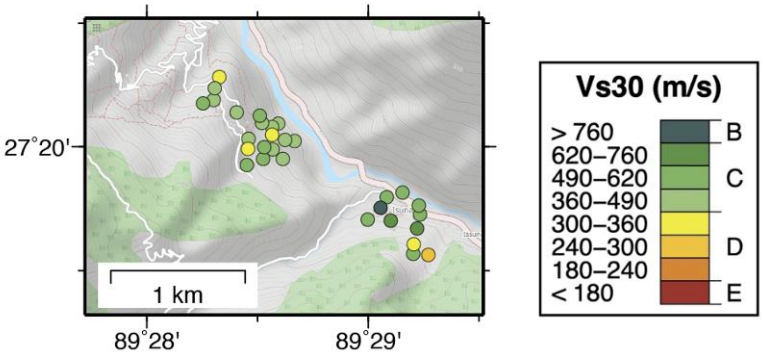


図 2-17：Essuna の微動記録より推定した Vs30 値の分布。

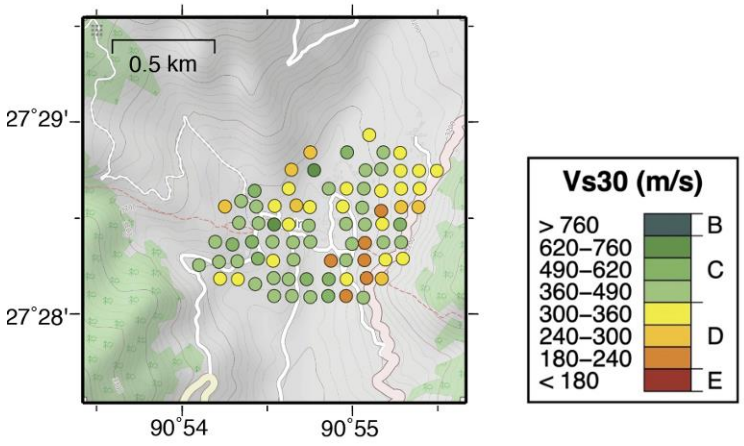


図 2-18：Ura の微動記録より推定した Vs30 値の分布。

微動観測には広帯域地震計(Guralp CMG-40T)とデジタイザ(Nanometrics Centaur)のセット４式を用いたが、比較的地盤が硬質であるブータンでは３成分広帯域地震計はオーバースペックだったため、固有周期２Hz の上下動ジオフォン３個と予備のデジタイザ１台を用いた安価で持ち運びの容易な機材を製作して 2023 年 3 月にティンプーの DGM 構内で測定の実験をおこない、十分に実用になることを確認した。

(1-5) 地震ハザードマップ

1-5-1) 最悪のシナリオ地震による強震動マップ

我々の活断層調査で明らかとなったブータン南西部の MainHimalayanThrust (MHT) 衝上断層のシナリオ地震動をブータン全域に対して 1km メッシュシで計算し、さらに Thimphu と２か所のパイロットサイトについては 0.5km メッシュおよび我々の微動観測による地震動増幅の結果を用いてシミュレーションを行った。計算には OpenQuake エンジン(GEM, 2022)を用いた。仮定した断層は、Mw=7.8、震源深さ H=10km、断層の幅 20～60km、傾斜度 30 度～7 度に変化するモデルを作成した (図 2-19)。

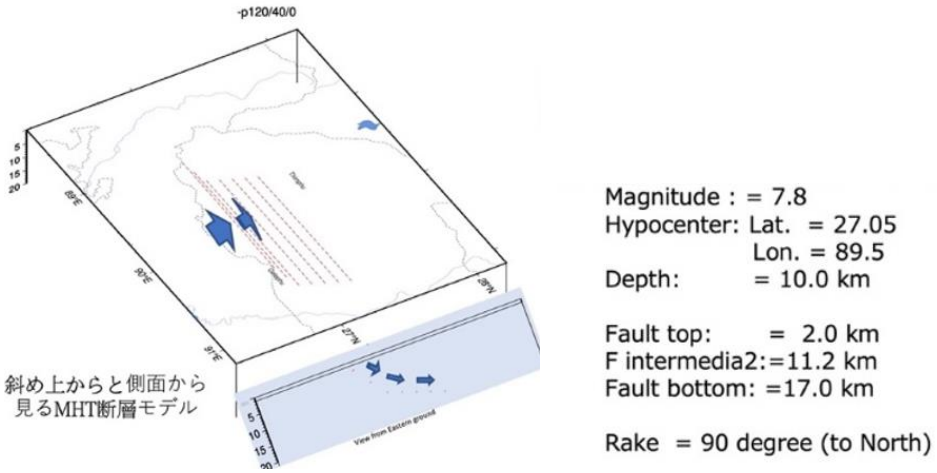


図 2-19：Main Himalayan Thrust 低角度逆断層震源(M7.8)のモデル

強震動減衰式は、AbrahamsonEtAl(2014)、BoreAtkinson(2008)、Lin(2008)、司・翠川式を比較評価し、距離 300km までの範囲で最大値を与える AbrahamsonEtAl(2014)の式を用いることとした。また、ブータン全土の地震動計算では USGS による Vs30 データに基づく地表増幅度を考慮した。

図 2-20 (左) に１km メッシュに分割して計算したブータン全土の地震動最大加速度を示す。最大加速度値は丸い点の色で示されている。背景の色は標高を表している。断層面からの距離に応じた幾何減衰の境界線がギザギザになっているのは Vs30 による効果である。図 2-20 右に 0.5km メッシュに分割した Thimphu 周辺の最大加速度詳細図を示す。

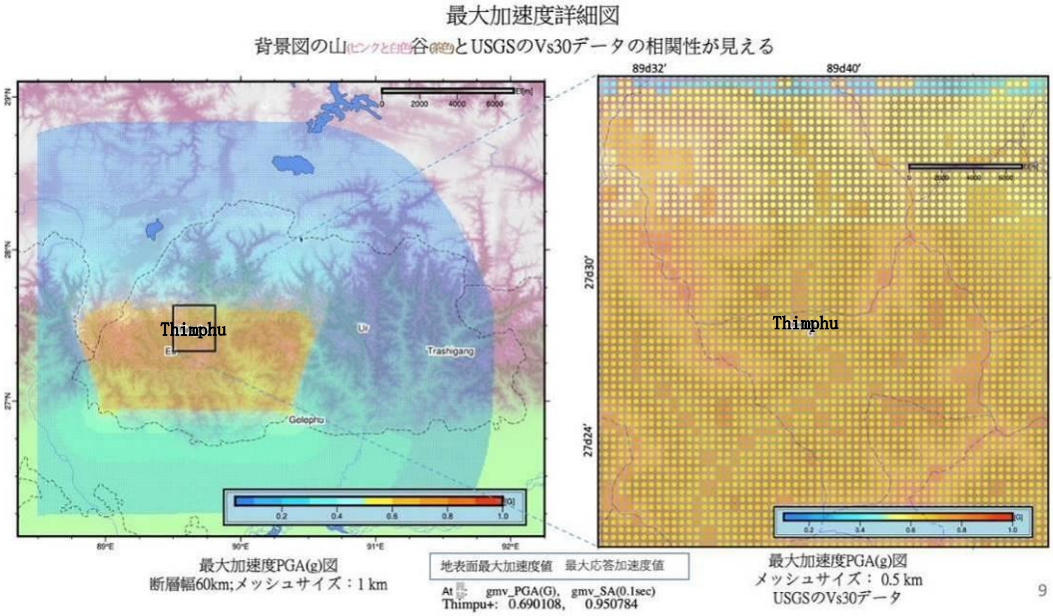


図 2-20：ブータンと周辺地域（左）および Thimphu 周辺（右）の推定最大加速度分布

Thimphu 周辺地域は、地形勾配のみからなる USGS の Vs30 による評価に加え、我々のグループによる微動観測に基づく Vs30 のデータを利用して、最大加速度詳細図を計算した（図 2-21)。背景地形図の上に最大加速度値が 0.5ｋｍメッシュの丸点で表わされている。Thimphu 中心地での最大加速度値は 0.69G となっている。一方、微動観測点は 0.5km メッシュよりも詳細に配置されており、観測点番号 25 では最大加速度が 0.74G に、観測点番号 27 では 0.7G になっている（表 2-1)。

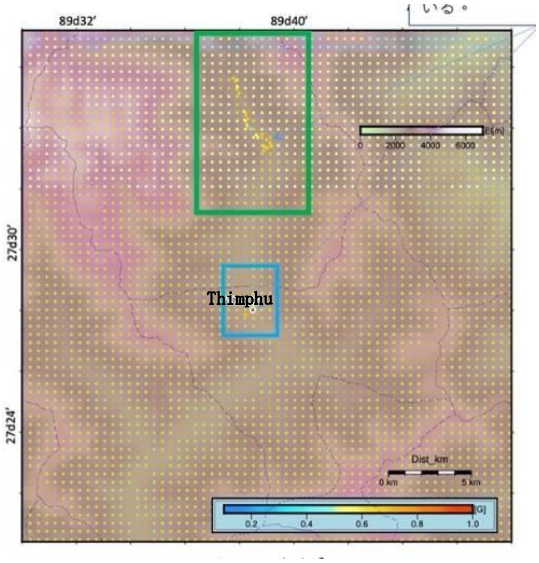


図 2-21：Thimphu 周辺の最大加速度(USGS の Vs30 および 微動観測の Vs30 による)

本プロジェクトの２か所のパイロットサイトである Essuna(版築造地域)および Ura(石積造地域）についてはより詳細な PGA マップを作成した（図 2-22)。Essuna は、断層からの距離が Thimphu より近い分だけ加速度が大きくなるはずであるが、山地であるため Vs=800/s の均一表層地盤で計算すると 0.7G で､USGS の Vs30 で計算すると 0.64G となる。

微動観測点は0.5kmメッシュより細かく配置され、最大加速度は0.74Gとなった(表2-1)。Uraは断層から離れるため、Vs=800/sの均一表層地盤で0.11G、USGSのVs30で0.12Gという小さな値となる（表2-1）(Uraの微動Vs30は解析中)。

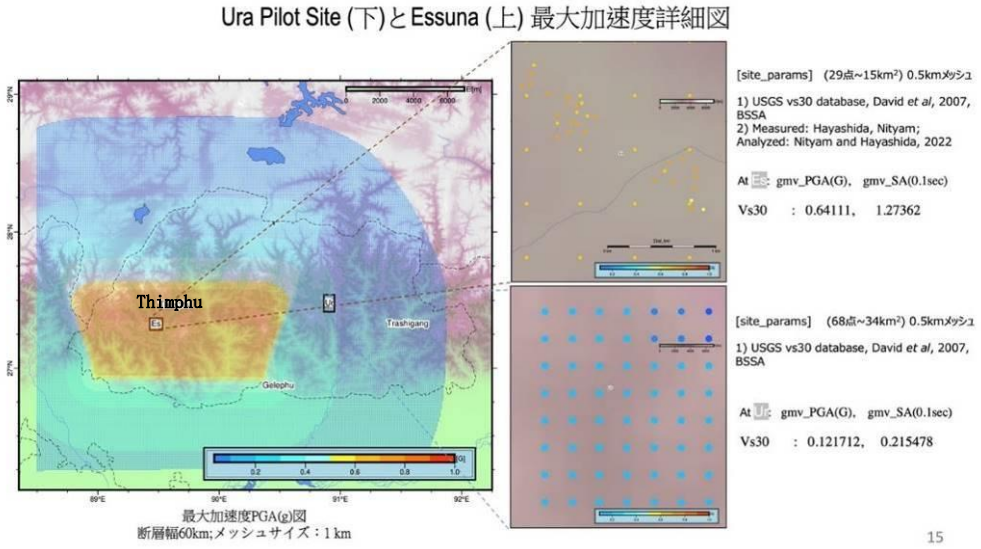


図2-22：Essunaパイロットサイト(右上）とUraパイロットサイト（右下）の推定最大加速度。Essunaは0.5kmメッシュに加えて微動観測によるVS30を用いた値が併せて示されている。

表2-1：Thimphu、Essuna、およびUraパイロットサイトの最大加速度PGA値とスペクトルSA値

場所	lon	lat	gmv_PGA	gmv_SA(0.1)
Essuna	89.4815	27.331	0.6411	1.2736
Essuna入り口	89.4866	27.331	0.6413	1.2741
Essuna最大値	89.48716	27.32937	0.7455	1.1260
Ura Pilot Site	90.9065	27.4823	0.1217	0.2155
Thimpu +	89.6419	27.4671	0.6901	0.9508
Thimpu微動R 25	89.64174	27.47153	0.7350	1.0902
Thimpu微動R 27	89.64217	27.46915	0.6950	0.9680

最悪のM7.8ヒマラヤ衝上断層地震ではMFTからThimphuまでの広範囲が強い地震動に見舞われることが予想される。Thimphu中心部でPGA=0.69～0.74G、EssunaではPGA=0.6～0.7G、UraではPGA=0.12Gである。ThimphuとEssunaはMMI震度VIII～IXクラスの強い地震動となり広い範囲で甚大な建物被害が発生する可能性が高い。

1-5-2) 確率論的地震ハザードマップ

前項で示したM7.8のシナリオ地震は、震源域に近傍での最悪シナリオを示しており具体的で理解しやすいが、国や自治体による耐震化指針をはじめとする事前の災害対策には、将来発生し得る様々な地震を考慮した確率的地震動予測が必要である。しかし2020年に我々とは別の研究チームが、ブータン全土の確率的地震ハザードおよびリスクの大幅な改良を行った研究を発表したた(Stevens 他 2020)。我々は同論文を精査し、同じ作

業を重複して実施しないことを 2021 年に決定した。

一方、Stevens 他論文で示された確率的地震ハザードは、一般的に示される 50 年 10%超過確率の地震動を示しており、再現期間が 475 年と長いため住民に切迫感を与えることは難しい。また PGA の値は Paro、Thimphu、Essuna 付近で 0.6-0.7 である（図 2-23 上）。仮にそのような地震動が発生した場合には、ブータンの脆弱な伝統住宅は壊滅的な被害を受け、ローコストの補強方法では歯が立たず、住民は耐震化を放棄しかねない。前項の M7.8 最悪シナリオ地震の地震動も同様である。伝統住宅の住民に耐震補強を促すためには、より差し迫った、かつ被害の軽減が実現可能な地震動を示す必要がある。以上のような耐震化普及チームからの要請により、Stevens 他のチームとともに、30 年 50%超過確率の確率的地震動予測マップを作成した（図 2-23 下）。さらに微動観測および地表面の傾斜量から得られた Vs30 値も考慮した、より詳細スケールの PGA マップを作成した。なお、これらの地域では Vs30 が概して 300m/s を超えることから、強震時の地盤の非線形性は考慮していない。Thimphu では 0.15-0.25g、Essuna では 0.19-0.30g、Ura では 0.16-0.23g 程度の PGA 値を示している(図 2-24)。

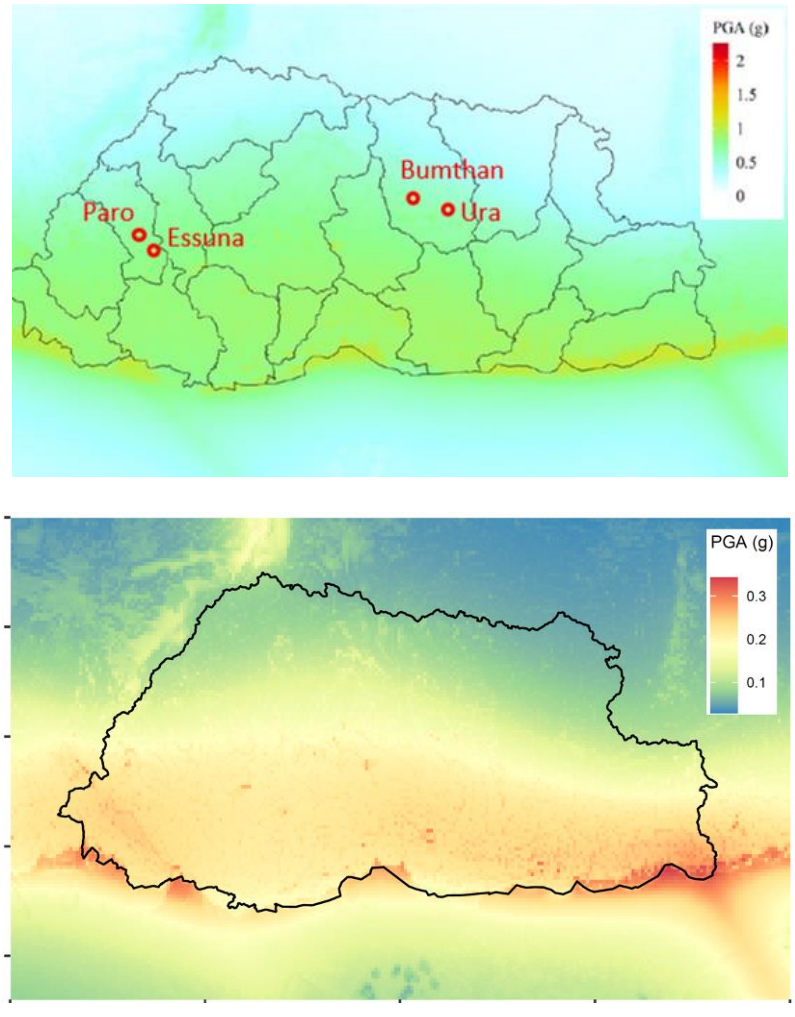


図 2-23 ブータン全土の確率的地震ハザードマップ
上：50 年 10%超過確率 PGA（Stevens 他 2020）、
下：30 年 50%超過確率 PGA(Stevens および当グループ)

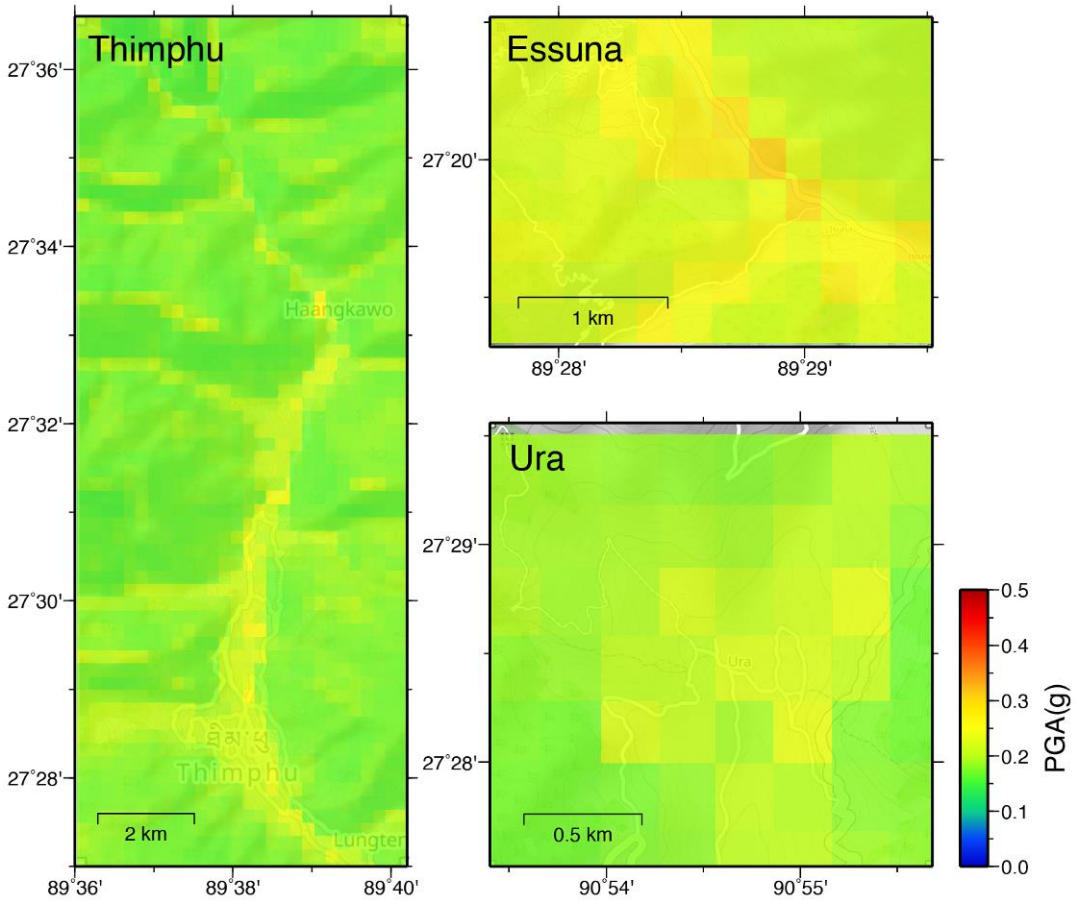


図 2-24：Thimphu、Essuna、Ura における 30 年 50%超過確率の PGA 分布

②研究題目１のカウンターパートへの技術移転の状況

地震観測、震度観測、活断層調査、いずれも現地での活動を通じて OJT を実施した。日本国内研修としては、2019 年 2 月に経済省地質鉱山局(DGM)スタッフの Karma Namgay を広島に招聘し、空中写真による活断層の判読の実習を行った。2017 年度と 2019 年度に DGM スタッフの Phuntsho Pelgay と Nityam Nepal のそれぞれが Global Earthquake Observation 研修に参加した。2020 年１月の北淡活断層国際シンポジウムに DGM 地震課長 Dowchu Drukpa が参加した。2020 年 10 月～2021 年 9 月に、DGM の Nityam Nepal が JICA 課題別研修「地震学・耐震工学・津波防災」に参加した。研修の一環として微動探査に関する個人研修を実施し、微動の測定および解析方法に関する指導を対面で行なった。Thimphu 市内で取得した微動探査記録の処理結果を、政策研究大学院大学の修士論文として取りまとめた。

③研究題目１の当初計画では想定されていなかった新たな展開

NLC による広範囲の空中写真を入手できたことにより、活断層マッピングに進展がみられた。担当する経済省地質鉱山局(DGM)スタッフの Karma Namgay も意識および能力が高く、このサブテーマは大きな成果がえられた。

④研究題目１の研究のねらい（参考）

ブータン全土の地震ハザード評価を、過去の地震データ、本課題により得られる地震活動データ、震度データ、活断層分布、地形地質分布から評価するとともに、将来ブータン地質鉱山局が、観測網の維持とハザード評価モデルの改良を継続していくために必要な技術移転を行うことをねらいとする。

⑤研究題目１の研究実施方法（参考）

6 か所のオンライン観測点からなる弱震観測網を強化するとともに、北部縁辺に 3 か所のオフライン観測点を設け、データを取得する。また RIMES 計画が同時期に設置した 8 か所の観測データを合わせて解析し、ブータン全土の地震活動を明らかにした。20 か所の震度観測点を運用する。新たに 205 か所の村に簡易震度計を導入して即時に高密度の震度情報を提供するシステムを導入する。有感地震の震度データをアーカイブ・解析する。ブータン全土の航空写真を分析して、活断層マップを作成する。微動観測機材を導入し、パイロット地域での観測により地盤による地震動増幅を評価する。ドローン空撮による微地形モデルを用いて地震動増幅度の地形効果を評価する。これらの情報を統合してシナリオ地震によるブータン全土およびパイロット地域における強震動予測を行う。

研究グループ B：地震リスク評価（リーダー：高橋典之）

①研究題目 1 の当初の計画（全体計画）に対する成果目標の達成状況とインパクト

(1-6) 地震リスク評価

研究グループ A および研究グループ C の研究成果に基づき、構造物の脆弱性評価および地震リスク評価を行うことを目的とした。また、現地技術者が将来に渡り運用可能となる技術提供方法について検討を進めた。

まず、構造物の脆弱性評価に用いる基本的な構造特性の把握につとめ、後述の研究題目 2「耐震化技術の開発」と連携し、典型的なプランを有する版築造および石積造の常時微動計測に伴う一次固有周期推定式の検討を行った（図 3-1～図 3-4）。最後に、建物高さ（ほぼ低層）と固有周期の関係を踏まえ、応答解析に用いる地震動強さ指標（Intensity Measure）について加速度（PGA）をベースにするのが妥当と判断し、地震応答解析に基づく脆弱性評価を行った。提案補強工法の効果を含め、脆弱性曲線の精査を進め、2022 年 11 月のパイロットサイト対象リスク評価までにフラジリティの精査を終えた。

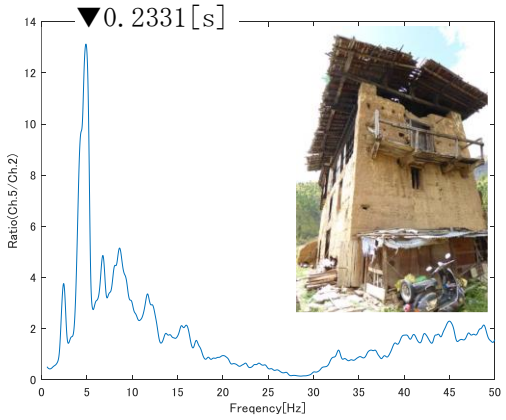


図 3-1：版築造固有周期算出例

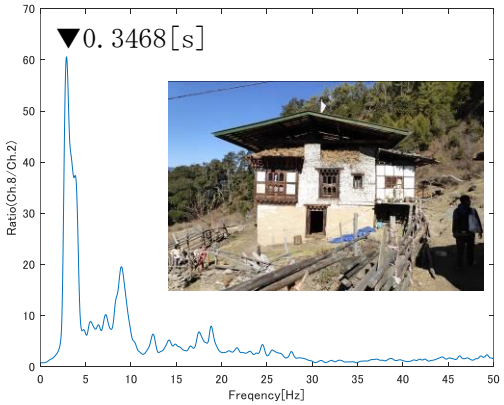


図 3-2：石積造固有周期算出例

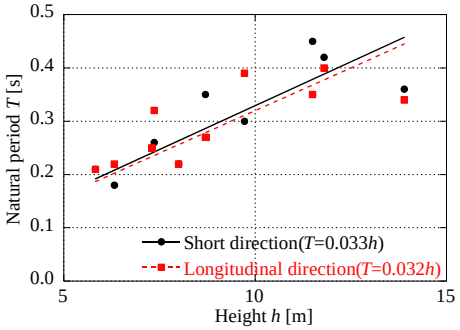


図 3-3：版築造建物高さと固有周期の関係

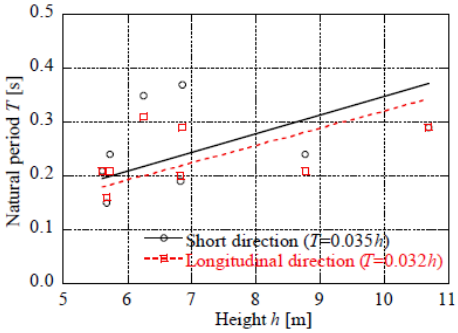
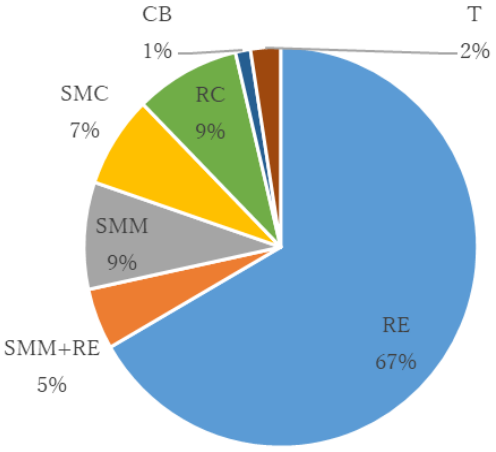


図 3-4：石積造建物高さと固有周期の関係

地震リスク評価については、まずパイロットサイト地域を選定すべく、研究グループ A のハザード評価に適した地形を有していること、研究グループ C の耐震性能評価対象構造物として典型的な建物が大半を占めることの、両条件を満たす箇所を選択した。具体的には、研究グループ A のリスク評価対象地域としても適した地形を有し、研究グループ C の耐震性能評価に対しても版築造を対象とした建物群が大半を占める地域として適したエリアとして、版築造を中心とした集落のリスク評価パイロットサイトに Essuna（東西約 2 km×南北約 1 kmのエリア）を選択し悉皆調査を実施し（図 3-5、図 3-6）、石積造を中心とした集落のリスク評価パイロットサイトに Ura を選択し悉皆調査を実施した（図 3-7）。



RE：版築，SMM+RE：マッドモルタル石積造＋一部版築，SMM：マッドモルタル石積造
SMC：セメントモルタル石積造，RC：RC 造，CB：コンクリートブロック造，T：木造

図 3-5：Essuna の悉皆調査結果（構造種別、全数 81）

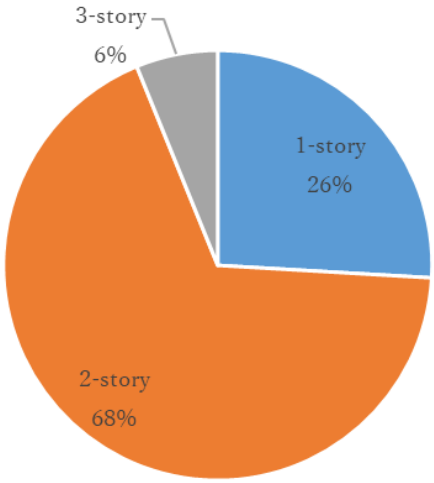
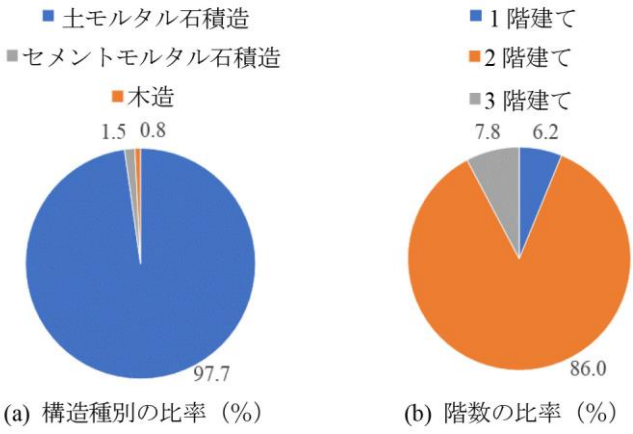


図 3-6：Essuna の悉皆調査（階数分布）



(a) 構造種別の比率（%）　(b) 階数の比率（%）

図 3-7：Ura の悉皆調査

研究グループ A のハザード評価において緯度・経度・PGA が与条件として与えられた場合について、パイロットサイトの構造種別構成に応じたフラジリティ曲線と、エクスポージャー（社会経済的重要度）係数を適用することで地震リスク評価を行う Microsoft Excel のプロトタイプファイル（リスク評価のほか、Excel のアドオン機能である 3-D Map を用いたリスクマップのヒートマップ様表示が可能）（図 3-8）、および、MATLAB を用いた詳細リスクマップ表示プログラムを開発した（図 3-9）。Bhutan 側との議論の結果、Excel によるヒートマップ表示方式、および、MATLAB による建物個別表示方式の両手法を技術移転することで合意した。

フラジリティ曲線は、DoC の Pema が来日して修士論文としてとりまとめた成果であるセメントモルタル石積造（無補強，補強）、マッドモルタル石積造（補強）形式の建物のフラジリティ曲線を採用した。マッドモルタル（無補強）形式のフラジリティ曲線は、補強形式フラジリティ曲線に対して、SATREPS Output2 として日本建築学会大会で発表した補強の有無による強度比を用いて、補強形式のフラジリティ曲線を割り戻すことで設定した。版築造およびその他の構造形式については、主に Tom R. Robinson: Scenario ensemble modelling of possible future earthquake impacts in Bhutan (2020)の文献を参照しているが、版築造の補強の有無によるフラジリティ中央値の設定は SATREPS Output2 として日本建築学会大会で発表した補強の有無による強度比を用いて定めた。また、エクスポージャーについても Tom R. Robinson: Scenario ensemble modelling of possible future earthquake impacts in Bhutan (2020)の文献を参照しているが、当該文献では、版築造をネパールの Adobe と同等に捉えており、fatality rate（死亡率）を極めて高く設定している（Adobe が崩壊した際に粉塵が多く発生し窒息死する事例が多いことから rate が高くなっている）。しかし、SATREPS Output2 の実験で、版築と石積造とで、破壊時の粉じん量・危険度に大きな違いは見られなかったことから、Bhutan 版築造の fatality rate は石積造と同等にするのが相応しいとして、設定を修正した。なお、技術移転したリスク評価計算シートでは、エクスポージャーを目的に応じた任意の値に設定することが可能であり、例えば、fatality rate ではなく、seismic loss を risk 評価対象とした場合、構造形式ごとの建設コストを基準化した数値を係数として与えることで、目的のリスク評価が可能になるようにした。

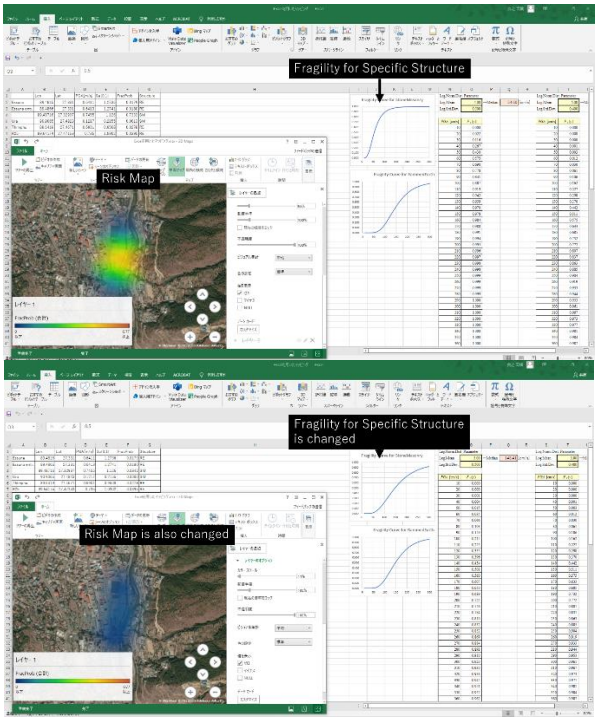


図 3-8：Microsoft Excel の機能を用いたリスクマップ作成シート例

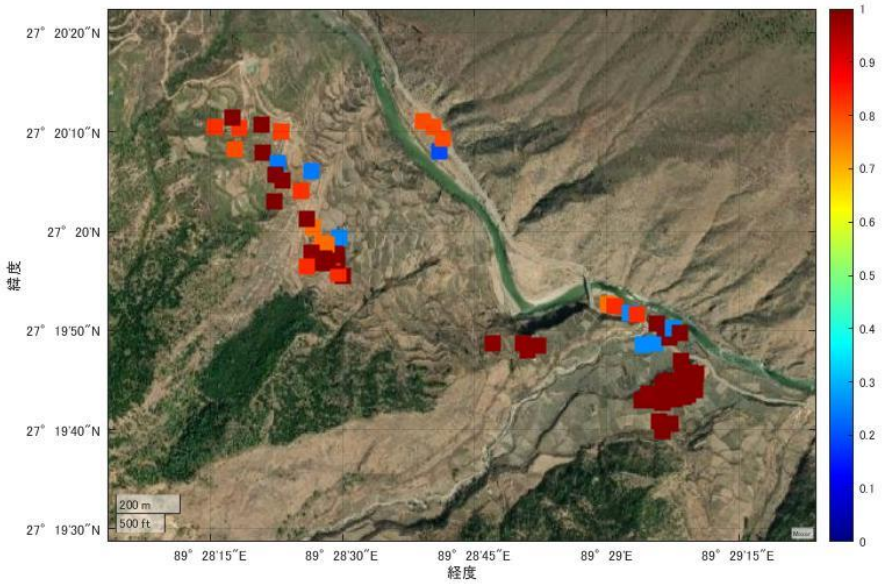


図 3-9：MATLAB プログラムを用いた詳細リスクマップ表示例

②研究題目１のカウンターパートへの技術移転の状況

当初計画では 2020 年度から実施するテーマであったが、新型コロナウィルスのパンデミックによる渡航制限で、直接対面形式でのカウンターパートへの技術移転を 2022 年 9 月に実施した。

ただし既にこれまでに、研究題目 2「耐震化技術の開発」と連携し、脆弱性評価に基づく耐震目標値の妥当性検証を（Essuna, Ura 以外のパイロットサイト地域以外でも）将来にわたり内務文化省文化局（DoC）および公共事業省技術支援局（DES）が継続できるように、常時微動計測による構造特性評価技術を現地技術者に教育した(図 3-10、図 3-11)。

図 3-10：現地持参した計測機器（英語マニュアル付）

図 3-11：現地技術者に計測手順を教育

あわせて、地震リスク評価に用いる Excel ファイルでの 3D Map 機能の利用方法インストラクション資料を作成するとともに（図 3-12)、地震リスク評価結果を格納した Excel ファイルから詳細リスクマップを生成する MATLAB プログラムのスタンドアロン化（MATLAB がインストールされていない PC においても独立実行ファイル（.exe）として機能するように変換したもの）を作成し、2022 年 9 月の Essuna、11 月の Ura を対象としたパイロットサイトでの技術移転を、2022 年 9 月に実施した。

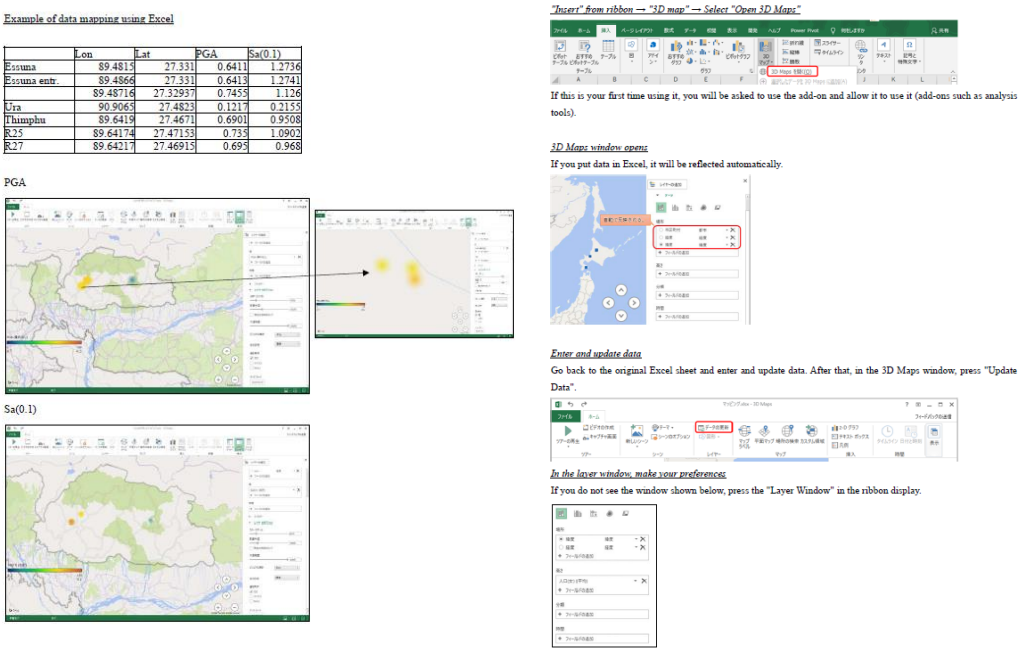


図 3-12　Excel 3D-Map 機能を用いたリスクマップ生成のインストラクション資料（一部）

③研究題目１の当初計画では想定されていなかった新たな展開

2020 年以降、新型コロナウィルスのパンデミックによる移動制限のみならず、緊急事態宣言・まん延防止措置発令下における研究施設利用制限など、現地調査および国内研究活動に大きな制約が課されている状態ではあったが、オンライン会議を通して現状把握に努めた。

④研究題目１の研究のねらい（参考）

研究グループ C で開発する耐震性能評価法において目標となる耐震性能を定める際の合理的な判断基準を、研究グループ A のハザード評価結果に基づいて、脆弱性評価およびリスク評価に展開し、適用技術の社会効果検討に寄与する技術を提示することができるようにする。

⑤研究題目１の研究実施方法（参考）

研究グループ C で実施する版築造、石積造（マッドモルタル目地、セメントモルタル目地）の構造特性調査、実験結果を通して、構造物の簡易解析モデル（振動系モデル）の基本データ集約を進める。研究グループ A の成果として得られるハザード曲線に基づき、構造物の地震応答パラメトリック解析による脆弱性評価を実施し、脆弱性評価に対してエクスポージャー係数（社会経済的重要度）係数を適用することでリスク評価へと展開する。

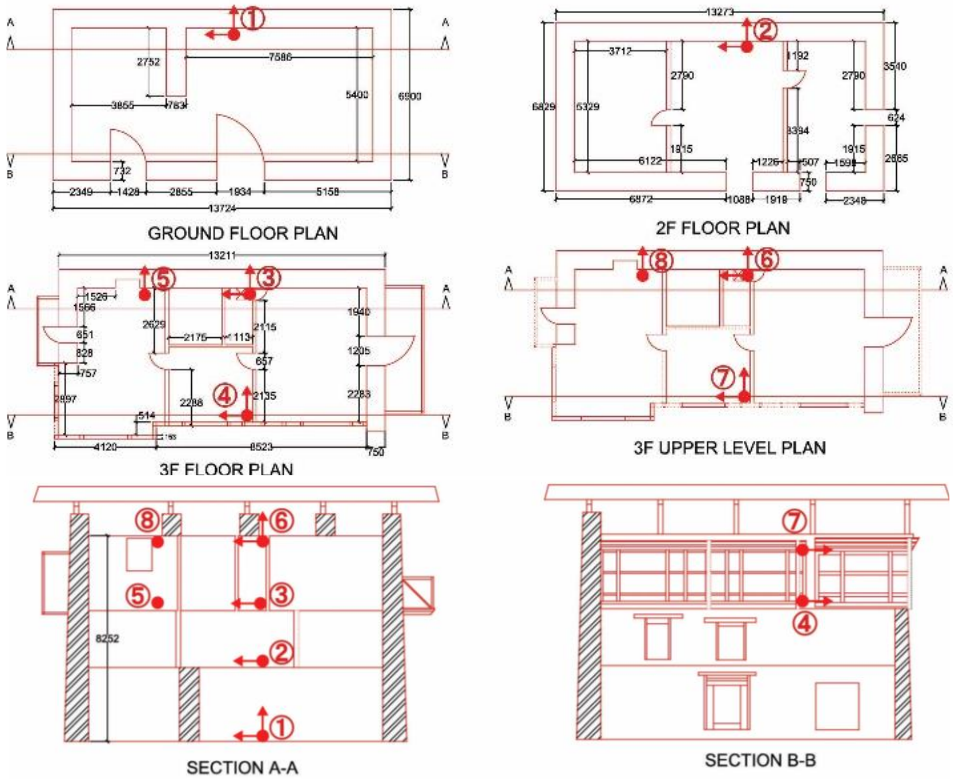
研究題目２:「耐震化技術の開発」
研究グループＣ:耐震化技術の開発（リーダー：宮本慎宏）
①研究題目２の当初の計画（全体計画）に対する成果目標の達成状況とインパクト
(2-1) 常時微動計測

構造種別・工法ごとに伝統建築を分類し、各構法、用途、立地を条件に版築造・石積造建築の典型例・プロトタイプを定め、常時微動計測および長期のモニタリング計測を開始した。なお、常時微動計測結果については前述の研究題目１:「地震リスク評価」の研究グループＢ:地震リスク評価で述べた。

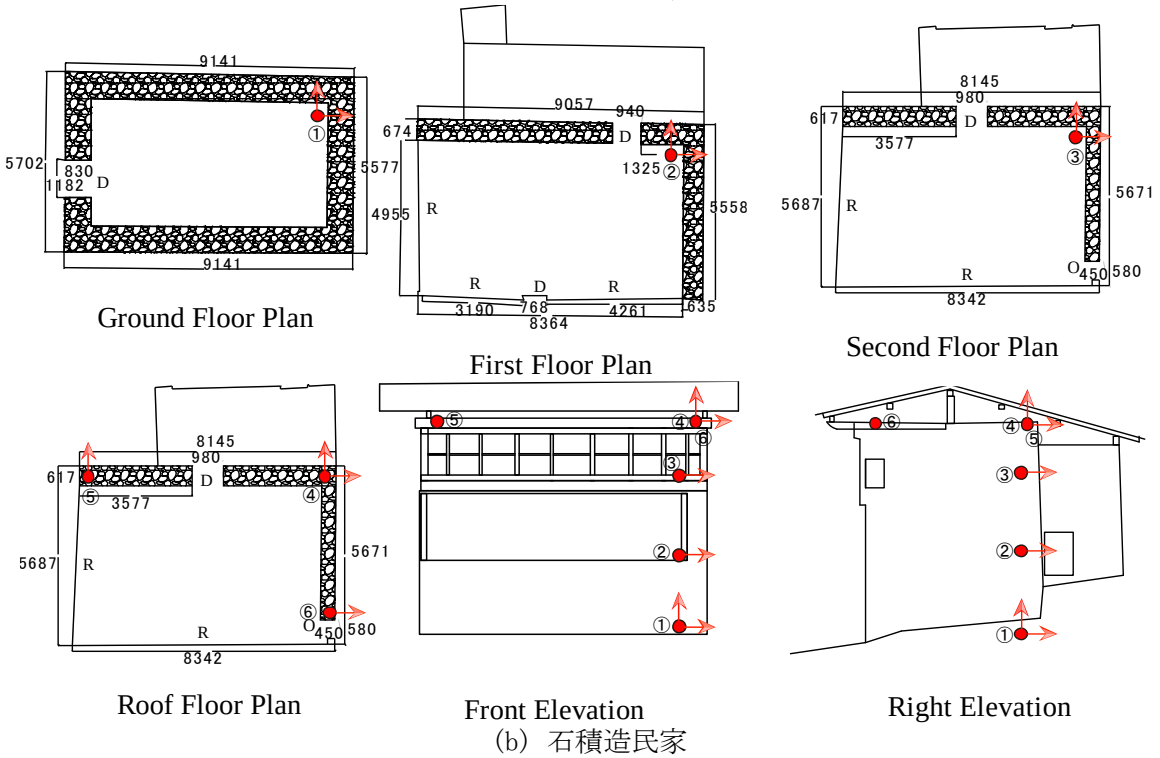
(a) 版築造民家　　(b) 石積造民家

図 4-1：長期モニタリング対象建物

長期のモニタリング計測の対象は図 4-1 に示す典型的な版築造と石積造の民家とし、これまでに各建物でいくつかの地震が観測されている。図 4-2 に示すように、版築造民家の加速度センサは、地面レベル１点（水平２成分＋上下１成分)、１階レベル１点（水平２成分)、２階レベル３点（水平２成分×２点、水平１成分×１点)、３階レベル（２階天井下レベル）３点（水平２成分＋上下１成分、水平２成分、水平１成分）の計８点（16成分）に設置した。熱電対は、1 階東側の室温 1 点、北側の室内壁体温度 1 点、東面外気温 1 点、2 階中央部の室温 1 点の計 4 点である。石積造民家の加速度センサは、地面レベル１点（水平２成分＋上下１成分)、１階レベル１点（水平２成分)、２階レベル１点（水平２成分)、３階レベル３点（水平１成分×２点、(水平２成分＋上下１成分）×１点）の計６点（12 成分）に設置した。熱電対は、1 階の室温 1 点、2 階の室温 1 点、2 階の壁内温度 1 点、屋上階の室温 1 点の計 4 点である。各建物の測定には、加速度センサ（佐藤商事製、感度：203.9±5%mV/(m/s^2)、計測範囲：±29.42m/s^2、周波数応答：DC～400Hz、分解能 0.000049m/s^2 rms 以下）と再構成可能組込制御・集録システム（NI 社製、コントローラーcRIO-9012、シャーシ cRIO-9112)、アナログ入力モジュール（NI 社製、NI-9239、分解能：24bit)、温度入力モジュール（NI 社製、NI-9211）を用いた。なお、加速度のサンプリング周波数は 100Hz、温度のサンプリング周波数は 10Hz である。

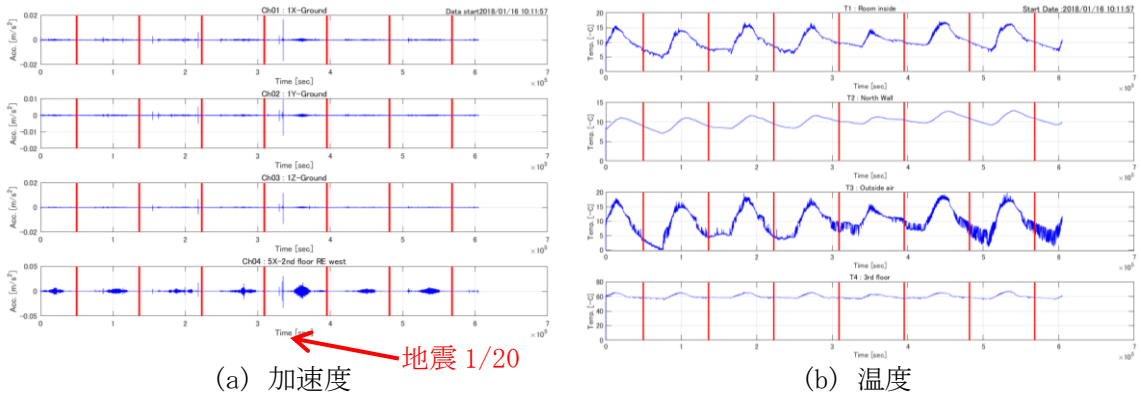


(a) 版築造民家



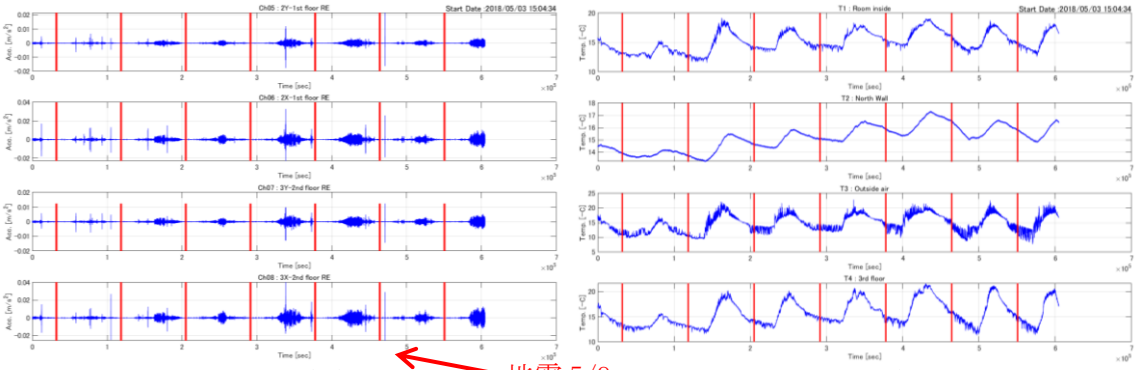
(b) 石積造民家

図 4-2：対象建物の平面図・断面図とセンサの設置位置



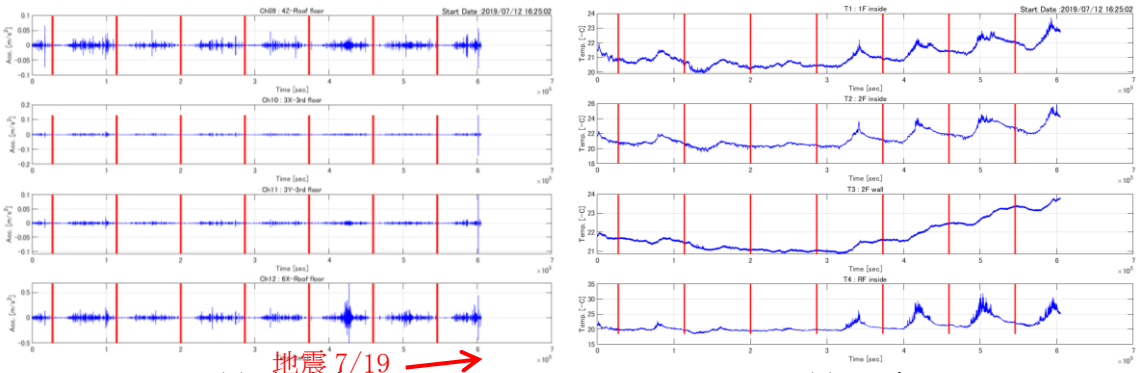
(a) 加速度　　(b) 温度

図 4-3：1 週間の計測加速度（版築造民家、2018/1/16～2018/1/23）



(a) 加速度　　(b) 温度

図 4-4：1 週間の計測加速度（版築造民家、2018/5/3～2018/5/10）



(a) 加速度　　(b) 温度

図 4-5：1 週間の計測加速度（石積造民家、2019/7/12～2019/7/19）

各建物で計測された代表的な 1 週間の加速度データと温度データを図 4-3～図 4-5 に示す。モニタリングにおいて計測された加速度波形の時系列データは、固有振動数、固有モード、減衰定数の推定に用いる。これまでに観測された 2018 年 1 月 20 日、2018 年 5 月 9 日、2019 年 7 月 19 日の地震時における加速度応倍率を表 4-1 と表 4-2 に示す。これより、これまでの地震における加速度応答倍率は版築造民家で最大約 4、石積造民家で最大約 8 であることが分かる。

表 4-1：版築造民家の加速度応答倍率
（括弧内の数値は計測加速度 gal）

場所	2018/01/20			2018/05/09		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向
8:3階天井北西	2.66 (4.55)	-	-	2.98 (4.95)	-	-
7:3階天井梁※	2.37 (4.05)	5.54 (6.77)	-	1.93 (3.20)	2.46 (4.21)	-
6:3階天井	3.91 (6.69)	1.59 (1.95)	1.72 (2.32)	2.29 (3.80)	1.96 (3.35)	1.55 (2.65)
5:3階床北西	1.98 (3.38)	-	-	1.55 (2.57)	-	-
4:3階床南	2.00 (3.43)	1.79 (2.18)	-	2.82 (4.69)	1.62 (2.78)	-
3:3階床	2.16 (3.69)	1.41 (1.72)	-	1.76 (2.91)	0.84 (1.44)	-
2:2階床壁北	1.53 (2.63)	1.08 (1.32)	-	1.56 (2.59)	1.27 (2.17)	-
1:地面	1.00 (1.71)	1.00 (1.22)	1.00 (1.35)	1.00 (1.66)	1.00 (1.71)	1.00 (1.70)

※木材に設置

表 4-2：石積造民家の加速度応答倍率
（括弧内の数値は計測加速度 gal）

場所	2019/07/19		
	X方向	Y方向	Z方向
6:R階東面壁南	7.90 (43.96)	-	-
5:R階北面壁西	-	4.79 (33.35)	-
4:R階北東角	3.30 (18.35)	2.40 (16.91)	2.34 (7.88)
3:3階床北東角	2.52 (14.05)	1.56 (10.84)	-
2:2階床北東角	1.70 (9.44)	1.16 (8.09)	-
1:地面	1.00 (5.57)	1.00 (6.96)	1.00 (3.38)

(2-2) 材料実験

版築の耐震性向上を図ることを目的に、φ100×200mm の円柱供試体で、突き固め層数や突き固め回数、消石灰やセメントの添加が版築の圧縮強度に及ぼす影響を検討した。土の調合を表 4-3 に示す。土の乾燥密度と突固め時の含水率は密接な関係があることが知られていることから、乾燥密度が概ね最大となる含水率を最適含水率(w)（土のみでは15%）と定義し、供試体を作製した。なお、セメントと消石灰を添加する場合、最適含水率に調整した土に対して所定の量を添加し、土と混合した（土(w)＋セメント、土(w)＋消石灰)。消石灰については、土と消石灰を混合した状態で最適含水率となるように加水したもの（土＋消石灰)(w))も作製した。本実験に用いた土は、粘土と珪砂を気乾状態の質量比で 1:0.5 の割合で混合したもの（密度：2.62g/cm^3）とした。また、強度向上を図る目的で、普通ポルトランドセメント、工業用消石灰 2 号を用いた。

試験体は、φ100×200mm の鋼製型枠を用いて、JIS A 1210:2009 に規定される 2.5kg のランマーにより、落下高さ 30cm で、6 層に分け、各層 25 回の条件で突き固めた。突き固め条件を検討する実験では、①一層の突き固め回数を 25 回として層数を 4、6、8、10 層としたもの、②層数を 6 層として一層の突き固め回数を 15、25、50、75 回としたものを作製した。突き固めが終わった試験体は、成形した直後に型枠を取り外し、気中養生（20±2℃、R.H.60±5%）および封かん養生（20±2℃）を行った。気中養生は版築表層、封かん養生は乾燥が不十分な版築内部の状態を模擬している。また、消石灰を添加する試験体については、期待する硬化メカニズムから、本実験では全試験体を促進炭酸化槽（20±2℃、R.H.60±5%、CO_2 濃度 5±0.2%）に入れて、乾燥と促進炭酸化を行った。所定の材齢を経過した試験体について、圧縮強度試験をコンクリートにおける当該 JIS の方法を準用して行った。

実験結果より、セメントの添加は版築表層では効果がでないものの、乾燥の緩やかな内部では強度向上に効果が期待できることが示された（図 4-6)。一方、消石灰の添加は量が多くなるに従い若干強度が大きくなるものの、消石灰添加 10%以下では、土のみの試験体よりもむしろ強度が小さく、添加量 20%時も効果が極めて限定的であることから、消石灰の添加による強度向上対策は意味がないことがわかった（図 4-7)。図 4-8 と図 4-9 より、土のみの試験体では、突き固め層数と突き固め回数に対し、圧縮強度は極大値をもち、突き固め条件により 1.5 倍程度の強度の違いが生じた。一方、セメントを添加した封かん試験体では、突き固め層数が多いほど圧縮強度は大きくなった。また、突き固め回数と圧縮強度の関係は、実験の範囲では 15 回の時大きいが、25 回以上ではそれよりも小さくほぼ一定であった。一回の突き固め回数が過度にならない範囲で、層数を増やすと効果があることがわかった。

表 4-3：土の調合

	固化材添加量（%）	単位量(Kg/m³)			
		土		固化材	水
		粘土*2	珪砂*2		
土のみ	0	1221	660	0	282
土(w*1)+セメント	5	1184	639	98	273
	10	1148	620	190	265
	20	1083	585	359	250
土(w*1)+消石灰	5	1169	631	97	270
	10	1120	605	185	259
	20	1034	559	343	239
（土+消石灰）	1	1184	640	20	295
	3	1136	614	56	307
	5	1091	589	90	319
	10	1014	548	168	329
	20	901	487	298	337

*1 w:最適含水率、*2 乾燥状態の単位量

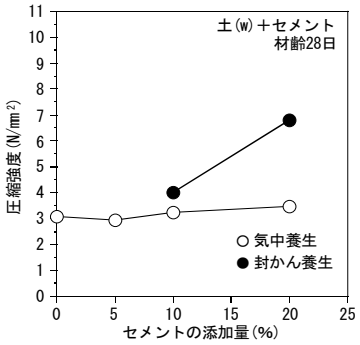


図 4-6:セメントの添加量と圧縮強度の関係

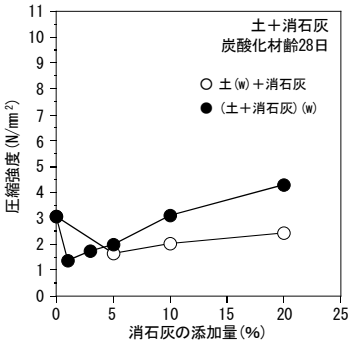


図 4-7：消石灰の添加量と圧縮強度の関係

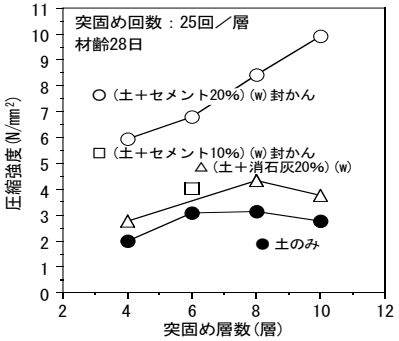


図 4-8：突固め層数と圧縮強度の関係

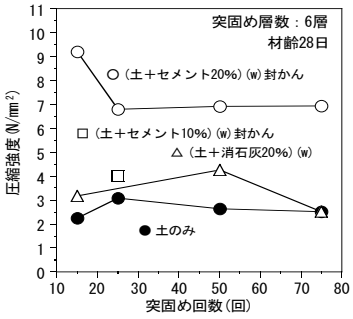


図 4-9:突固め回数と圧縮強度の関係

次に、最適含水率で製造した版築試験体の強度性状を確認し、調合上の水量と強度との関係を検討した。また、乾燥温度が版築の材料特性に及ぼす影響について検討した。加水率実験においては、土（粘土+珪砂）に対して 7、11、15、19%の加水率で混合・作製し、20℃・60%の恒温恒湿室で養生した。また、乾燥温度シリーズの実験として、加水率 15%で作製した試験体を各々5、12、20、27、35℃と設定した恒温室で養生を行った。試験体は、材齢 14、28、56、91、182 日に圧縮強度試験と含水率を測定した。本実験で使用した土は、粘土と珪砂 5 号を気乾状態の質量比で「1:0.5」で混合したものとした。混合水は噴霧器を使用して上水道水をミスト散布の形で加水した。

試験体はφ100×200㎜の円柱供試体レベルで、鋼製型枠を用いて「JIS A 1210:2009」に規定される 2.5kg のランマーにより、落下高さ 30㎝で、6 層に分け、各層 25 回の条件で突き固めた。突き固めが終わった試験体は、成形した直後に型枠を取り外し、各恒温室で養生を行った。ただし、乾燥温度 27℃と 35℃の試験体においては、急激な乾燥でひび割れが生じることを防ぐため、材齢 14 日までは 20℃の恒温室で乾燥させた。

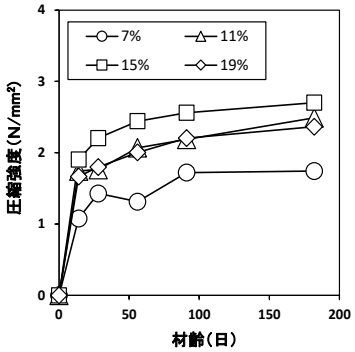


図 4-10：加水率による圧縮強度発現

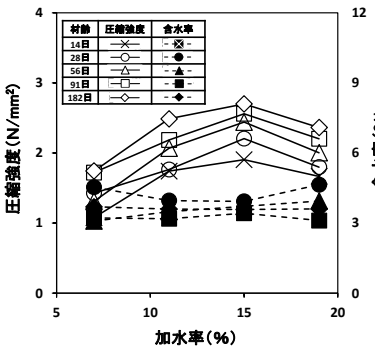


図 4-11：加水率による圧縮強度と含水率

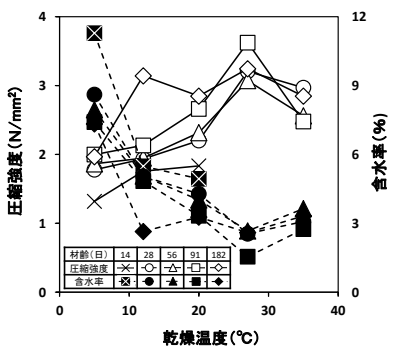


図 4-12：乾燥温度による圧縮強度と含水率

実験結果より、加水率の影響は、15%の試験体がすべての材齢で最も高い強度を示し、7%の試験体は一番低い強度を示した（図 4-10）。同じ乾燥条件では、加水率の変化が強度性状には影響を及ぼすが、乾燥した試験体の含水率には影響を与えないことが確認された（図 4-11）。調合が同じ場合、乾燥温度により圧縮強度と含水率が大きく変化し、含水率が小さいほど強度は高くなった（図 4-12）。

模擬版築ブロックから小径コアを乾式で採取し、深さ毎に絶乾により含水率を測定するとともに、あらかじめ埋めておいたセラミックセンサおよびドリルで削孔し、削孔孔に挿入した電極の電気的特性値を表面からの深さに応じて測定した。電気的特性値と版築の含水率の関係ーキャリブレーションカーブーを作成し、これらから含水率分布を推定・補完した。版築の内部含水率を非破壊で電気的特性値から推定するシステムを提案した（図 4-13）。また、現場で採取したコアのヤング係数まで測定できるように、圧縮強度試験機の改良を行った（図 4-14）。(2-3)の実験で補強に使用されたメッシュの耐久性に関する実験を実施する。

図 4-13：電極を用いた版築の含水率分布の測定

図 4-14：現場採取コアの圧縮強度試験機の改良

(2-3) 実大試験体静的・動的実験

実大民家の静的載荷実験の実施に先立ち、まず RC 造の反力棟および実大民家試験体の設計を行った。また、動的実験に用いる振動台の設置作業を行った（図 4-15)。

実大既存民家試験体として版築造 3 棟、石積造（マッドモルタル）1 棟を作製し、最初に無補強の状態で弾性範囲内の静的載荷実験を行った（図 4-16)。試験体はブータン王国における伝統的民家の典型的な形状とし、1 階が全周壁、2 階が前面に大きな開口を有する 2 階建とした。建物の形式と部材寸法は 4 棟とも同一とした。版築造民家は 1 棟を長辺方向（RE-LONG)、2 棟を短辺方向（RE-SHORT)、石積造民家は短辺方向（SMM-SHORT）に載荷した。

次に、載荷後の試験体にワイヤーメッシュとセメントモルタル、水平バンドによる耐震補強を施し（図 4-17、図 4-18)、最大荷重に達するまで再度載荷を行った。なお、無補強の石積造民家は耐力が低く、弾性範囲内の載荷で崩壊する可能性があったため、耐震補強後の試験体のみ載荷した。耐震補強には 2 種類のワイヤーメッシュを用いた。12 ゲージのワイヤーメッシュ（12G, φ2.0mm）を壁面に使用し、16 ゲージのワイヤーメッシュ（16G, φ1.2mm）をコーナー部や高さ方向の継ぎ目位置に使用した。高さ方向の継ぎ目位置では 300mm、コーナー部では 600mm ワイヤーメッシュを重ねて施工した。石積造民家では、ワイヤーメッシュは直径 8mm のダボを 1200mm ピッチで壁面にアンカーすることで固定した。版築造民家では、直径 12mm の全ねじボルトを壁面の穴に通し両側からナットで固定した。仕上げに 30mm 厚のセメントプランター（セメント：砂＝1:3）をワイヤーメッシュの上から施工した。床構面の補強として、75mm 角の木材を X 型に配置し、床梁に固定した。筋交いの交点と床梁との接合部はボルトで固定した。版築造民家は面内方向のみ、石積造民家は面内方向と面外方向にワイヤーメッシュによる耐震補強を施した。水平バンド補強には直径 12mm のワイヤーを用い、2 階床レベルと 2 階天井レベルで隅角部にアングルプレートを当てて四周回したうえで、ターンバックルで締め付けた。

実大新築民家試験体として版築造 1 棟、石積造（セメントモルタル）1 棟、石積造（マッドモルタル）1 棟を作製し、同様に静的載荷実験を行った。建物の形式と部材寸法は実大既存民家試験体と同様とした。構造補強として鉛直方向に約 1m 間隔で・75mm の鉄筋コンクリートの柱、2 階床レベルと 2 階天井レベルに 600×150mm の鉄筋コンクリートの水平バンドをそれぞれ壁内に配置した（図 4-17、図 4-18)。石積造（マッドモルタル）試験体は石材の崩落防止のため直径 4mm のワイヤーを用いた蛇籠の中に石材を詰め、蛇籠同士は螺旋状のワイヤーで接合した。

図 4-15：振動台基礎

図 4-16：実大民家の静的載荷実験

(a) 既存版築造民家のメッシュ補強

(b) 新築版築造民家

(c) 既存版築造民家の水平バンド補強

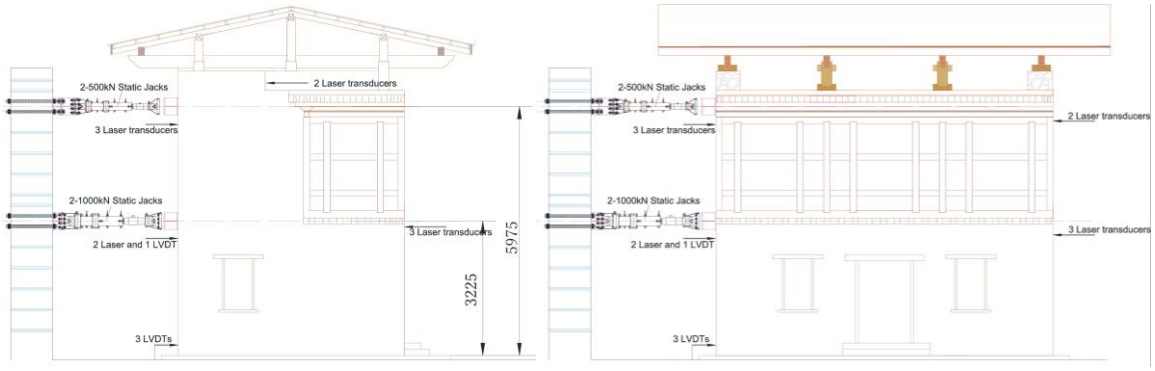
図 4-17：版築造民家の補強方法

(a) 既存石積造民家（マッドモルタル）のメッシュ補強

(b) 新築石積造民家（セメントモルタル）

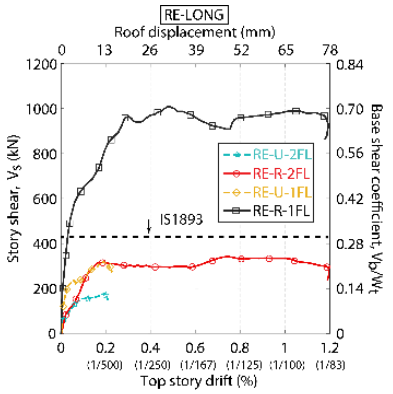
(c) 新築石積造民家（マッドモルタル）

図 4-18：石積造民家の補強方法

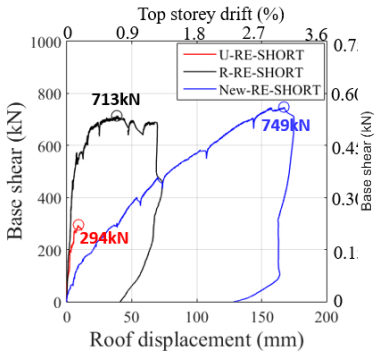


（a）短辺方向　　（b）長辺方向

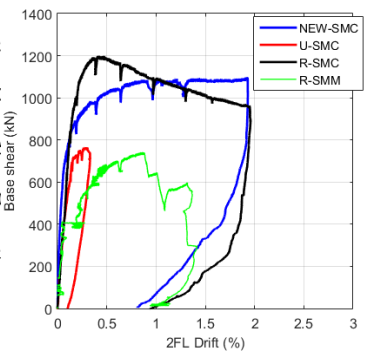
図 4-19：載荷方法



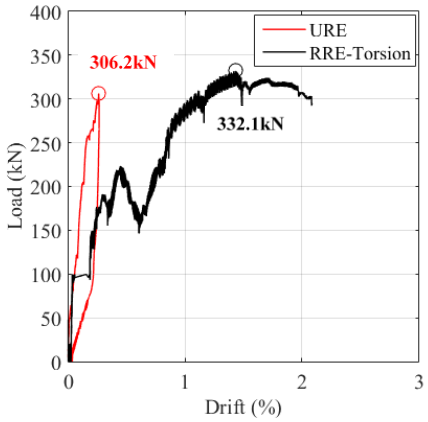
（a）版築造長辺
（メッシュ補強）



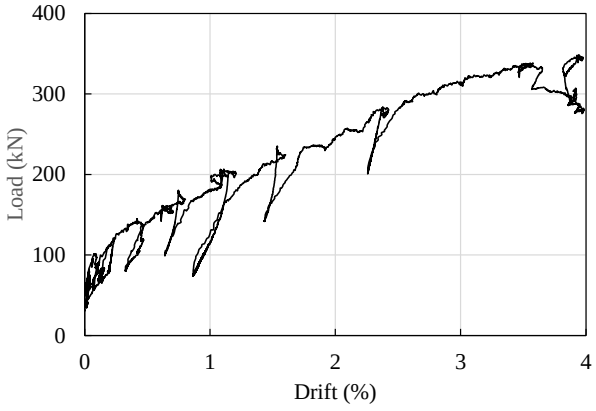
（b）版築造短辺
（メッシュ補強、新築）



（c）石積造短辺
（メッシュ補強、新築セメントモルタル）



（d）版築造短辺（水平バンド補強）



（e）石積造短辺（新築マッドモルタル）

図 4-20：実大民家の静的載荷実験結果

載荷方法を図 4-19 に示す。4 本のジャッキを用いて単調載荷を行い、各階の変形角が同一になるように目標変位まで載荷した。無補強試験体では 1/2000、1/1000、1/750、1/500rad、補強試験体ではそれらに加えて 1/250、1/150、1/100、1/80rad の変形角においてそれぞれ損傷観察を行った。

図 4-20 に各建物、各階の荷重-変形角曲線を示す。版築造民家の長辺方向では、無補強の場合は 1 階の最大荷重は 309kN、補強後は 1004kN と約 3.2 倍に上昇した。版築造民家の短辺方向では、無補強の場合は 1 階の最大荷重は 294kN、ワイヤーメッシュ補強後は

713kN と約 2.9 倍に上昇した。また、水平バンド補強の場合、無補強の場合は 1 階の最大荷重は 306kN、水平バンド補強後は 332kN と約 1.1 倍に上昇した。ワイヤーメッシュ補強後の石積造民家（マッドモルタル）の短辺方向では、1 階の最大荷重は 783kN であった。新築民家（版築造およびセメントモルタル石積造）は、それぞれワイヤーメッシュ補強後の既存民家と同程度の荷重であった。

図 4-21 に示すように動的実験では、静的載荷実験に用いた実大民家試験体の 1/6 スケールの試験体を用いた。試験体は、まず版築造 2 体、石積造（マッドモルタル）2 体ずつを 2 セット作製し、1 体は無補強、もう 1 体は静的載荷実験と同じ耐震補強を施し、短辺方向と長辺方向にそれぞれ加振した。図 4-22 に示すように、無補強試験体と耐震補強試験体を 2 体同時に加振した。次に、新築版築造と新築石積造（セメントモルタル）を 2 セット作製し、短辺方向と長辺方向にそれぞれ加振した。実験結果の一例として、図 4-23 と図 4-24 に版築造の無補強試験体と耐震補強試験体の短辺方向加振時の振動台上と背面の版築壁頂部中央における時刻歴加速度波形をそれぞれ示す。加速度応答倍率はいずれの場合も 2.5 程度であることがわかる。図 4-25 と図 4-26 に各試験体の破壊性状をそれぞれ示す。無補強試験体の側面では 2F 床レベルの水平方向のひび割れ、背面では鉛直方向のひび割れが確認された。一方、補強試験体ではほとんどひび割れは確認されなかった。

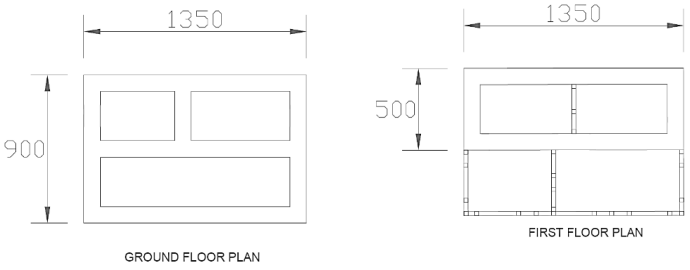
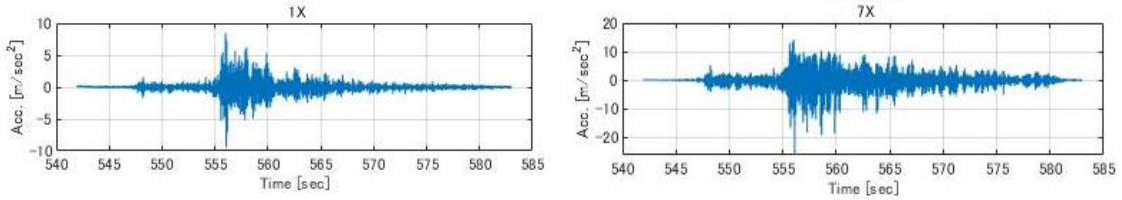


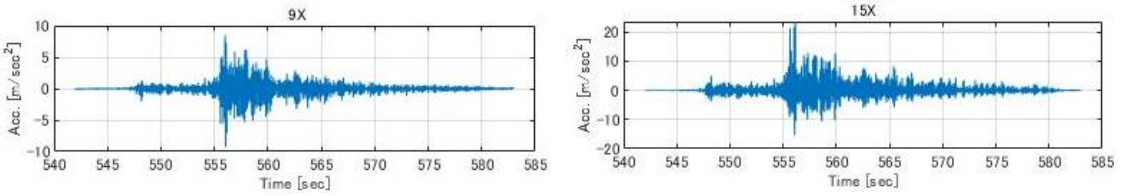
図 4-21：縮小民家試験体図面

図 4-22：振動台実験



(a) 振動台上　　(b) 背面壁頂部

図 4-23：実験結果（無補強版築造試験体）



(a) 振動台上　　(b) 背面壁頂部

図 4-24：実験結果（補強版築造試験体）

図 4-25：破壊性状（無補強版築造試験体）

図 4-26：破壊性状（補強版築造試験体）

(2-4) 構造解析

版築の要素試験、引き倒し実験、静的実大実験に関して、有限要素法による汎用構造解析システム DIANA を用いた構造解析を実施し、解析法を確立する。図 4-27 に示す 5 段の版築壁試験体を対象に構造解析を実施し、実験結果の再現性を検討した。試験体形状は版築壁民家を模した 1 辺の長さ 5400mm のロの字型とし、1 つの版築ブロックの大きさは 600×600×2400mm である。試験体前面のみ 5 段、その他 3 辺は 2 段積みとした。引き倒し実験は版築壁体の面外方向を対象とした。試験体と重機をワイヤーで接続し、重機が後退することによってワイヤーで試験体を引き倒した（図 4-28)。加力点となる試験体前面の版築ブロック 5 段目中央の表と裏面に木製の当て板を打ち付け、ワイヤーが一結びとなるように試験体に括りつけた。荷重はワイヤー間に挿入した引張型荷重計（東京測器研究所製：TLP-200KNB）を介して計測した。荷重計はシャックル（東京測器研究所製：FH-20B）を用いてワイヤーと接続し、超小型動ひずみレコーダ（東京測器研究所製：DC-104R）で変位計と同期させて測定した。変位計は前面の版築ブロックの 1 段目と 5 段目の中央と両端にそれぞれ 3 カ所、3 段目の中央に 1 カ所、計 7 カ所設置した。

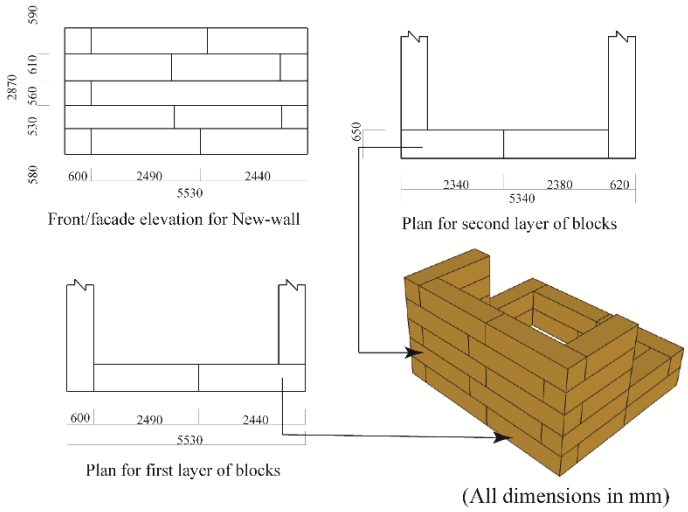


図 4-27：解析対象の試験体概要

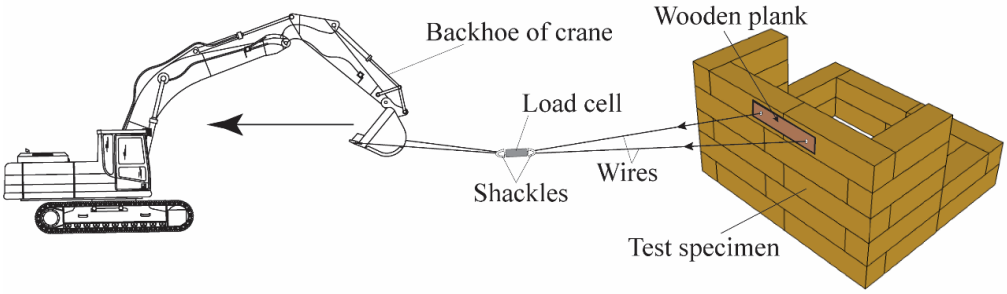
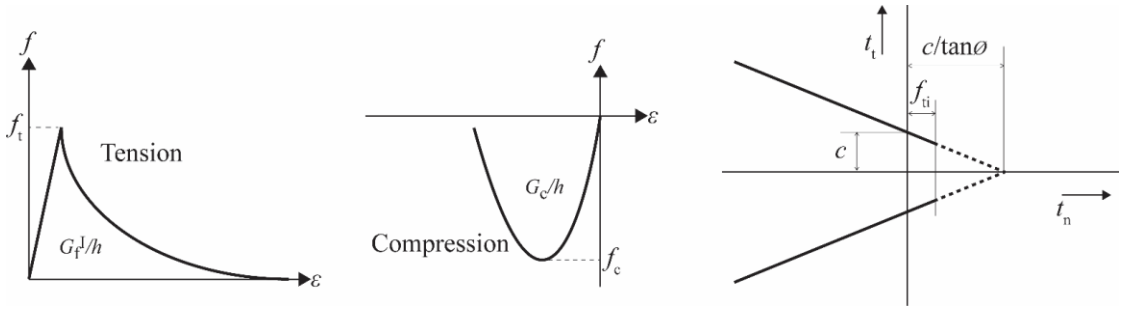


図 4-28：引き倒し実験の方法



（a）引張側　（b）圧縮側　（c）接触要素

図 4-29：弾塑性モデル

解析モデルは、版築ブロック間に接触要素を挿入し、版築ブロック自体のひび割れだけでなく、版築ブロック間の滑動や離間を再現した micro モデルと、接触要素を挿入しない macro モデルの 2 種類とした。構造解析に用いた材料定数は、既往の文献や別途実施した材料実験結果に基づいて設定し、弾塑性モデルは図 4-29 に示す構成則を用いた。図 4-30 に有限要素解析モデルを示す。境界条件は地盤面をピンとし、直交壁の端部は y 方向のみ拘束した。背面壁は変形が十分に小さいため解析モデルでは考慮していない。

図 4-31 に解析結果と実験結果の荷重-変位曲線の比較、図 4-32 に実験における破壊性状を示す。

解析結果と実験結果の荷重-変位曲線は両モデルとも概ね一致し、ひび割れが生じるまでは荷重が上昇し続け、最大荷重を迎えてひび割れが発生すると急激に荷重が低下する傾向を再現できていた。図 4-33 と図 4-34 に解析結果におけるひび割れ発生状況を示す。実験での破壊性状は前面壁が面外方向へ崩壊し、コーナー部で直交壁と分離した。micro モデルでは接触要素を挿入しているためこの現象を再現できているが、macro モデルでは版築ブロック間の離間を考慮していないため再現できていないことがわかる。

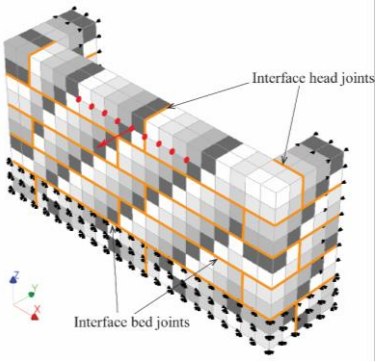


図 4-30：解析モデル

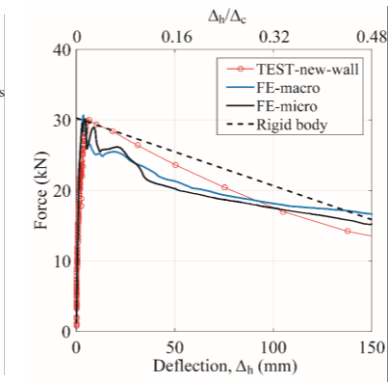


図 4-31：解析結果と実験結果の比較

図 4-32：実験における破壊性状

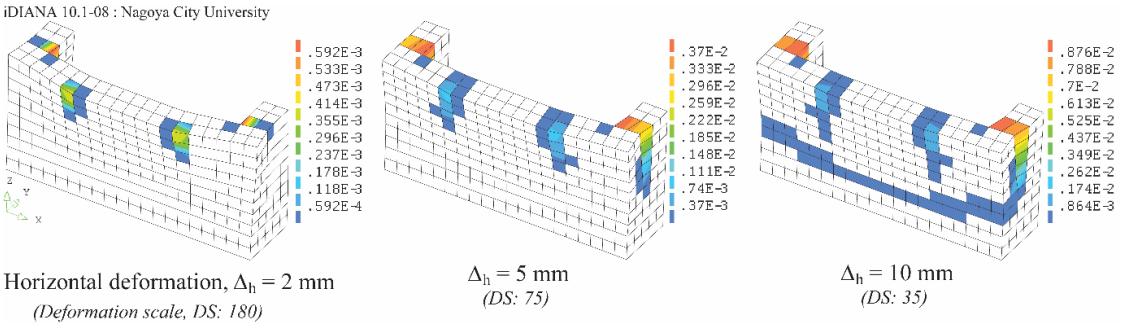


図 4-33：ひび割れ発生状況（macro モデル）

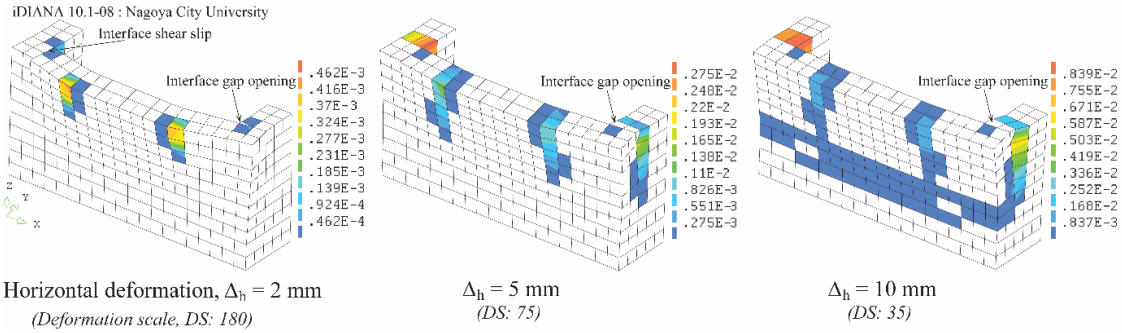
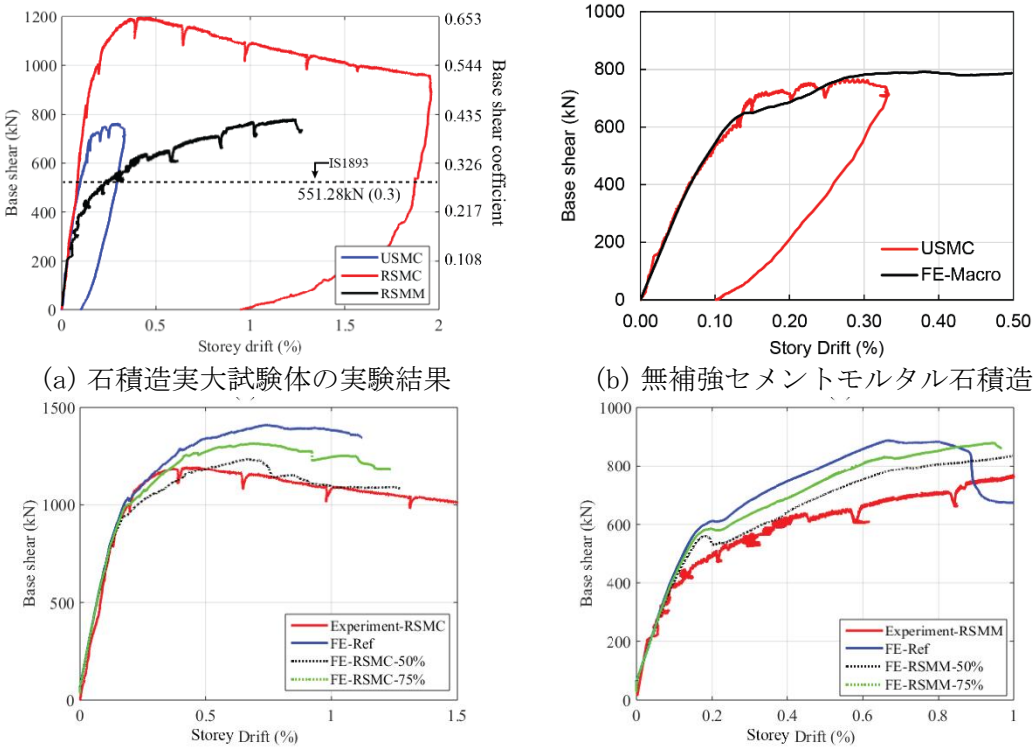


図 4-34：ひび割れ発生状況（micro モデル）

次に、図 4-35 に示す石積造の実大実験を対象に構造解析を実施し、実験結果の再現性を検討した。構造解析に用いた材料定数は、既往の文献や別途実施した材料実験結果に基づいて設定した。図 4-36 に解析結果と無補強セメントモルタル石積造、補強セメントモルタル石積造、補強マッドモルタル石積み造の実験結果の荷重－変位曲線の比較を示す。解析結果と実験結果の荷重-変位曲線はすべてのモデルとも概ね一致し、構造解析で石積造の荷重－変位関係を再現できた。

(a) 載荷方法　　(b) 実大試験体　　(c) 有限要素解析モデル

図 4-35：石積造実大試験体



(a) 石積造実大試験体の実験結果　(b) 無補強セメントモルタル石積造

(c) 補強セメントモルタル石積造　(d) 補強マッドモルタル石積造

図 4-36：石積造実大試験体の解析結果

(2-5) 耐震診断法（国内）

世界銀行 PHRD プロジェクトで提案した「国土交通省住宅局建築指導課監修 2001 年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針・同解説，日本建築防災協会」をベースとする版築建築の耐震診断法に基づき、日本およびインドの組積造建築物の耐震診断法を参考に、版築壁の面内方向および面外方向について耐震診断法を提案した。静的載荷実験に用いた実大民家試験体に適用し、診断法を試行した。面内方向の耐震診断では、面内方向の版築壁に生じるせん断応力度と版築のせん断強度を比較した。地震層せん断力は、インドの耐震診断法における設計用水平震度に日本の耐震診断法における地震層せん断係数の高さ方向分布を表す係数を乗じて設定した。図 4-37(a)～(d)に示す版築壁に対する診断の結果、面内方向の各版築壁に生じるせん断応力度は、短辺方向、長辺方向ともに版築のせん断強度を下回った。面外方向の耐震診断では、地震時に版築壁に生じる曲げモーメント分布を求め、版築壁の終局曲げモーメントと比較した。地震時の版築壁の曲げモーメント分布は、地盤面を固定端とし、片持ち梁に地震力が等分布荷重として作用している静定構造物として考えた（図 4-38(a)）。図 4-37(e)と(f)に示す版築壁に対する診断の結果、診断対象の版築壁①～③いずれも生じる曲げモーメントが終局曲げモーメントを大きく超えており、耐震性能が不足していた（図 4-39）。

耐震診断の結果、面外方向の耐震性能が不足していたため、耐震補強工法としてこれまで検討してきたメッシュ補強と床梁接合部補強を実大民家試験体に適用し、補強後の面外方向における版築造民家の耐震性能評価を行った。床梁接合部を補強した場合、壁体の支持条件は地盤が固定端、2 階床と 2 階天井をローラーとし、地震力が等分布荷重として作用している不静定構造物として考えた（図 4-34(b)）。図 4-33(e)と(f)に示す版築壁に対する診断の結果、診断対象の版築壁①～③いずれも生じる曲げモーメント分布が終局曲げモーメント以下となり、安全性が確認された（図 4-35）。

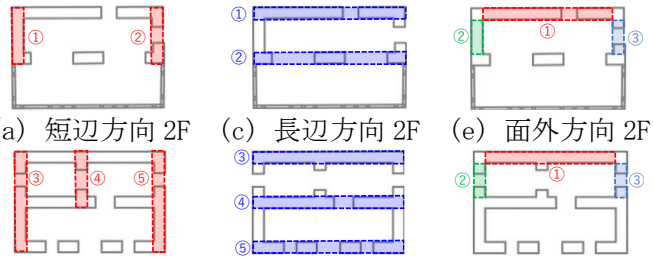
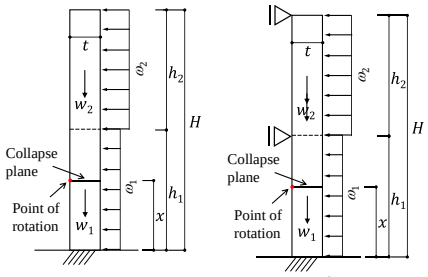
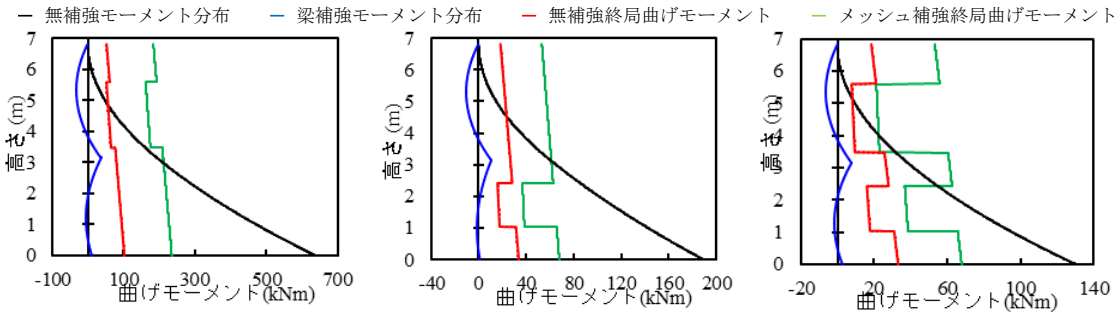


図 4-37：診断対象壁



(a) 現状　(b) 補強後

図 4-38：力学モデル



(a) 版築壁①　(b) 版築壁②　(c) 版築壁③

図 4-39：面外方向の耐震診断結果

(2-6) 耐震補強キットの開発

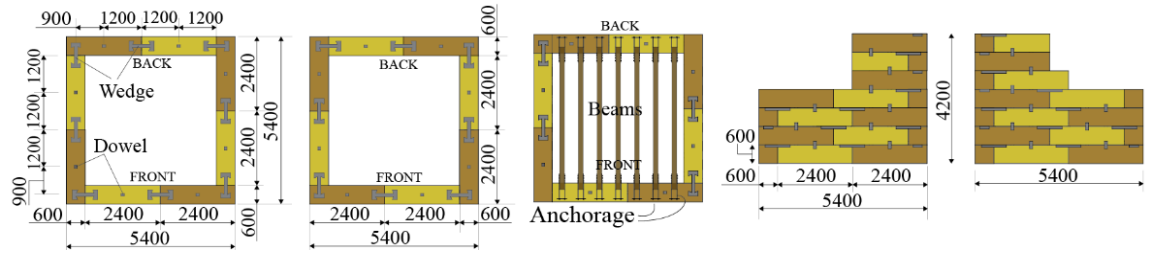
耐震補強キットの開発および補強した実大民家の試験体設計に向けた準備として、版築造や石積造の要素試験体を用いた載荷実験や、版築壁や石積造壁を用いた引き倒し実験を行った。

2-6-1) 7 段版築壁試験体の引き倒し実験

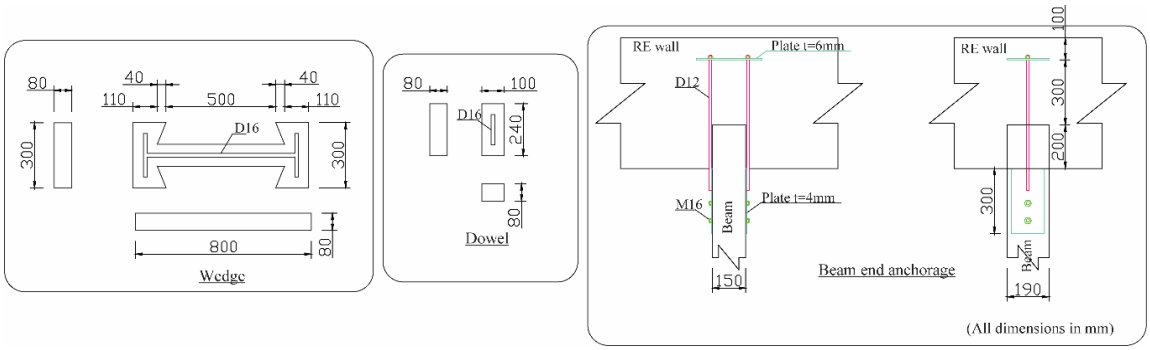
7 段版築壁試験体の引き倒し実験では、水平方向と鉛直方向のブロック間の接合強度を高める鉄筋コンクリート造のダボ・楔や、床梁と版築壁の接合強度を高める鉄筋とボルトを用いた補強の効果を検証した。試験体は補強無しの試験体（U-RE）と補強ありの試験体（R-RE）の 2 種類で、形状、寸法は両試験体とも同様である。試験体図面を図 4-40 に示す。試験体形状は版築壁の民家を模した 1 辺の長さ 5400mm のロの字型とし、1 つの版築ブロックの大きさは 600×600×2400mm で、高さ方向の層は 2 階建ての民家と同程度の高さとなる 7 段（4200mm）とした。両試験体とも作製期間が約 2 ヶ月で、試験体完成後、1 回目の引き倒し実験日である 2017 年 5 月 18 日までの約 6 ヶ月間、2 回目の引き倒し実験日である 2017 年 9 月 20 日までの約 9 ヶ月間をそれぞれ養生期間とした。直交壁や曲げ変形の影響と壁高さによる引き倒し荷重の変化を把握するため、試験体前面は 7 段、背面は 4 段積みとした。試験体 R-RE では版築ブロック間の水平方向を補強する楔を最上段に 1 か所ずつ、版築ブロック間の鉛直方向を補強するダボを等間隔で版築ブロック 1 つにつき 1 ヵ所ずつ設置した。楔には、版築ブロック同士が載荷時に水平方向に離れないように、端部に勾配を設けた。また両試験体について、床による拘束効果を検証するために幅 150mm、成 190mm の木製床梁を高さ 1800mm に面外方向に等間隔で設置した。試験体 R-RE では床梁と版築ブロックとの接合部の引張性能を補強するために、縦 150mm、横 300mm、厚さ 4mm の鉄製プレートと梁を M16 ボルトで固定し、プレートに直径 12mm の鋼棒を溶接した。さらに、意匠性に配慮して版築壁内部で縦 200mm、横 300mm、厚さ 6mm の鉄製プレートと直径 12mm の鋼棒を M16 ボルトで接合した。

図 4-41 に引き倒し実験の概略図を示す。版築壁の引き倒し実験は面外方向を対象とし、版築壁の頂部とワイヤーで接続し、重機が後退することによってワイヤーで版築壁を引

き倒した。引き倒し実験は試験体前面の 7 段を引き倒す 1 回目(Pull-down-1)と、背面の 4 段を引き倒す 2 回目(Pull-down-2)の計 2 回行った。引き倒し実験の 1 回目は高さ 3.9m の 7 段目中央部にワイヤーを接続し、2 回目は高さ 1.5m の 4 段目中央部にワイヤーを接続した。荷重はワイヤー間に挿入した引張荷重計（東京測器研究所製：TLP - 200KNB）を介して計測した。荷重計はシャックル（東京測器研究所製：FH - 20B）を用いてワイヤーと接続し、超小型ひずみレコーダ（東京測器研究所製：DC - 104R）で変位計と同期させて測定した。試験体が 7 段の場合は、変位計を前面の計 9 ヶ所に設置した。4 段の場合は前面の 2、4 段目、背面の 2 段目の中央と両端にそれぞれ 3 ヶ所、計 9 ヶ所設置した。



(a) 平面図・立面図



(b) 補強詳細図

図 4-40：7 段版築壁試験体（R-RE）

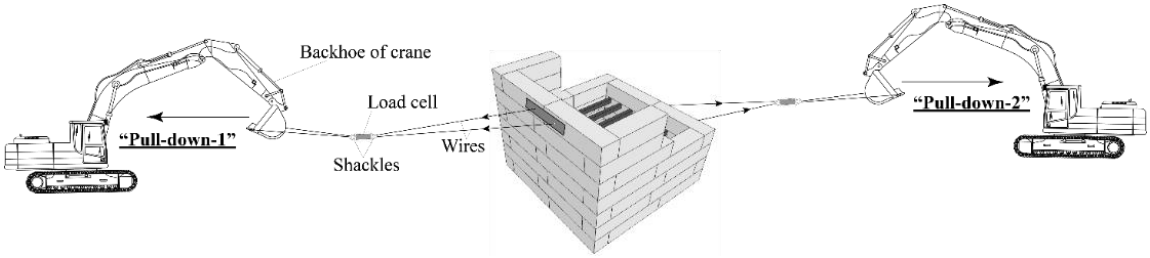
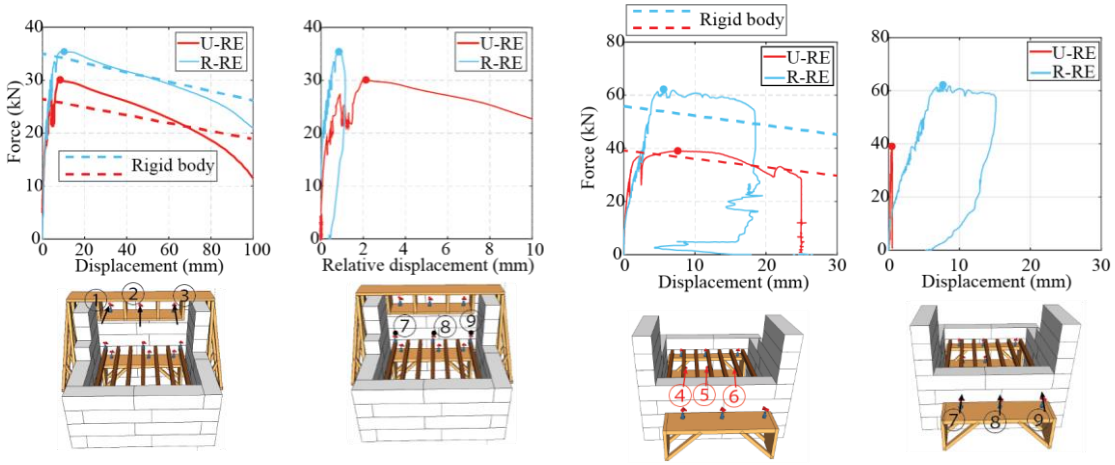


図 4-41：引き倒し実験の様子



(a) 7 段引き倒し　　(b) 4 段引き倒し

図 4-42：荷重-変位曲線の比較

(a) 7 段引き倒し　　(b) 4 段引き倒し

図 4-43：破壊性状

図 4-42 に荷重-変位曲線の比較、図 4-43 に破壊性状を示す。1 回目(Pull-down-1)の引き倒し実験では、補強無しの試験体(U-RE)の最大荷重は 30.1kN、補強ありの試験体(R-RE)の最大荷重は 35.4kN であり、補強によって約 18%上昇した。補強無しの試験体（U-RE）の破壊性状は、版築ブロックの 3～4 段目（床梁レベル）より上の前面壁が面外方向へ崩壊し、両側の直交壁と前面壁が分離した。一方、補強ありの試験体（R-RE）の破壊性状は、5 段目（床梁レベル）より上の前面壁が面外方向へ崩壊したが、右側のコーナー部では直交壁と前面壁は分離せず、補強により破壊性状に変化が見られた。2 回目(Pull-down-2)の引き倒し実験では、補強無しの試験体（U-RE）の最大荷重は 39.2kN、補強ありの試験体（R-RE）の最大荷重は 62.5kN であり、補強によって約 59%上昇した。補強無しの試験体（U-RE）の破壊性状は、前面壁が一体となって面外方向へ崩壊し、直交壁と分離し、床梁が版築壁内から引き抜けた。一方、補強ありの試験体（R-RE）の破壊性状は、補強した床梁より下側の前面壁が面外方向へ崩壊し、コーナー部では直交壁と前面壁は分離せず、補強により破壊性状に変化が見られた。

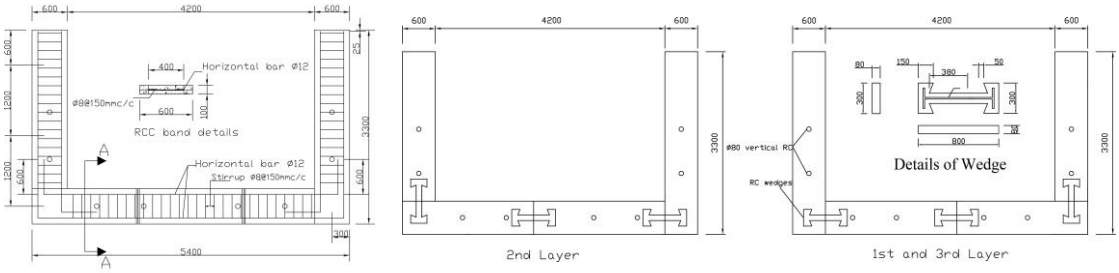
2-6-2）4 段版築壁試験体の引き倒し実験

既存および新築版築造の耐震補強効果の検証のため、実大版築壁試験体の引き倒し実験を行い、破壊性状の確認と耐震補強方法の有効性を検証した。既存の版築壁を想定した引き倒し実験では、木造フレームやワイヤーメッシュによる壁の面内方向の補強効果を検証した。新築の版築壁を想定した引き倒し実験では、水平方向と鉛直方向のブロック間の接合強度を高めるための鉄筋コンクリート造の柱・バンド・楔を用いた補強の効果を検証した。試験体の形状は長辺 5400mm、短辺 3300mm のコの字型であり、2400×600×600mm の版築ブロックで構成されている。試験体は図 4-44 に示すように 3 種類であり、RE-timber と RE-16G は既存建物の耐震補強、RE-New-RCDowel-Wedge は新築での実装を想定した耐震補強である。RE-16G は、16 ゲージの金網（φ1.2mm）とマッドモルタル（セメント 1：マッド 4）を用いて補強した。RE-timber は、木のフレームによって版築壁を

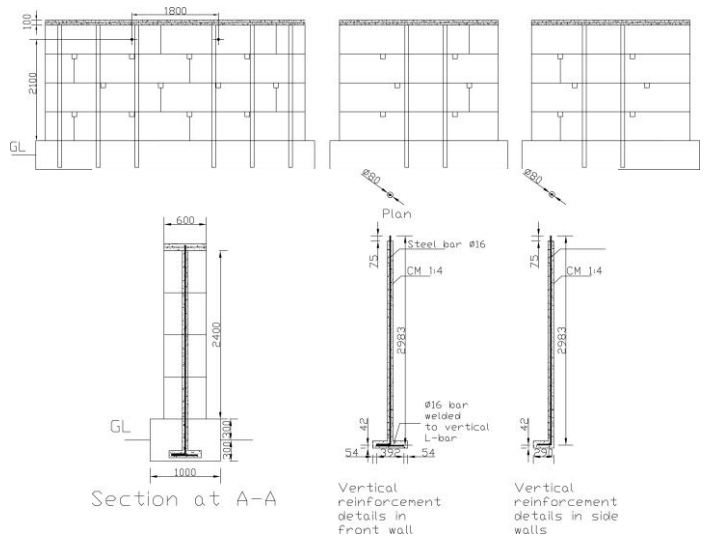
内側と外側から補強した。RE-New-RCDowel-Wedge は、壁体の上面に RC バンド補強、RC 楔を用いた版築ブロックの水平方向の接合の補強と鉛直方向接合補強を施した（図 4-45）。

（a）RE-16G　　（b）RE-timber　　（c）RE-New-RCDowel-Wedge

図 4-44：補強版築壁試験体の外観



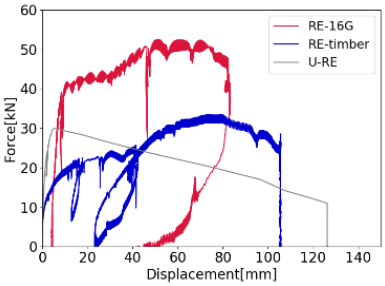
（a）RC バンド補強　　（b）楔による補強



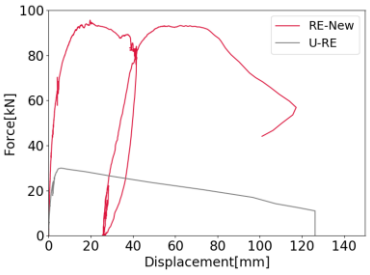
（c）鉛直方向の補強

図 4-45：補強詳細図

実験方法として、試験体の頂部にワイヤーを取り付け、ワイヤーを引っ張ることで試験体に引張力を与えた。壁とワイヤーの接合部には、木材の当て板を固定し、壁体と木材に孔を空けワイヤーを通した。ワイヤーのもう一端は重機に取りつけ、重機を後退させることで試験体を引き倒した。荷重はワイヤー間にロードセル（東京測器研究所製：TLP-200KNB）を設置し、動ひずみ測定器（東京測器研究所製：DS-50A）で変位計と同期させて記録した。変位計（東京測器研究所製：CH1、3、4、6-10：SDP-50C、CH2、5：SDP-100C）は合計 10 ヶ所に設置した。なお、RE-New-RCDowel-Wedge の変位計測には、レーザー変位計（キーエンス社製：IL-300）を用いた。これらの測定結果を無補強の版築壁試験体（U-RE）での実験結果と比較し、補強効果を検証した。



(a) RE-16G と RE-timber



(b) RE-New-RCDowel-Wedge

図 4-46：荷重-変位曲線の比較

(a) RE-16G

(b) RE-timber

(c) RE-New-RCDowel-Wedge

図 4-47：破壊性状

荷重-変位曲線の比較を図 4-46、破壊性状を図 4-47 に示す。RE-16G の最大荷重は 52.4kN であり、補強なしの約 1.7 倍であった。一方で、RE-timber の最大荷重は 33.48kN であり、補強によって靭性は増したものの、最大耐力にはほとんど変化が見られなかった。破壊性状として、RE-16G は壁の載荷点付近が引き抜かれるように崩壊した。RE-timber では木のフレームによって版築ブロックの滑りが抑えられており、フレームが破断し始めたときに壁全体が倒れるように崩壊した。RE-New-RCDowel-Wedge の最大荷重は 95.55kN であり、補強なしの約 3.19 倍であった。RE-New-RCDowel-Wedge は最上段と壁体中央部の版築ブロックが引き抜かれるように崩壊した。なお、このときバンド補強部の RC 要素は損傷していなかった。鉛直部材と RC バンドの定着がしっかりしていれば、最大荷重は上昇したと推測される。

2-6-3) 石積造壁試験体の引き倒し実験

既存および新築石積造壁の耐震補強効果の検証のため、実大石積造壁試験体の引き倒し実験を行い、破壊性状の確認と耐震補強方法の有効性を検証した。既存の版築壁を想定した引き倒し実験では、目地の種類（マッドモルタル・セメントモルタル）や、壁の一体性を高めるためのワイヤーメッシュによる壁の面内方向の補強効果を検証した。新築の石積造壁を想定した引き倒し実験では、壁の一体性を高めるためのメッシュボックスや鉄筋コンクリート造の柱・バンドを用いた補強の効果を検証した。

既存石積造壁の耐震補強効果検証の引き倒し試験では、石積造壁の頂部と重機をワイヤーで地面に対して水平方向に接続し、間に設置されたチェーンブロックを引くことで石積造壁を引き倒した（図 4-48）。試験体背面に変位計を設置し、頂部中央の変位計を結果に用いた。試験体は、既存の伝統的民家に使用されている土モルタルとセメントモルタルを基準とし、それぞれのモルタルで施工された補強なし（U-SMM、U-SMC）、鉄筋補強（R-SMM、R-SMC）、メッシュ補強（1.2-SMM、2.0-SMM、2.0-SMC）の合計 7 種類である。試験体は全て同じコの字状で、寸法は壁正面の幅 5.4 m、側面の長さ 3.3 m、高さ 2.4 m、壁厚 0.6 m である（図 4-49）。セメントモルタルの配合割合はセメント：砂＝1:3、鉄筋補強は直径 16 mm の異形鉄筋が試験体の中心に沿って 600 mm および 1200 mm 間隔で合計 10 本配置されている。メッシュ補強は、ワイヤーメッシュを石積造壁表面にアンカーロッドで固定後、セメントプラスターを 30 mm の厚さで塗り付ける（図 4-50、図 4-51）。

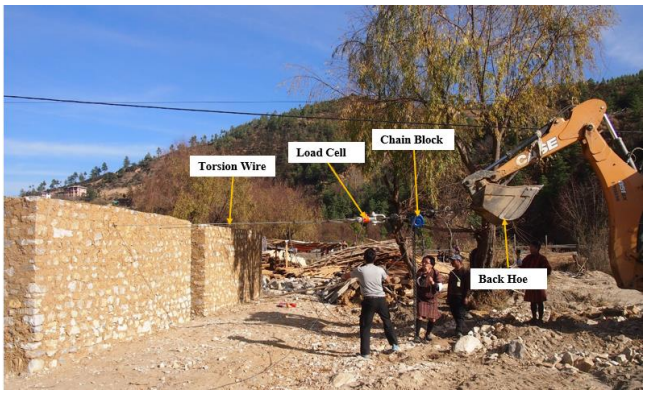


図 4-48：引き倒し実験の方法

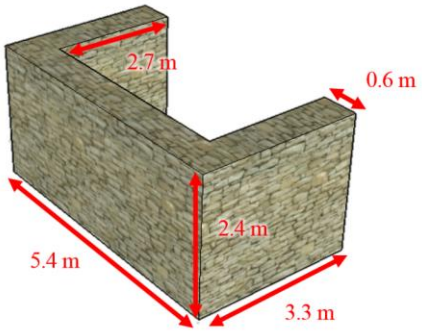


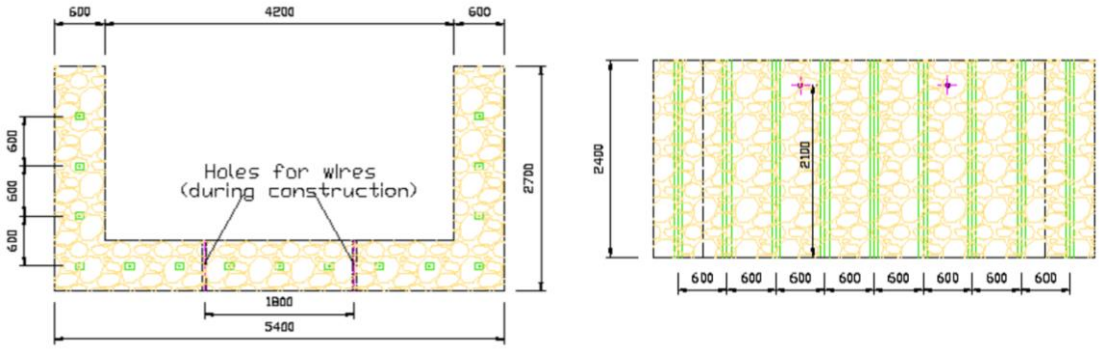
図 4-49：試験体概要

(a) U-SMM　　(b) 1.2-SMM

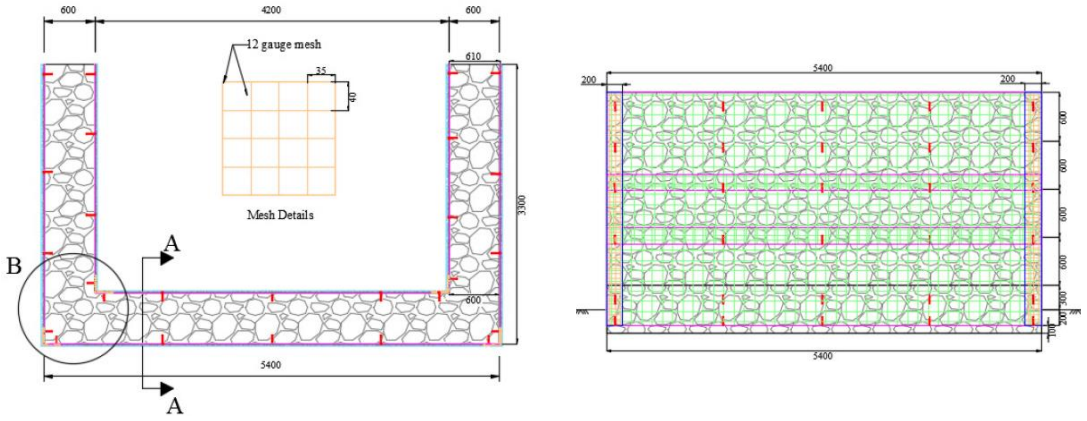
(c) ワイヤーメッシュ

図 4-50：石積造試験体外観

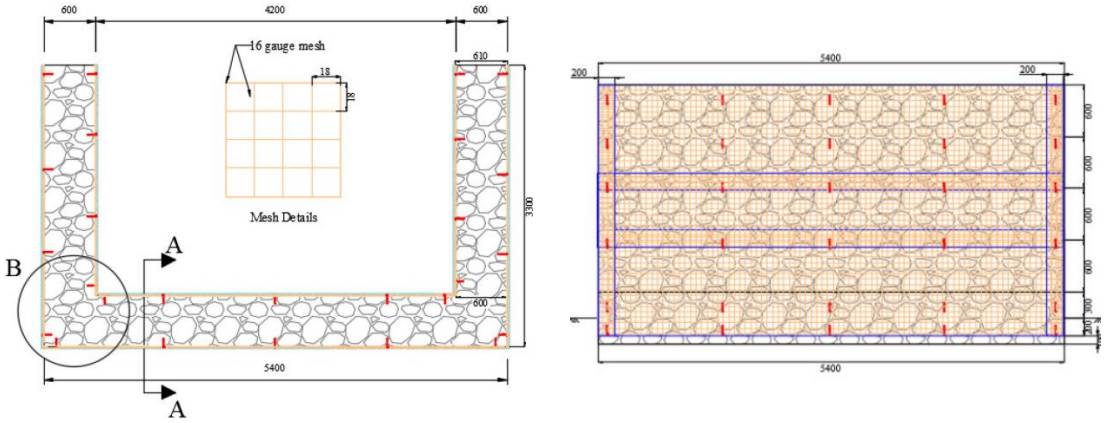
各試験体の荷重-変位曲線の比較を図 4-52、破壊性状を図 4-53 に示す。土モルタルの試験体において、U-SMM と R-SMM のどちらも石積造壁内における目地の接着強度が小さいためにコーン破壊となり、ほぼ同じ最大荷重を示した。1.2-SMM も同じくコーン破壊を示したが、これはメッシュの継ぎ目から破壊したと考えられ、最大荷重は補強なし（U-SMM）の約 3.1 倍となった。これはメッシュの石積造壁全体を対象とした一体化の補強効果と考えられる。2.0-SMM は石積造壁が一体となってコーナー部分から破壊し、最大荷重は 4 体の中で最大となり、補強なし（U-SMM）の約 5.1 倍であった。セメントモルタルの試験体において、U-SMC は曲げ破壊、R-SMC は石積造壁が一体となってコーナー部から破壊した。2.0-SMC は、メッシュの継ぎ目から破壊したが、石積造壁のコーナー部も破壊した。R-SMC の最大荷重は U-SMC の約 1.7 倍、2.0-SMC の最大荷重は U-SMC の約 6.9 倍となった。石積造壁の耐震補強では、壁の一体化を目指した補強を施すことで最大荷重が上昇し、それに伴って破壊性状はコーン破壊、曲げ破壊、コーナー部破壊と変化した。



(a) R-SMM および R-SMC

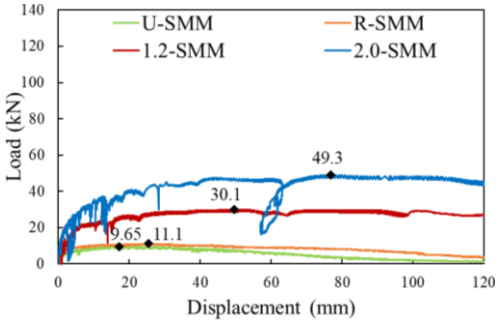


(b) 1.2-SMM

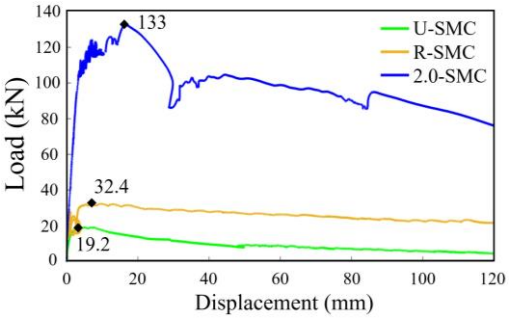


(c) 2.0-SMM および 2.0-SMC

図 4-51：試験体詳細図



(a) マッドモルタル



(b) セメントモルタル

図 4-52：荷重-変位曲線の比較

(a) U-SMM

(b) R-SMM

(c) 1.2-SMM

(d) 2.0-SMM

(e) U-SMC

(f) R-SMC

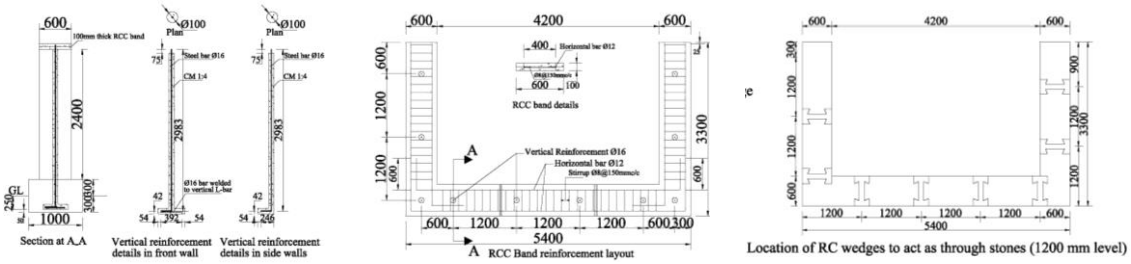
(g) 2.0-SMC

図 4-53：破壊性状

新築石積造壁の耐震補強効果検証の引き倒し試験に用いた試験体の形状は、セメントモルタル石積造が長辺 5400mm、短辺 3300mm、高さ 2400mm、壁厚 600mm のコの字型（以下 SMC-New と呼ぶ）であり、マッドモルタル石積造が長辺 5000mm、短辺 3100mm、高さ 2400mm 幅 400mm のコの字型（以下 SMM-New と呼ぶ）である。過去の地震被害調査結果より、石積造の破壊は表層の石積の崩落や上部隅角部の破壊によって生じていることから、石積の一体性が保たれるような補強方法を提案した。SMC-New は、基礎から上面までに RC 要素（100mm×100mm）による鉛直方向の補強、試験体の上面に RC バンドによる補強に加え、高さ 600mm、1200mm、1800mm の位置に楔による水平方向の補強を実施した（図 4-54）。一方、SMM-New は層間剥離破壊を防止するため、1200×600×400mm の蛇籠ボックス（φ1.2mm）内に石を積み、それを互い違いに 4 層積み重ねた。隣接する蛇籠ボックスを結束線（φ1.5～2.0mm）で結ぶことで石積の一体性を確保し、SMC-New と同様に鉛直方向の RC 補強と試験体上面に RC バンド補強を実施した（図 4-55）。

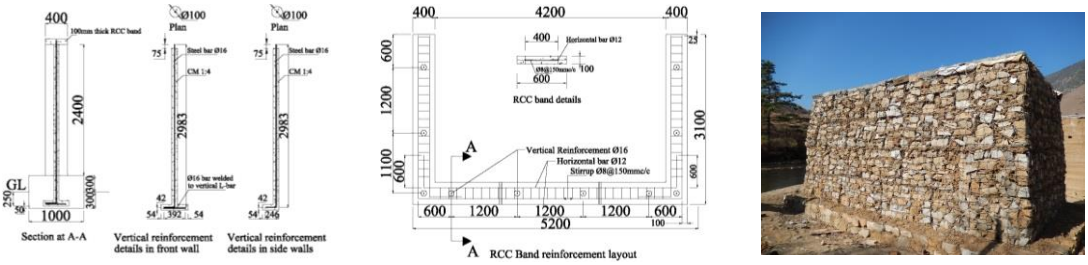
試験体の頂部にワイヤーを取り付け、ワイヤーを引っ張ることで試験体に引張力を与えた。壁とワイヤーの接合部には、木材の当て板を固定し、壁体と木材に孔を空け、ワイヤーを通した。ワイヤーのもう一端は重機に取り付け、重機を後退させることで試験体を引き倒した。荷重はワイヤー間にロードセル（東京測器研究所製：TLP-200KNB）を設置し、動ひずみ測定器（東京測器研究所製：DS-50A）で変位計と同期させて記録した。変位の測定には、レーザー変位計（キーエンス社製：IL-300）を合計 10 ヶ所に設置して行った。

SMC-New と SMM-New の荷重-変位曲線を 2017 年 12 月に実施したセメントモルタル無補強石積造（以下 U-SMC と呼ぶ、壁厚 600mm）とマッドモルタル無補強石積造（以下 U-SMM と呼ぶ、壁厚 600mm）の実験結果と比較して図 4-56 に示す。重機の能力の限界で SMC-New は崩壊せず、最大荷重は 143.73kN であった。U-SMC の最大荷重は 19.2kN で、補強によって最大耐力は約 7.5 倍に増加した。SMM-New は載荷点付近が引き抜かれるように崩壊した（図 4-57）。層崩壊の理由として、SMM-New の壁厚は 400mm であり、壁厚が小さくなったことが影響していると考えられる。また、このとき試験体上面の RC バンドは崩壊しなかった。最大荷重は 65.37kN であった。U-SMM の最大荷重は 9.65kN で、補強によって最大荷重は約 6.8 倍に増加した。壁厚が 600mm だったとすれば、最大荷重はさらに上昇したと推測される。



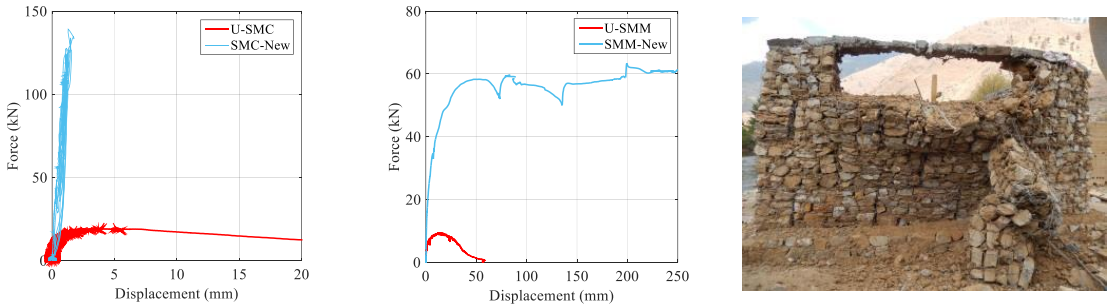
（a）鉛直方向補強材　（b）RC バンド　（c）楔による補強

図 4-54：SMC-New 詳細図



(a)鉛直方向補強材　（b）RC バンド　（c）外観

図 4-55：SMM-New 詳細図



（a）SMC-New と U-SMC　（b）SMM-New と U-SMM

図 4-56：荷重-変位曲線の比較

図 4-57：破壊性状

(2-7) 耐震化指針の作成

2-7-1) 本研究が提案する耐震化工法

本研究は、ブータン政府が定める耐震レベル（Bhutan Building Code 2018 によって、インド耐震基準 IS1893-1984 及び IS4326 の基準が適用される）に達する耐震技術の開発を目指した。本研究が提案する、版築造若しくは石積造の 2 階建て新築住居に対する耐震化工法は下記①②に示すとおりであり、また、平面計画上の前提条件として、③～⑤を満たすことを求める。

① RC 基礎に定着した垂直方向の鉄筋を、壁の交差部、開口部の両脇、さらに 1.2m を超えない間隔で設置し、鉄筋周囲は 100㎜ 径パイプを用いて打設したコンクリートで保護する。

② 基礎上・二階床・小屋裏床の位置に RC 臥梁（幅 600㎜ x 梁成 200㎜）を設置。これら計 3 段の RC 臥梁は、①の縦筋によって拘束される。

③ RC 臥梁設置のため、壁の平面配置は閉じること（従来の平面計画ではコの字型に壁を配置することが多い）。

④ 壁長 18 フィート未満。

⑤ 開口幅はできるだけ小さくする。

また、本研究が提案する、版築造若しくは石積造の 2 階建て既存住居に対するレトロフィット工法は下記①②に示すとおりである。

① 既存建物の版築壁・石積壁の両面に 12 ゲージのワイヤーメッシュを取り付ける。16 ゲージのワイヤーメッシュを、出隅部には 1200㎜ 幅、入隅部およびワイヤーメッシュ重ね部分には 600㎜ 幅で重ねて補強する。

② セメントプラスターを施し、ワイヤーメッシュを塗り込める。

2-7-2) 耐震化指針（耐震化マニュアル）の作成

2022 年 1 月より、DoC および DES のエンジニアとともに、耐震化指針作成に関してオンラインで打合せを開始した。この打合せでは、これまでに実験等で得られた工学的知見から耐震化工法を構想し、それをブータンの伝統的な民家建築に無理なく導入できるよう検討を進めた。

本研究が対象とする建築が一般民家であること、伝統的工法の民家の多くが農村部（市域 Thromde 以外はすべて農村部 Rural）で建築されていること、そして農村部において建築許可等の法的・制度的しくみが整っておらず（2-8-1)、また、現状では農村部を管轄するゲオク（郡）に許可・モニタリング・指導を担う人材がほぼ皆無であることから、本研究で提案する耐震化工法は、住民の自発的な意思によって導入されることとなる。このため、住民が耐震化技術を受け入れやすくすることが必要と考え、次の 2 点に留意した耐震化指針作成を目指した。

① 住民がこれまで伝統的に建築してきた建築類型（部屋割りや開口部の配置など）が実現できること。

② 住民の経済力や立地条件（車道へのアクセスなど）によっては、2-7-1 で示したフルスペックの耐震化工法だけでなく、発生確率のより高い小さな震度の地震で倒壊しないことを目指した簡易な耐震化技術も選べるよう、オプションを用意すること。

①に関しては、DoC がこれまでに作成した伝統民家の実測図を参考に、以下を検討した。

・壁長（直交壁間の距離）の最大値

様々な民家の実測図を検討し、その部屋割りなどが最大壁長の規定に則って実現できるかどうかの検討。従来の多くの民家ではかなり長い壁が観察されるが、多くはエクラ壁（木造軸組み左官仕上げの壁）で間仕切られており、エクラ壁を版築・石積み壁にすることで壁長の規定を満たし従来の部屋割りが可能となることを確認した。

・開口率（開口幅/壁長）の最大値

標準的な部屋の大きさに対して開口率規定によって決定される最大開口幅が、部

屋の標準的な用途や居住性から許容されうる開口率を検討した（表 4-4、表 4-5）。各国で利用されている組積造の基準では開口率が 30%以下とされている。しかし、ブータンの伝統工法の住居では、開口枠に大きなサイズの木材を利用することもあり、開口率を最低でも 40%以下としないと住空間としての設計が非常に難しいことが確認された。

・桁行方向の中間壁における開口率の緩和

従来の小～中規模住居の上層階では、版築若しくは石積みの壁が背面と側面にコの字につくられ、正面と側面前方はエクラ壁（木造軸組み左官仕上げの壁）が設けられる場合が多い。2-7-1)の耐震化工法の要素である RC 臥梁をまわすためには、コの字型の壁を閉じてロの字型にする必要があり、建物を前方と後方に仕切る桁行方向の壁が必要となる。この中間壁は、従来の空間の使用形態を大きく阻害する。そこで、いくつかの一般的な空間利用形態に基づき、桁行方向の中間壁に最小限必要とされる開口部を想定し（図 4-58）、構造計算によってその耐震性を検討した。

表 4-4：ある開口（窓やドア）を設けるのに必要な壁長を異なる開口率で算出

								L<18feet=	5490	mm	
	Legend	Details					w (opening width)	Wall length required (between cross walls)			
		nos of eye	A: opening	B: inner post	C: post (*incl. pemc hutsi)	D: outer frame		30%	40%	45%	50%
Door	D650	1	650	0	125	75	1,050	3,500	2,625	2,333	2,100
	D750	1	750	0	125	75	1,150	3,833	2,875	2,556	2,300
	D	1	900	0	125	75	1,300	4,333	3,250	2,889	2,600
Namta-gosum*		3	550	125	200	75	2,450	8,167	6,125	5,444	4,900
		3	700	125	200	75	2,900	9,667	7,250	6,444	5,800
Gekhar window	Gw1e	1	150	125	125	75	550	1,833	1,375	1,222	1,100
	Gw2e	2	150	125	125	75	825	2,750	2,063	1,833	1,650
Payap window	Pw2e(s)	2	250	75	125	75	1,125	3,750	2,813	2,500	2,250
	Pw2e	2	300	75	125	75	1,225	4,083	3,063	2,722	2,450
	Pw3e(s)	3	250	75	125	75	1,450	4,833	3,625	3,222	2,900
	Pw3e	3	300	75	125	75	1,600	5,333	4,000	3,556	3,200
	Pw4e(s)	4	250	75	125	75	1,775	5,917	4,438	3,944	3,550
	Pw4e	4	300	75	125	75	1,975	6,583	4,938	4,389	3,950
L: wall length (between cross walls)											
W: maxmum opening width											

表 4-5：開口率 40%の場合に、ある長さの壁に設けることのできる開口の種類を検討

L(ft)	L(mm)	W	Door	Window
	W<L*	40%		
6	1,830	732		
7	2,135	854		GW2e
8	2,440	976		
9	2,745	1,098	D650	
10	3,050	1,220	D750	PW2e
11	3,355	1,342	D900	
12	3,660	1,464		PW3e(s)
13	3,965	1,586		PW3e
14	4,270	1,708		
15	4,575	1,830		PW4e(s)
16	4,880	1,952		PW4e
17	5,180	2,072		
18	5,490	2,196		
	7,250	2,900	Namtra-gosum	
21	6,405	2,562	D900+D750	

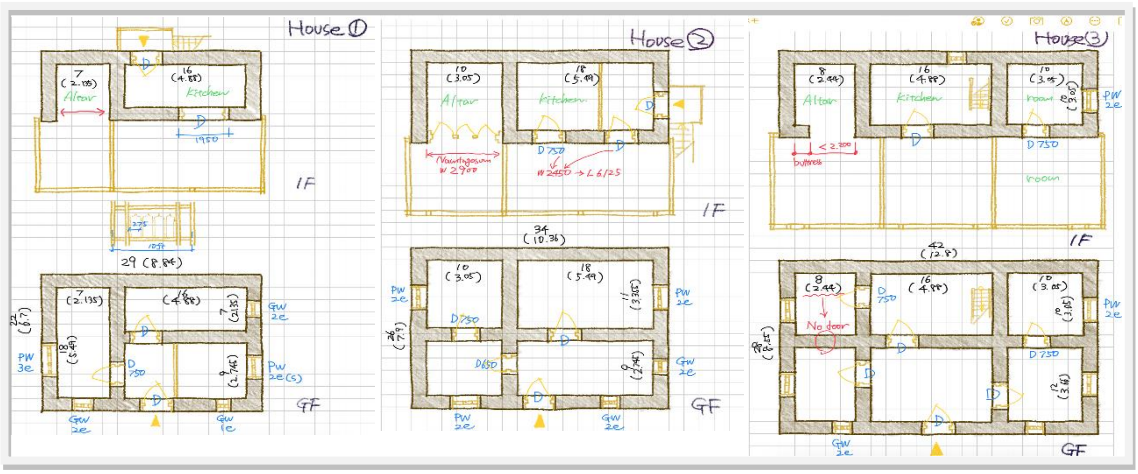


図 4-58：一般的な空間利用形態に基づき桁行方向の中間壁に必要とされる開口部を想定

②については、Through-stone や Corner-stone を採用した石積み壁のコの字型試験体や、各階レベルをワイヤーで締め付けるレトロフィット工法を施した実大試験体の加圧試験などを実施したが、十分な効果が認められなかった。DoC は、本研究終了後にも、DoC 独自の予算を確保し、より低コストでかつ施工の容易な耐震化工法の実験を順次実施していく計画である。

以上の検討から、本研究で作成する耐震化指針 Manual for Seismic Resilient Construction and Retrofitting of Rammed earth and Stone masonry Houses（以下、耐震化マニュアル）は、以下の内容を掲載した。

① 構造解析により耐震強度が確認されたモデルプラン 3 種類（平面図等）を示し、そのいずれかを選んで建築することを推奨する。
② 耐震化工法の施工手順、および、既存住居に対するレトロフィット工法の施工手順を示す。
③ ①のモデルプランと異なるデザインで建築する場合は、構造計算で耐震性を確認することを推奨し、本研究で開発した簡易な計算方法を示す。

(2-8) 建築許可のための構造基準の提案

2-8-1) 建築許可（Building Permit）に係る法令の成り立ちと現行法令の概要

ブータンの最も大きな行政区分は県（Dzongkhag）であり、20 県ある。県は郡（Gewog）に分けられ、ブータン全体で 205 郡を数える。1990 年代には、政治の中心地として人口が集中した Thimphu 市、次いでインド国境の商業地 Phuntsholing 市が市域とされ、市役所（Municipal Corporation）が置かれた。1999 年に公布された Municipal Act 1999 では、市役所の役割として各種の行政サービス、施設・インフラ整備とともに、市域における開発コントロールの実施を定め、市役所が建築許可を行う法的根拠となった。2002 年には、Bhutan Building Rules 2002（BBR2002）が公共事業相により公布され、建築許可の基準や手続きが定められた。

一方、２市以外での住居等の建築行為は、郡役所へ届け出る必要はあったが、基本的には、土地所有権の確認、特に政府の土地への不法建築を防ぐことを目的としていた。２市以外は農村部であり、コミュニティ内の慣習法に則り、かつ伝統工法で建築されていることから、建築行為が隣地に及ぼす影響や、建物の安全性確保に対して役所が介入する必要性が意識されることはさほどなかった。しかし、農村部も徐々に近代化の恩恵を受けるようになると、従来皆無だったか、あるいは無視できる程度だった、自然や集落環境に対するネガティブな影響が現れるようになった。このため、農村部における建築行為にも一定の基準が必要とされ、2013 年に Rural Construction Rules 2013 が公共事業相により公布された。

公共事業省は 2018 年に、BBR2002 と Rural2013 を統合する形で、現行の公共事業省令 hutan Building Regulation 2018（BBR2018）を公布した。その前文によると、制定の目的は下記の 3 点に集約される。

1. BBR2002 の内容の全面改訂。
2. BBR2002 と Rural Construction Rules2013 を一本化。
3. 同時期に策定されていた国土計画のしくみ(Spatial Planning Standards2017 など)との整合性を確保し、また、近年政府が重視するエコロジーや国産材使用推進などの方針を反映。

BBR2018 とともに Building Code of Bhutan 2018(Code2018)も公布された。従来 BBR2002 に含まれていた内容のうち、特定の技術的な項目に関する具体的な規定はこの Code にまとめられた。BBR2018 と Code2018 で定める建築許可の基準や手続きでは市域と農村部における区別がされていない。(図 4-59)。

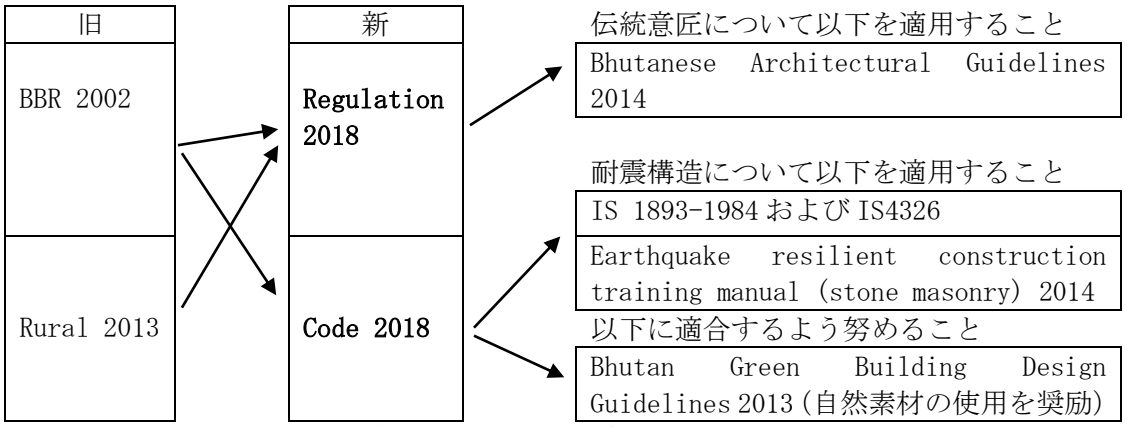


図 4-59：新旧の建築関連省令の関係と関連規則

以上の公共事業省令には上位法としての建築関連法は存在しない。現行の公共事業省令による建築許可に係る規定は財産権の制限を伴うものであるが、その法的根拠や、それを運用する機関の法的権限は曖昧である。こうしたことから省令制定を委任する法律の必要性が度々指摘されている。公共事業省は Construction Act of the Kingdom of Bhutan の法案を作成し、2019 年 9 月には、法案の国会上程が閣議決定された。しかしその後、Construction Development Board の改革が先行することになり、続いて 2022 年に省庁再編の動きが本格化した経緯から、国会審議は現在まで見送られてきた。こうした状況下にあって、建築許可制度の法的脆弱性を辛うじて補ってきたのは、地方行政法である。BBR2018 や Land Pooling and Readjustment Regulation 2018（土地収用と整理に関する省令)など､公共事業省所管の省令は､省令策定の根拠を Local Government Act 2009（LG2009 年法）第 300 条に求めている。“The Ministries responsible for the coordination of Local Governments shall be empowered to prescribe rules and regulations that cut across Local Governments.（地方行政機関の調整を担当する省庁は、地方行政機関にまたがる規則や規制を規定する権限を有するものとする）”

LG2009 年法はまた、市議会（Thromde Tshogde）や市役所（Thromde Administration）の役割として、地区計画や建築許可に関し、下記のように定めている。

- 市域（Thromde）の詳細計画（Local Area Plan）は、市役所が作成し、(第 273 条)、市議会が決定する（第 61 条）－市役所の代わりに公共事業省が策定することがある。
- 市役所は、適切な土地利用の促進、土地の収用、宅地の細分筆の規制を行う（第 273 条)
- 市役所は、建築許可を規則等に基づいて行う（第 273 条)

現在、市議会と市役所を持つ市域は 4 市あり、これらの市域に関しては以上のように建築許可制度に対する法的な裏付けが一応は存在している一方、農村部における建築許可の根拠は示されていない。農村部における建築に係る規制について、LG2009 年法第 53 条が郡議会（Gewog Tshogde）に与える権限は、次の 3 点であり、実際に郡役所が行う建築許可には、市域で求められるような建物の配置、構造、技術面からの審査は一切含まれない。

- 住居建築において伝統的デザインとするよう規制する
- 道路法に基づき、公道用地における建築を規制する
- 共有地、国有地・国有林に不法に建築することを取り締まる

2-8-2）BBR2018 による建築許可規定

BBR2018 に規定されている建築許可の概要は、以下の通りである。

a. BBR2018 の規定は Spatial Plan （詳細計画を含む）に劣後する（第 7 条）

b. すべての建築行為・解体・変更に、建築許可が必要（第 23 条)。ただし、外観と面積を変えない変更を除外する（第 27 条)。
c. 土地所有者（土地法により建造物の所有権は土地所有者に帰属する）が申請し、地方行政機関が発行する（第 29 条及び第 30 条)。
d. 建築許可申請には、建築、構造、電気、設備の図面を添付すること（第 36 条)、そして第 37 条から第 43 条に必要図面の詳細が定められている。そして、これらの添付図面は、公認のアーキテクト/エンジニアが作成しサインしたものでなければならない（第 45 条)。
e. 意匠は Bhutanese Architectural Guidelines 2014（伝統デザインのカタログのようなもの）に則ること（第 37 条)。ローカルな材料の使用[1]と地方特有のデザインの採用が特に望まれる（第 124 条)。
f. 鉄筋コンクリート造建築は、農村部に建築する場合でも構造図の提出が必要（第 46 条)。
g. 建築許可発行後､2 年以内に着工し､着工後 2 年以内に完成させること(第 52 条)。
h. ①着工前、②基礎コンクリート打設前、③各階の着工前、④型枠設置時、⑤竣工時に地方行政機関に通知すること（第 69 条及び第 70 条)。
i. 地方行政機関は所有者の申請があれば、検査の上、建物使用許可証（Occupancy Certificate）を発行する（第 95 条)。未申請あるいは未発行の場合、水道や電気が供給されないことがある。
j. 既存の村落景観に馴染まない鉄筋コンクリート建築、あるいは既存の集落内に鉄筋コンクリート住居を建設することは許可されない（第 128 条)。

2-8-3) 本研究で提案する耐震工法の現行法規への反映

BBR2018 に依拠して策定された Building Code of Bhutan 2018（Code2018）は、耐震についての細則を次のように定めている。

- 耐震設計については、インド耐震基準 IS1893-1984 及び IS4326 を適用。
- 第 4 項は、石積造建築の場合は、Earthquake resilient construction training manual（stone masonry）2014（以下、トレーニングマニュアル 2014）に従う旨、特に規定している。

以上を踏まえ、トレーニングマニュアル 2014 を、本研究で作成した耐震化マニュアルを参照してその科学的知見を反映したうえでガイドラインとして編集し直すとともに、版築造の耐震工法ガイドラインを石積造と同様の体裁で作成する。公共事業省は、現在、2023 年 6 月の BBR2018 改定に向けて準備作業中であり、Code2018 の第 4 項の耐震規定を以下のように改定することが合意された。これにより、本研究の提案が、現行の省令に反映されることとなる（図 4-60)。

現行規定：“4. If a building is constructed using stone masonry, the construction must comply with *Earthquake resilient construction training manual (stone masonry) 2014* (published by the Ministry)”

改定案：“4. If a building is constructed using stone masonry or rammed earth, the construction must comply with *Guideline for Earthquake Resilient Stone masonry and Rammed earth Construction*”（仮題）

[1] ローカル材料の使用促進は、伝統文化の保護という目的に加え、昨今の社会的な課題に対応するため、特に重点が置かれるようになった。課題とは、慢性的な輸入超過を緩和すること、外国人建設労働者を抑制すること、エコロジーな建築を推進することなどである。

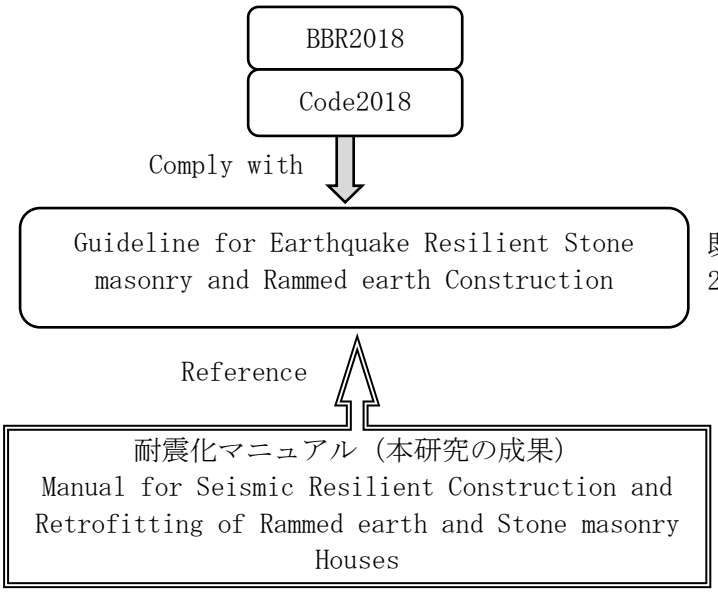


図 4-60：現行法令への反映計画の概念

②研究題目２のカウンターパートへの技術移転の状況

カウンターパートである内務文化省文化局（DoC）や公共事業省技術支援局（DES）に所属する技術者を日本に招聘し、実大実験に必要な機材のメンテナンスに関するトレーニングや、日本の歴史的建造物に対する耐震補強技術の視察を実施した。また、内務文化省文化局（DoC）や公共事業省技術支援局（DES）に所属する現地技術者に対して、常時微動計測や載荷実験による構造特性評価技術を教育した。

③研究題目２の当初計画では想定されていなかった新たな展開

版築・石積建築の実大試験を行うための用地確保が遅れたうえに、実験の実施場所も当初計画から変更となった。実大実験の実施場所の変更に伴い、試験体数が 2018 年度と 2019 年度の 2 年間で計 8 体から計 6 体に変更となった。SATREPS 予算に余裕が出たため、残り２試験体は SATREPS 予算で執行した。一方で、ブータン側からの要望で、RGoB 予算により面内せん断試験体 7 体を作製し、3 月に実験することとなった。

④研究題目２の研究のねらい（参考）

簡便で使いやすい実務的な耐震性能評価法の確立とパッケージ化を行うことで、指針の耐震性能基準を満たした建築の普及を目指す。

⑤研究題目２の研究実施方法（参考）

常時微動測定に基づき版築・石積建築の固有周期の推定式を提案することで振動特性係数を算出する。この値は、最終的には版築・石積建築の必要保有水平耐力の算出に掛かってくるものであり、算出結果をもって耐震性能を評価する。材料実験に基づき材料の特性と材料改良の効果を、各種補強方法の施工実験を実施して施工性を確認し、実大試験体の静的・動的実験により補強効果を検証し、構造解析を実施することで解析法と耐震診断法を確立し、耐震化マニュアルを作成する。耐震化マニュアルは視覚的で分かりやすいものを作成する。

研究題目 3：「耐震化技術の普及」
研究グループ D：耐震化技術の普及（リーダー：向井純子）
①研究題目２の当初の計画（全体計画）に対する成果目標の達成状況とインパクト
(3-1) 耐震化工法普及実施体制の確立

ブータンの伝統的な民家は、集落内あるいは近隣集落の棟梁が全体計画と指導、木工事を請け負い、版築を含む労働力は集落内の相互扶助のなかで供給しあって建築されてきた。大工も専業ではなく、農業等の傍ら、依頼があれば仕事を請け負うことがほとんどである。

ブータンの集落ではほとんどの民家が、このような伝統的なしくみの中で、自然循環型の材料を用いて建築されているが、昨今では、RC 造の民家もちらほらみられるようになってきた。RC 建築は伝統建築に比し、集落の相互扶助の健全性や立地による材料輸送コストの違い等により異なるものの、2～4 倍の建設費がかかる。そのため未だ集落における RC 建築の数は多くないものの、今後の経済発展に伴い徐々に増していくと想定される。ブータンにおける RC 建築は、その材料の多くを外国からの輸入に頼り、工事は外国人労働者に依存している。

一方、本研究が提案する工法は、最小限の工業製品（コンクリートや鉄）を使い、グリーン志向と耐震性を両立するものであること、現在まで集落で維持されてきた扶助のしくみの範囲内で施工が可能であることに優位性がある。増加しつつある RC 建築に対する代替策として期待できる。

本研究が推奨する耐震工法には上述のような利点があるが、その普及に関しては、当初から国内一律に始めるのでなく、まずは特定の市域（Thromde）で決定された Local Area Plan の地区内において進めることが合意された。本研究が対象とした伝統建築の多い中緯度地域は 5 つのクラスター地区（2～3 県をまとめた地区。2022 年に導入が決定された）に区分されるが、このうち西部、中部、東部の 3 つのクラスター地域における市域を、初年度からの普及推進の対象とする。そして 5 年以内に 5 つのクラスターすべての市域において普及を推進する。普及推進は DES が毎年 1 つのクラスター地区のエンジニアリング課の技術者に対する研修を実施すること、該当市域内で伝統工法による民家の建築許可申請があれば、耐震化工法を奨め、技術指導を行うことで実施される。

その一方で、農村部を含めた国内全域の民家の耐震性向上を進めるために、普及に係る課題解決を今後以下の点でさらに進めることで実施体制を強化していく必要がある。

1. 建築許可制度の強化
2. 施工性の向上と品質管理
3. より安価で施工が容易な耐震化工法の開発

3-1-1) 建築許可制度の強化

2-8-2)で示したように、BBR2018 では建築許可の要件が、市域か農村部かによって、あるいは構造種別によって、特に区別されていない。しかし、「鉄筋コンクリート造建築は、農村部に建築する場合でも構造図の提出が必要（第 46 条）」と、特に念を押していることから、農村部の石積造や版築造の建築に対して構造図の提出は求めていないことが理解されるように、実際には全く一律の要件を課しているわけではない。第 39 条の申請に必要な図面や、第 69 条と第 70 条で示された、役所に通知すべき工程上の特定の段階も明らかに鉄筋コンクリート造建築を想定した内容である。ただ、農村部での石積造や版築造の住居の建築許可においてどの条項が該当しあるいは除外されるべきかが明確に示されているわけではない。そして市域以外では建築許可を行うことに明確な法的根拠がないことは 2-8-1)で述べた通りである。

農村部を管轄する郡役所は 2-8-1)で示した LG2009 年法で与えられた権限に基づいて建築許可を実施しており、そこには市域で求められるような建物の配置、構造、技術面からの審査は一切含まれない。申請に必要な書類や手続きは、実際には郡役所によって異なるが、土地の登記証の提出は共通して必須である一方、ほとんどの郡役所は、図面の

提出を求めていない。建築予定の建物について申請時に申告するべきことは階数のみで、建物の外形寸法の申告も要求されない。つまり、土地所有権に問題がなく、伝統デザインと工法で建築し、土地法と道路法による要件（水田に建築してはならない、道路用地に建築してはならない）を満たす限り、許可が与えられる。建築中の検査や竣工後の検査は行われていない。LG2009 年法はまた、郡長（Gup）と副郡長（Mangmi）を 5 年ごとの地方選挙で選ぶこと、中央政府から派遣される郡行政官（Gewog Administrative Officer）が、郡役所の事務一般を担って郡長を補佐することを定めている。郡役所は以上の 3 名から構成されており、技術面から建築の許可や指導を与える能力をそもそも備えていない。一方、県役所にはエンジニアリング部門があり、公共土木建築事業の管理を主たる業務として 20～30 名程度のエンジニアが配属されている。県役所は郡役所に対して技術面の支援も行うこともあるが、民家の建築許可や検査を行うことは想定されていない。郡役所と県役所への聞き取りからも、郡役所による建築許可に対する県の技術支援の程度は、県によってさまざまに異なっていた。Haa 県では県の技術者のなかで地区計画地域内の民間建築を指導する技術者一名が RC 建築だけでなく伝統建築に対しても指導を行っているが、Paro 県や Wangdue 県、Thimphu 県、Bumthang 県、Monggar 県では伝統建築の建築許可に県のエンジニアリング部門は全く関与せず、Punakha 県では県の技術者が各々担当する郡における公共事業の管理の合間に必要と思われれば伝統工法の民家建築に対しても指導する場合があるとのことであった。

以上の状況の背景にあるのは技術者不足であり一朝一夕に解決するものではないが、現在進行中の大規模な省庁改変と行政システム改革（クラスター制の導入を含む）を利用して建築許可制度の強化を図ることが DES と DoC の間で確認された。

3-1-2）施工性の向上と品質管理

コンクリートや鉄筋を建築に用いることが稀な農村部において、RC 臥梁や縦筋の施工は低品質なものとなりがちであり、また特に版築造の場合は版築壁の施工性低下も懸念される。コロナ禍の制限が解除されて 2022 年 8 月にようやく渡航が可能となったことで、本研究で推奨する耐震化工法による F 型モックアップを建設し、その施工手順と施工難易性を検証した。それにより、RC 臥梁やポストの建設など補強材の施工だけでなく、RC 臥梁やポストが導入されたことによる版築型枠の組み上げ手順や土の突き固め方、石の積み方などにおいても、従来よりも高い計画性と施工上の工夫が必要であることが改めて確認された。耐震化工法を取り入れかつ施工品質を確保するには、住民への丁寧な説明と建築過程のモニタリングが必要である。そこでまず 3-1 で述べたように少なくとも普及の初期の段階では DES と DoC による指導と県役所・市役所によるモニタリングが可能な範囲で普及を始めることが合意された。モニタリングを通じて経験ある施工者が養成され、同時に施工者からのフィードバックと知見を蓄積して施工性の向上に役立てることも期待できる。

3-1-3）より安価で施工が容易な耐震化工法の開発

伝統建築においても材料や労働力を市場に依存する市域では、建築費用が比較的高いため推奨耐震化工法の導入に係る追加費用は相対的に小さい。また、推奨工法の伝統建築は同規模の RC 造建築と比べて価格優位性があるため、RC 造建築が多く建てられる市域ではある程度の需要が見込まれる。一方、農村部における耐震化工法普及ではコスト面が大きな課題となる。農村部では敷地内や身近にある土や石、政府補助により安価に入手した木材を用い、しばしば集落内の相互扶助による無償の労働力によって住宅が建築されている。このため同規模の伝統工法住宅の建設費用を、市域周辺と農村部で比較すると 4～5 倍もの地域差が見られる。そのうえ推奨工法の導入に必要な工業製品の入手経路は農村部ほど長くなり運送費が高くなるため、耐震化工法導入による追加費用は農村部では相対的に高額となる。道路のない村も少なくない。

本事業で提案する耐震化技術はBBR2018とCode2018の規定に従いインドの建築基準が示す耐震性が確保されることを目指した技術である。現在このレベルで建設されているのはRC建築のみ（地上７階建てまでの建築が事実上許可される）であり、かつ、RC建築においても非耐力壁は無筋のレンガ積みであり耐震性は考慮されていない。ブータン建築のデザインにするため高層階はしばしば外壁がRCフレームから外に張り出すが、上下の片持ちスラブの間にレンガが無筋で積まれていることが多い。都市部のRC建築においても実際には耐震基準が想定するよりも小さい地震でレンガ壁が崩壊する可能性が小さくないことなどを考えれば、農村部の伝統工法による住宅建築については、本研究の推奨する耐震化工法を導入することが経済状況や立地条件によって難しくても、今より少しでも耐震性を向上させることを目指したより安価で施工の容易な工法が選択肢としてあることが望ましい。そのような工法を開発するための研究は、供与機材や施設を利用してDoCを中心に継続される見込みである。DoCが少しずつ実施している地域の建物類型調査の成果を利用してそれぞれの建物類型に合った耐震化工法を検討が望ましい。

3-1-4）耐震化工法普及の見通し

耐震化工法が正しく施工され、施工品質が確保された民家が実際に建てられてその民家の建築主や棟梁がその建物に満足するならば、その話は近隣に広まり、住宅を建てる予定のある多くの人々の関心を集める。ブータンにおいて、市民の口コミは政府の広報活動よりもより強く人々に影響を与え、結果、普及に役立つ。そのうえで、今後の工事モニタリングや研究を通じて施工手順や施工性が改善され、耐震化工法の選択肢が増え、農村部における建築許可やモニタリングのメカニズムが改善されれば、おのずと耐震化技術の普及が進んでいくものと期待できる。

（参考）地方行政の概要

現行の地方行政は、2008年憲法が描いた枠組みに沿って、Local Government Act 2009（LG2009年法）に基づき、県Dzongkhag－郡Gewog－区Chiwog、および市Thromdeで構成されている。県－郡－区の枠組みは、近世以降のシステムを土台にしたものである一方、市は近年都市化が進んだ地区を特に市として指定したものである。

(1) Dzongkhag（県）：20県

県は最も大きな行政上の区分である。近世における各地のゾンを拠点とした統治システムの境界をおおむね引き継いでおり、統合や分割を何度か経て、現在は20県ある。

(2) Gewog（郡）： 205郡

県は複数の郡に分けられる。Reguration2018によればThromde（市）域以外は農村部（Rural）とされているので、郡部はすべて農村部にあたる。Bhutan Living Standards Survey Report 2017 （BLSS2017）（全世帯の約７％をサンプリングした調査）の推計によれば、ブータン全体の世帯数のうち64%が郡部に居住し、うち87%が一戸建て住居に居住している。このことから農村部の一戸建て住居の軒数は 9 万戸程度と予測できる（一軒に一世帯とした場合）。郡役所には、上述のように選挙で選ばれた郡長と副郡長のほか、郡職員として通常一名の公務員が配属される。

(3) Chiwog（区）：1044区

区は、LG2007年法に基づいて、地方選挙の選挙区（Demkhong）として複数の村をまとめて線引きされた。ひとつのChiwogから原則一名のTshogpa（郡議）が選出され、Gewog Tshogde（郡議会）を構成する。1～数村で構成されるChiwogが多いが、10数村から成る場合もある 。一つのGewogを構成するChiwogの数は郡議会定員の規定により5～8区。

(4) Thromde（市）：

人口や税収が多く、商業化が進んだ地域を、特に指定した地域が市である。BLSS2017の推計によれば、ブータン全世帯の36%が市域に居住している。Thromdeには3カテゴリーあるが、このうち市議会が置かれ、市政を担う公務員が配属されるのは

Dzongkhag Thromde A のみである。A カテゴリーには、Thimphu 市とインド国境の商業地 Phuntsholing 市に加えて、Gelephu 市、Samdrup Jonkhar 市が指定されている。A 以外の二つのカテゴリーの Thromde は、その機能を県もしくは郡の役所が負うことになっていて市政の実態はないが、将来に向けた開発が進められることが想定される地域である。

3-1-4) 耐震化工法を用いた建築に対するインセンティブ・スキームの見通し

本研究で提案する耐震工法の普及のため、工法を採用した場合のインセンティブを検討した。20～30 年を遡る過去には、衛生陶器とセメントの現物支給によるトイレの普及や、CGI シートの現物支給による CGI シート屋根の普及（森林保護のため、伝統的な割板による屋根葺きに替える）などの例があるが、いずれも国際機関や NPO の支援を受けたものであった。近年では、税・保険料の減免や無償の技術指導をインセンティブとする傾向にある。参考までに、近年のインセンティブの検討例を以下に 2 例挙げる。

- National Human Settlement Policy of Bhutan 2019 では、その 6.1.3.で、公共事業省はローカルな材料・工法による建築計画に対して優先的な建築許可を与えるとしている。インセンティブのしくみを作ることという記述もあるが、具体的なインセンティブは示されていない。
- Bhutan Green Building Design Guidelines 2013 の末尾に、グリーンデザインを採用して建築した個人や企業に対するインセンティブが下記のように提案されている（あくまで公共事業省の提案である）。

1. 建築許可の優先手続き
2. 対象となる材料や製品に対する税の減免
3. 公共事業体への優先営業
4. 低利の住宅ローン
5. 設計支援プログラムを助成
6. 無償設計支援
7. 所得税減免
8. グリーン建築の固定資産税を建築後 2～7 年間免除（グリーン度による）
9. アーキテクトやエンジニア、施工者に対する無料・低料金の研修
10. 事業税減免およびグリーン事業に対する外国企業の直接投資（FDI）の優先手続き
11. グリーン建築の容積率緩和
12. 建築許可料の免除
13. 初回の売上税の免除
14. グリーンデザインの表彰
15. グリーン建築の賃料に対する税を当初２年間 50%に減税
16. 政府機関による借り上げは、グリーン建築を優先
17. 地産原料の有利な入手

また、市域内で建築制限のかかる土地（保護区・危険地域など）の所有者に対するインセンティブ・スキームが、公共事業省を中心に関係機関で構成する会議によって提案され、2016 年 3 月 25 日の閣議がこれを承認し、公共事業相が 2016 年 6 月 8 日付で関係機関に命令として発出している。決定された下記 4 種のインセンティブはすでに農村部では享受されているものである。

a. 土地と家屋にかかる税率の減免
b. 100 ユニットまでの電気料金無料
c. 木材等の購入に対する補助
d. 農業関連の補助

税の減免には最低でも閣議の承認が必要なうえ、もともと農村部の課税はわずかなので効果は小さい。耐震工法の導入によるコスト上昇に見合うようなインセンティブの導入は上述の例が示すように通常ではありえない。実効性のあるインセンティブ・スキー

ムの導入には、高度な政治判断が必要であり、本研究の範囲を超える。
こうしたことから、耐震化工法の普及を進めるためのインセンティブ・スキームとして、実効性に欠けるものの、優先的な建築許可手続きや無償の技術指導が検討されている。

3-1-5) 本邦研修

2018 年度に、内務文化省災害管理局(DDM)、内務文化省文化局(DoC)、公共事業省技術支援局(DES)から各 1 名を日本に招聘し、名古屋市港防災センターで防災体験ツアーに参加してもらうことで、ブータンにおける防災教育のあり方に関する研修を実施した（図 5-1)。

2022 年度にも、上記 3 機関から各 1 名を日本に招聘し、名古屋市港防災センターと神戸市の阪神淡路大震災記念人と防災未来センターで防災体験ツアーに参加し、また、京都市内の伝統建築の耐震補強工事現場を視察してもらうことで、ブータンにおける耐震化建築の普及と防災教育のあり方に関する研修を実施した。

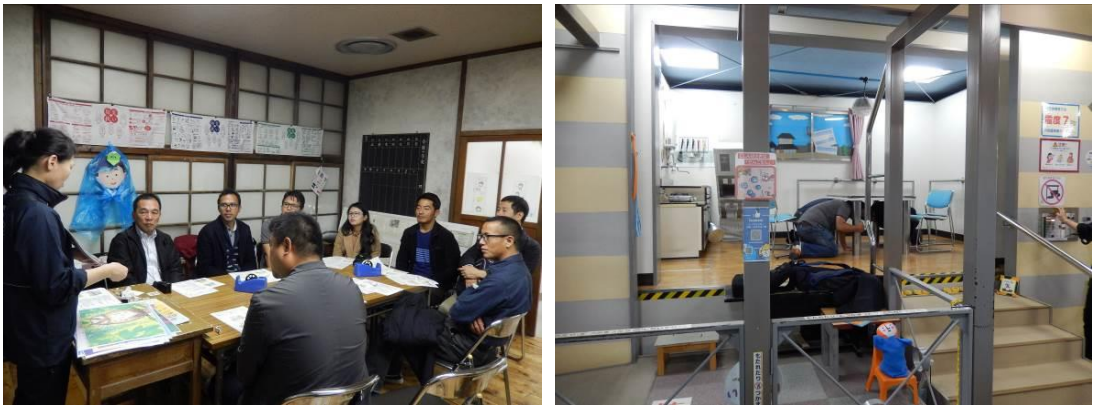


図 5-1：防災体験ツアー（名古屋市港防災センター）

(3-2) 教材・普及プログラムの開発

3-2-1) WEB サイト用コンテンツ

本研究で提案する耐震化マニュアルをわかりやすく説明したコンテンツを、DoC と DES の WEB サイト上に掲載した。これらのコンテンツは、ToT や施工者研修、パイロットサイトでの住民教育の教材として利用したものである。WEB サイトで公開することで、今後も研修等に利用し続けてもらうとともに、一般の方々にも利用していただくことができる。

1. ピクトグラム施工マニュアル（図 5-2）
2. パワーポイントスライド：耐震化マニュアルを説明するための PPT。
3. ３D グラフィック動画（図 5-3)：一棟の住宅建築が、耐震化マニュアルに沿って施工されていくようすを、３D グラフィックで作成し、スライドショーの動画としたもの。耐震補強の全体像がわかる。
4. 施工動画（図 5-4)：F 型モックアップを建築し、施工の様子を撮影編集した約 7 分の動画。耐震補強の施工上のポイントや詳細を説明するもの。ゾンカ語のナレーションと英語字幕付き。この動画は YouTube にアップロードされている。
5. 動画シリーズ（図 5-5)：本研究で設置した実験施設や、実験の様子について、DoC 職員が解説する数分の動画のシリーズ。この動画シリーズは YouTube にアップロードされている。

1. に関しては、版築造の施工マニュアル作成のため、2017 年度に現地で 3 回、2018 年度に現地で 2 回のヒアリングを行い、ドラフト版を完成させた。石積造の施工マニュアル作成のため、2018 年度に現地で 2 回のヒアリングを行い、ドラフト版を完成させた。

2019 年 8 月に、内務文化省文化局(DoC)、公共事業省技術支援局(DES)の技術者や建築家、および施工者からのヒアリング結果に基づき修正を行い、2019 年 10 月に現地で再度ヒアリングを実施した。また、版築造の維持管理マニュアルのドラフト版を完成させた。2022 年 10～11 月の内容見直しに基づいて、12 月に英語版の最終修正を行い、2023 年 1 月にゾンカ語版を完成させた。

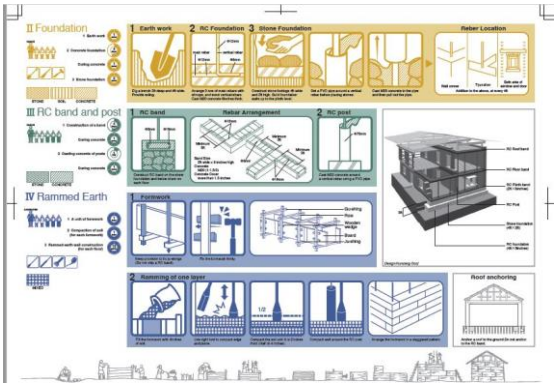


図 5-2：ピクトグラム施工マニュアル

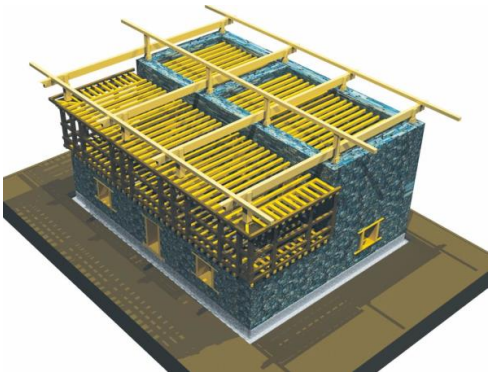


図 5-3： 3D グラフィック動画

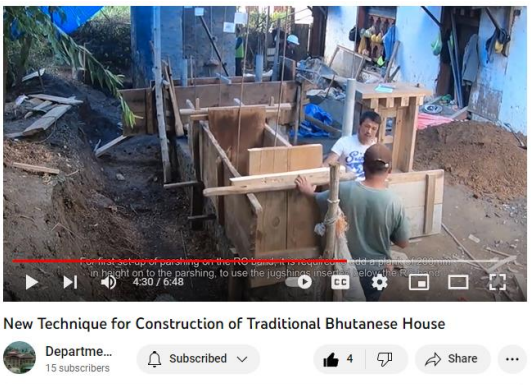


図 5-4：施工動画

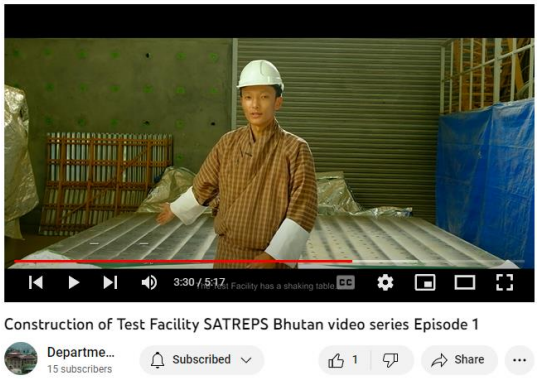


図 5-5：動画シリーズ

3-2-2) 減災教育 VR

2017 年度は、現地の版築建築の視察、および、2 回の住民からのヒアリングを実施し、これらを素材に減災教育 VR について検討し、ドラフト版開発を開始した。

2018 年度は、前年度開発を開始したドラフト版 2 点を完成させた。一方は、PC ベース VR システム（HTC 社製 VIVE Pro）を用いたものであり、体験場所に外部センサを設置が必要な位置固定型のロケーションベース VR 体験（プロジェクト名：SVR-R）である。もう一方は、VR ヘッドセットに OS が内蔵されている所謂スタンドアロン型 VR システム（Facebook（現 Meta）社製 Oculus Go）を用いた持ち運び可能なポータブル VR 体験（プロジェクト名：SVR-M）である。前者は、版築家屋内で巨大地震を体験し、その後、避難までの流れを体験するものである。後者は、VR ミュージアム的な仮構の空間を体験するもので、本 SATREPS プロジェクトに関する画像や、引き倒し実験の全天球動画等を鑑賞可能である。後者の使用システム Oculus Go による VR 体験は、処理能力が前者システムに劣るというネガティブな面（ビジュアルクオリティ、VR 空間内を自然に移動できない点等）を認めつつも、前者システムが設置不可能なルーラルエリアや教育施設等に持参しての減災教育イベントを催すといったことが可能な面をポジティブに捉え、その体験可能性を探るものであった。

上記試作版 2 点を用いて、2018 年 10 月に内務文化省災害管理局(DDM)でデモンストレーションを行い、フィードバックをもとに改良点等について議論した（図 5-6)。

2019 年度は、2019 年 5 月に新たにリリースされた“VR 空間内を自然に移動可能な”スタンドアロン型 VR システム（Facebook 社製 Oculus Quest（現 Meta Quest））を用いて、先の議論をもとに SVR-R の体験を発展させた「SVR-1(β)」の開発を行った。SVR-1(β)の体験では、議論で指摘のあった「減災教育としての機能」について再検討し、DDM が発行している減災教育マニュアル記載の情報や図を活用した減災器具の設置体験を取り入れた。SVR-1(β)では、体験者は SVR-R と同様、版築家屋内にて巨大地震を経験するが、その後、減災器具の設置を促すインストラクションパネルが空間内に表示され減災知識を獲得できるように構成した。次にパネルの情報に対応する減災器具の設置シーンに移行し、体験者は器具を適切な位置に設置する。すべての器具が設置されると、再度、巨大地震が発生するが、最初の地震時よりも家具が倒れづらくなっている状況を体験することができる。

SVR-1(β)の試作版を用いて、2019 年 10 月に、DoC にて現地職員を対象にデモンストレーションを実施した（図 5-7)。図 5-7（右図）で確認できるように、体験中の体験者視点を第三者がタブレット端末でリアルタイムに確認することも可能である。このデモンストレーション、および、国際会議におけるデモのフィードバックを踏まえて改良を施し、実際に運用可能なものに仕上げることとなった。

上述したように、SVR-1(β)はスタンドアロン型 VR デバイスを用いた体験でありポータブル VR のため、ルーラルエリアや教育施設といったあらゆる場所でデモンストレーションを実施することができ、ブータンの地域特性に適った減災教育が可能である。一方で、スタンドアロン型 VR デバイスは PC ベース VR と比較すると処理能力が劣るため、高画質グラフィックス処理やフィジカルなデバイスとの併用には向かない。また、VR 体験をリアルに仕上げるには高画質グラフィックスや触覚刺激等のフィジカルな要素の併用が有効であることが良く知られている。リアルで自然な体験を用いることで体験者の興味を掻き立て教育効果も高まることが期待できる。こういった観点から、DoC に設置された振動台を効果的に活用した PC ベース VR 体験（プロジェクト名：SVR-2）を構築することとなった。

図 5-6:VR による減災教育教材「SVR-R」(ドラフト)のデモンストレーション(2018.10)

図 5-7:VR による減災教育教材「SVR-1」(ドラフト)のデモンストレーション(2019.10)

SVR-2 の体験は、DoC 設置の振動台や DoC の実大実験場の再現（デジタルツイン）空間をベースとした体験となっており、この VR 空間を歩き回り、実大試験体内部で版築造の補強方法や強化方法に関する研究成果ポスターを観たり、1/6 スケールの試験体が設置された振動台を動かしてみたりする等といった本プロジェクトならではの体験が可能である（図 5-8、9、10、11）。それらの体験中に不意に巨大地震が発生するように構成している。振動台を地震体験 VR に用いることに VR 地震体験開発としての新規性は無いが（振動台を用いた VR 地震は既往研究としていくつも存在する）、SVR-2 の体験は本 SATREPS プロジェクトの研究内容・成果を内包し、かつ、プロジェクトによって建造された実大実験場のデジタルツインを活用する体験としてオリジナリティのある減災教育 VR 体験を成立させ得ると考えている。

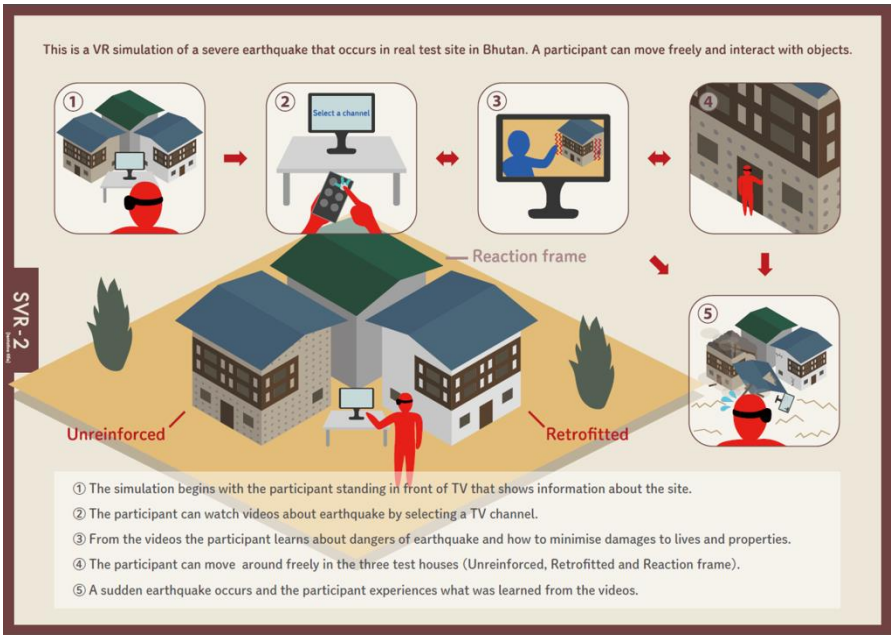


図 5-8：VR による減災教育教材「SVR-2（開発途上)」におけるチャート案

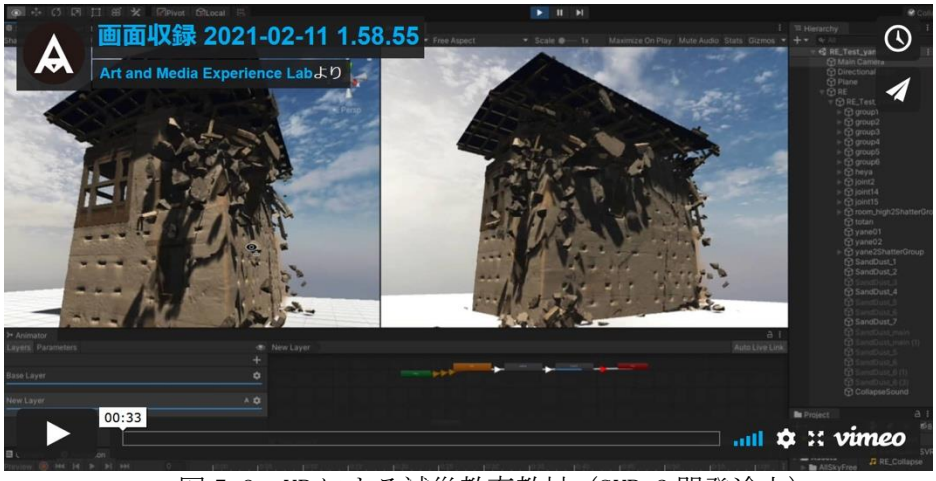


図 5-9：VR による減災教育教材（SVR-2 開発途上）

図 5-10：VR による減災教育教材（SVR-2 開発途上）

図 5-11：VR による減災教育教材（SVR-2 開発途上）

2020 年度は新型コロナウィルス感染症による渡航制限のため、現地で予定していた SVR-2 構築のための実験や作業を進めることが不可となった。そのため、SVR-1(β)の修正・更新作業をメインにおこない、ベータ段階を経て SVR-1 として実際に減災教育活動に運用可能な状態に近づける作業を実施した。また、SVR-2 開発における 3DCG やインタラクションデザイン等の実装実験を行なった。これらの作業の一部は、名古屋市立大学大学院のインターンシップ制度を活用し DDM の遠隔指導のもと進められた。

2021 年度も引き続き新型コロナウィルス感染症の影響により渡航不可となったため、SVR-2 構築のため DoC での現地作業は不可となり、日本で可能な作業として、主にフォトグラメトリ CG による高画質グラフィックス、および、モーションキャプチャによるインタラクションデザインの実装作業をおこなった。また、新型コロナウィルス感染症が本 SATREPS プロジェクト終了時までに収束しない可能性を考慮し、SVR-2 開発については DoC の振動台を使用しない他の 2 つのバージョンについて検討した。これら新たな 2 つのバージョンは、SVR-2 開発意図の要の一つとなっている PC ベース VR クオリティを維持しつつも、DoC の振動台を用いずに日本のみでの開発が可能な形式のものである。一方は、PC ベース VR だがポータブル版である。2018 年度の試作版 PC ベース VR、SVR-R 開発時にはリリースされていなかった外部センサが不要な Inside-Out 方式の PC ベース VR システム（HTC 社製 VIVE Cosmos）を用いるものである。外部センサを用いるものは、現場でのセッティング時に微調整が必要だが、VIVE Cosmos はそういった調整が不必要となるため、渡航不可の場合でもシステムのみを輸送し、Zoom やインストラクションビデオ等を用い

て技術移転作業も円滑に行うことも可能である。

もう一方は、2021 年から世界的に注目を集めているメタバースを活用するメタバース版である。メタバースは端的に言えば、インターネットに繋がった VR 空間のことであり、そこでは体験者はアバターを介してコミュニケーションを行うことが可能である。SVR-2 で構築中の VR 空間（DoC 実大実験場のデジタルツイン）をメタバースのプラットフォーム上に立ち上げ公開するというものである。このバージョンについても日本で開発を行い、機材を輸送して供与後にメタバース空間上で現地技術者とコミュニケーション行いながら体験を発展させていくことが可能である（公開後にも随時更新作業が可能である）。

SVR-2 構想の要である DoC 版を含めた 3 つのバージョンは、同じ 3DCG を共有する VR 体験のため、開発の順は日本でも開発可能な新しい 2 つのバージョンから順次実施することとなった。メタバース版→ポータブル版→DoC 版の順である。上記について検討後、メタバース版の試作版を構築し、国内の関係者を対象に体験デモンストレーションを、DDM に対してはオンラインで体験映像を用いてプレゼンテーションを行い議論した。なお、この試作版開発の一部は、前年度と同様に名古屋市立大学大学院のインターンシップ制度を活用し DDM の遠隔指導のもと進められた。つまり、開発は日本で実施され、適宜 DDM との協議のもと進められた。

2022 年度は、SVR-2 メタバース版にブータン側と日本側から同時にアクセスする実験を行うため、5 月に Inside-Out 方式の PC ベース VR デバイス（HTC 社製 VIVE Cosmos）とそのデバイスを稼働させるための高性能 GPU 搭載ノート PC を DDM に送り、6 月に無事到着した。その後、6 月末から 7 月上旬にかけて同時アクセス実験を行ったが、機材やネットワークの不具合等のため想定していたような活動はできず、11 月の中川の渡航時にそれら不具合を検証しながら完成させることとなった（後述の通り、SVR-2 メタバース版は 11 月以降「SVR-2」と名称変更し、11 月時点で完成した。その後 2023 年 4 月までに表層部分のデザイン等について微調整が完了し公開を控えているが、その間メタバース・プラットフォームのシステム更新により当システムも更新が必要となったため、この作業を 7 月までに終え公開する）（図 5-13-2）。この SVR-2 メタバース版の公開後は、採用しているプラットフォーム「VRChat」のアカウントと対応 VR デバイスおよび PC を用いることで、インターネット環境さえあれば誰でも世界中どこにいても体験可能となるため、減災教育としてのみならず、本 SATREPS プロジェクトの広報媒体としての機能も期待できる。

（VR システム提供プランの変更）

2022 年度 10 月から 11 月にかけて、最終的にカウンターパートへ提供する VR システムを以下の通り変更した（表 5-1、2）。

変更は、これまで構成的に検討してきた各 VR システムを用途ごとに整理し、なおかつ、運用可能性も考慮して発展的かつ統合的におこなった。具体的な変更点は、次に説明する通りである。（変更前プラン）(a)SVR-1 は 2019 年に開発し β（開発途上）状態であったが、これを完成させるにあたって、当時使用していた HMD である Meta Quest の後継機である Meta Quest2 を用いることにした。このことで（変更前プラン）(c)SVR-2 のポータブル版とほぼ同等の画質まで引き上げることができたため、これらを統合し、（変更後プラン）(i)SVR-1（再構築版）を再構築した。なお、再構築版は実際の運用面を考慮し、VR コントローラーを使用せずに、ハンドトラッキングを採用した。これにより体験者はコントローラーの操作について覚える必要はなくなり、自身の手を使って VR 空間のオブジェクトに触れたりしながら体験が可能となった。さらに、仮想地震が発生した際に、机の下に隠れたり、頭を両手で覆ったりする等の避難行為が容易となり、現実に近い形での体験が可能となった。これに伴い、（変更前プラン）(b)SVR-2 メタバース版を、（変更後プラン）(ⅱ)SVR-2 とし、(d)SVR-2 DoC 版を、体験する仮想空間をパイロットサイト的な集落に変更し名称も(ⅲ)SVR-3 へ変更することとした（特徴としての「DoC の振動台を使用する」という点は保持）。また、（変更前プラン）(e)VR 施工訓練システムとして構想していた VR 体験は、当 SATREPS プロジェクトで開発された版築建築の構築手順の VR

体験(iv)SVR-4 として構築することとなった。なお、(iv)SVR -4 は、(i)SVR-1 と同様にスタンドアロンの VR ヘッドセット Meta Quest2 を用いて、学校や地方での住民教育に活かされる予定である。

表 5-1：変更前プラン

	(a)SVR-1	(b)SVR-2 メタバース版	(c)SVR-2 ポータブル版	(d)SVR-2 DoC 版	(e)VR 施工訓練システム
使用機材	Meta Quest	VIVE Cosmos	VIVE Cosmos、高性能 GPU 搭載ノート PC	VIVE Pro 2、高性能 GPU 搭載ノート PC、センサー	Meta Quest
特徴	スタンドアロン型 VR	メタバースを活用	PC-VR をノート PC に接続して使用	DoC の振動台を使用	未定（11 月の渡航時に検討予定であった）
仮想空間	版築屋内	DoC 実大実験場（b，c，d すべて同じ空間）			
主な用途	学校や地方での住民教育	体験型プロジェクト・アーカイブ	学校や地方での住民教育	DoC でのイベント時	

表 5-2：変更後プラン

	(i)SVR-1(再構築版)	(ii)SVR-2	(iii)SVR-3	(iv)SVR-4
使用機材	Meta Quest2	Meta Quest2、高性能 GPU 搭載ノート PC	Meta Quest2、高性能 GPU 搭載ノート PC、センサー	Meta Quest2
特徴	スタンドアロン型 VR	メタバースを活用	DoC の振動台を使用	スタンドアロン型 VR
仮想空間	版築屋内	DoC 実大実験場	パイロットサイト	版築家屋
主な用途	学校や地方での住民教育	体験型プロジェクト・アーカイブ	DoC でのイベント時	学校や地方での住民教育

11 月の渡航前に SVR-1 はほぼ完成し、渡航後すぐに DDM エンジニアに技術移転し、その後 Ura での住民教育で実際に運用が開始された（図 5-12)。また、メタバースを活用した SVR-2 についても 11 月の渡航時にほぼ完成し、プロジェクト終了時の 2023 年 3 月までに再度 DoC, DDM と協議の上、細部を整理してメタバースに公開する予定である（図 5-13)。SVR-2 への訪問者はブータンの伝統衣装を着たアバターを纏って DOC に設置された実大実験場のデジタルツインを散策可能である。DoC の振動台を活用する SVR-3 については、11 月に現地で体験デモを実施した（図 5-14)。その時点では、振動台の振動と VR 空間内の地震の揺れの同期システムが未完成であったが、3 月の渡航時までに完成させ、技術移転を行う予定である。SVR-4 については、11 月にその体験内容について DDM メンバーと具体的に検討し、帰国後の 12 月より作業に取り掛かっている。この SVR-4 についても SVR-3 と同様に 2023 年 3 月の渡航時に完成および技術移転を行う予定である。

本 SATREPS プロジェクトでは、減災教育 VR として SVR-1, SVR-2, SVR-3, SVR-4 の 4 種の VR 体験システムを完成させるが、これらを用いた減災啓発教育は、DDM が主導し、適宜 DoC と協働してイベント形式で実施される予定である（既に一部実施開始されている)。具体的には、ポータブルである SVR-1、SVR-4 は DDM 職員がルーラルエリアや教育施設へ持参してイベントを開催する等して住民が VR 体験できる場を作り、ロケーションベース VR である SVR-2、SVR-3 については DoC に住民を招く形でのイベント開催となることを計画している（SVR-2 については、インターネットに接続されたある程度のスペックを満たす PC 等があれば世界中どこからでもアクセスできるが、ブータンでは VR がまだ一般に普及していないため、イベント等の住民教育の場での披露となる)。

図 5-12： SVR-1 再構築版（画像右半分は体験の様子，コントローラー無しで体験可能）（2022.11）

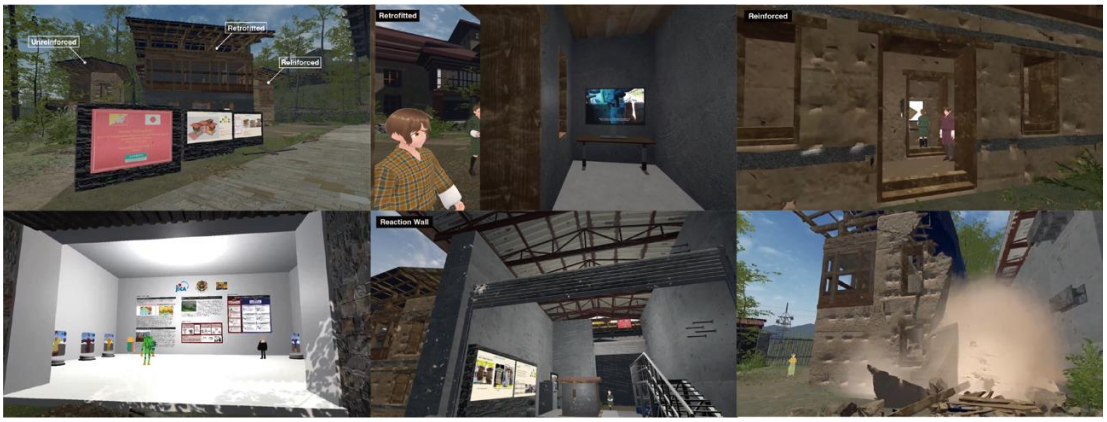


図 5-13：完成状態のメタバースを活用した SVR-2（2022.11）

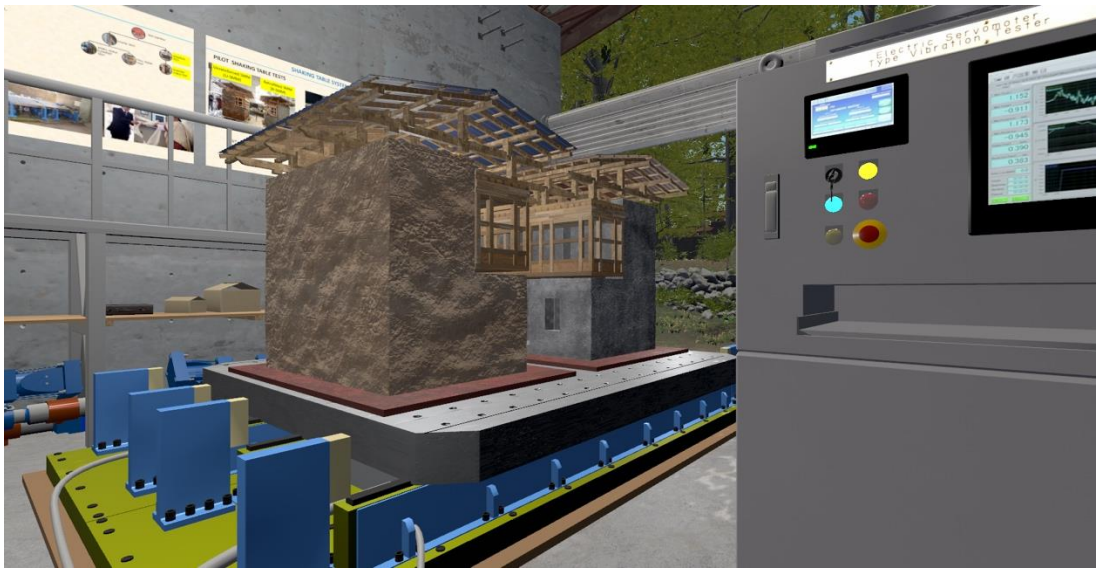


図 5-13-2：完成状態（微調整後）のメタバースを活用した SVR-2（2023.4）

図 5-14：SVR-3 デモ体験@DoC（右上の画像は体験者の様子，それ以外は仮想空間内のパイロットサイトの様子）（2022.11）

(3-3) 指導者教育（ToT）

3-3-1) 構造計算法の研修

耐震性を判断するための簡易な構造計算法に関する研修を下記のように実施した。

i. 2021 年 9～11 月にかけての 4 日間、SATREPS に参加する DoC と DES エンジニアを対象にオンライン研修を実施

ii. 2021 年 10 月の 3 日間、5 県から参加した 10 名の県エンジニアを対象に、ブータン側は対面で、日本側はオンラインでつないで研修を実施

本研究で実施した実験内容と解析結果、耐震化マニュアルの内容と施工手順、ハザードマップ・リスクマップの活用についての研修を下記のように実施した。

iii. 2022 年 12 月の 2 日間、10 県から参加した 90 名の県エンジニアを対象に、内務文化省文化局(DoC)および公共事業省技術支援局(DES)によって、オンライン研修を実施

ハザードマップやリスクマップは、国土計画や地区計画を作成するうえで非常に有用であり、国や県のプランナーに活用してもらうよう、研修内容に加えた。

(3-4) 施工者教育（ハンズオン研修）

i. 2021 年 11 月の 2 日間、版築造のレトロフィット（改良）工法（ワイヤーメッシュをセメントモルタルで塗り込み）を実際の建物に施工するハンズオン研修を、内務文化省文化局(DoC)および公共事業省技術支援局(DES)の主催により実施した。この研修は、Wangdue 県 Dangchhu 郡の古民家を利用して、大工棟梁・石工と県エンジニア計 20 名を対象に実施した（図 5-15)。

その後も同様のハンズオン研修を実施する予定だったが、COVID-19 蔓延により中止となり実施の見通しもつかない状況となった。この間に、研修に供する予定だった建物の補修工事や新築工事が進捗してしまい、制限解除となってもハンズオン研修を実施できる見込みがなくなったため、再開不可能の事態に備えて、耐震化工法の施工を説明するパワーポイントや動画を作成することとした。これらの教材は、3-2-1)で述べた WEB サイトに公開している。2022 年 8 月に渡航が再開されたため、9 月以降にハンズオン研修を実施すべく計画が見直された。

ii. 2022 年 9 月の 2 日間、撮影および施工性確認のために 8 月に DoC 敷地内に建築し

た F 型モックアップを利用して、版築造住居の新築工事のためのハンズオン研修を、内務文化省文化局(DoC)および公共事業省技術支援局(DES)の主催により実施した。8 名の大工棟梁・石工と 4 名の県エンジニアが参加した（図 5-16)。

iii. 2022 年 11 月～12 月の 4 日間、Bumthang 県 Chumay 郡において、石積造住居の新築工事およびレトロフィット工事のためのハンズオン研修を、内務文化省文化局(DoC)および公共事業省技術支援局(DES)の主催により実施した。8 名の大工棟梁・石工と 23 名の県エンジニアが参加した（図 5-17)。

図 5-15：版築造住居のレトロフィット研修

図 5-16：版築造住居の新築工事研修

図 5-17：石積造住居の新築工事およびレトロフィット研修

(3-5) 住民教育

伝統工法の住宅建築には、建築士やエンジニアなどは全く関わらず、棟梁がその経験によって図面作成の必要もなく建築を担っているため、一般的な建築設計という行為に対する理解は低く、耐震設計に対する理解も高いとはいえない。それでも、2009 年と 2011 年の地震以後、建物の耐震化に関心を持つ住民はある程度存在している。耐震化技術の施工実績を持つ棟梁がいて、技術的な指導を受けることができれば、そうした技術を取り入れることに理解を示す住民（耐震設計について理解できなかったとしても）は一定程度現れるものと推測される。

家屋の耐震性向上だけでなく、一般的な暮らし方や避難の仕方（家具の緊結や地震発生時にはまず頭を守るなど）を DDM が指導している。さらに、これまでの地震被害の知見を踏まえ、地震発生時に家屋内にとどまる場合は壁際を避けて部屋の中央で姿勢を低くすること（2009 年と 2011 年の地震では、外壁が外側に崩壊したケースがほとんどであり、崩壊しないまでも外壁に挿入されていた根太が抜けたケースが散見されたが、片側はまだ壁に差し込まれたままなので三角の空間ができる）などを提案していく。

一方、ハザードマップやリスクマップについては最小限の説明を行った。農村集落では識字率も低く、地図を理解できる人も多くはない。そのためハザードマップやリスクマップにおける位置関係を把握することは多くの人にとって困難であるし、また、その

意味するところを正しく理解してもらうことは現時点ではあまり期待できないと判断したためである。

i. 2022 年 10 月に西部パイロットサイトの Essuna で実施。内務文化省災害管理局(DDM)が地震への備えの大切さを講義し、参加者とともに集落内を回って、避難計画を作成した。内務文化省文化局(DoC)および公共事業省技術支援局(DES)は、建築の耐震化の重要性と耐震化工法について説明した（図 5-18)。

ii. 2022 年 11 月に中部パイロットサイトの Ura で実施。上記の内容に加え、SVR1 によるバーチャルリアリティー体験も実施した（図 5-19)。

図 5-18：Essuna 住民へ避難計画について説明

図 5-19：VR 体験

②研究題目３のカウンターパートへの技術移転の状況

耐震化マニュアルの開発やその他の教材開発、普及方針の検討を通じて、研究の成果を社会実装、行政活動、法整備等につなげるための能力開発を行った。研究成果を社会実装する時の社会に対する様々なインパクトを検討することの重要性を理解してもらった。

2019 年 10 月末に実施した SVR-1β のデモンストレーションを起点に技術移転を進めていく予定であったが、間も無くコロナ禍に入ったため、具体的に機材等の物を介した技術移転が困難となり、Web 会議やメール等のオンラインベースのやりとりで技術移転の可能性を探った。その後 2021 年からは、上記（「減災教育 VR」の項目で記述）の通り、メタバースを用いた減災教育の可能性を検討し、同時にそのメタバース版を活用した技術移転を検討しながら進めてきたが、インターネットや機材の不具合等のため実現には至らなかった。ただし、メタバース版（最終的には「SVR-2」と命名）の開発は進んだため、その特性を活かし本 SATREPS プロジェクトのデジタルアーカイブ・メディアとして運用することとなった。なお、SVR-2 は 2023 年 1 月の時点でほぼ完成しており、今後は、公開前の最終チェックを経て、公開し、運用のための技術移転は 2023 年 3 月に実施を予定している。

2022 年 11 月の 2 日間 DDM 庁舎にて、DDM エンジニアに対して減災教育 VR、SVR-1（再構築版）の技術移転、および、住民教育のための研修を行った（図 5-20)。SVR-3、SVR-4 の技術移転については上記の SVR-2 と同じ時期 2023 年 3 月を予定している。

図 5-20：SVR-1（再構築版）の技術移転、および、指導者教育@DDM（2022.11）

③研究題目３の当初計画では想定されていなかった新たな展開

COVID-19 蔓延によりハンズオン研修が中止となり実施の見通しもつかない状況となった。そのため、耐震化工法の施工を説明する３D グラフィックやＦ型モックアップを建築してその過程を撮影編集した動画などを作成して、県エンジニアを対象としたオンライン研修や大工棟梁・石工を対象としたハンズオン研修の教材として使用した。ハンズオン研修は実際の建物で実施予定だったがロックダウン中に工事が進んでしまったためモックアップを利用して対応した。

④研究題目３の研究のねらい（参考）

耐震化技術の普及（社会実装）のための実施体制を確立し、研究題目１、２の成果である地震ハザード予測、地震リスク評価、耐震化技術の開発に基づきマニュアルや研修用素材、VR による減災教育教材などを開発して、指導者教育、技術者・施工者教育、住民教育を実施することで、ブータンにおける地震時の減災に貢献する。

⑤研究題目３の研究実施方法（参考）

研究題目１、２の成果に基づき、耐震化マニュアルを説明するパワーポイントスライド、ピクトグラムを使用した施工マニュアル、３D グラフィック、動画、VR による減災教育教材を開発する。これらの素材を DoC と DES の WEB サイトにアップし誰もが閲覧できるようにする。指導者教育、技術者・施工者教育、住民教育を実施して社会実装の推進を図る。普及の方針を検討して各関係機関の合意を得、研究期間終了後もその方針に沿って社会実装が進められるよう準備する。

Ⅱ．国際共同研究実施上の課題とそれを克服するための工夫、教訓など（公開）

(1)プロジェクト全体

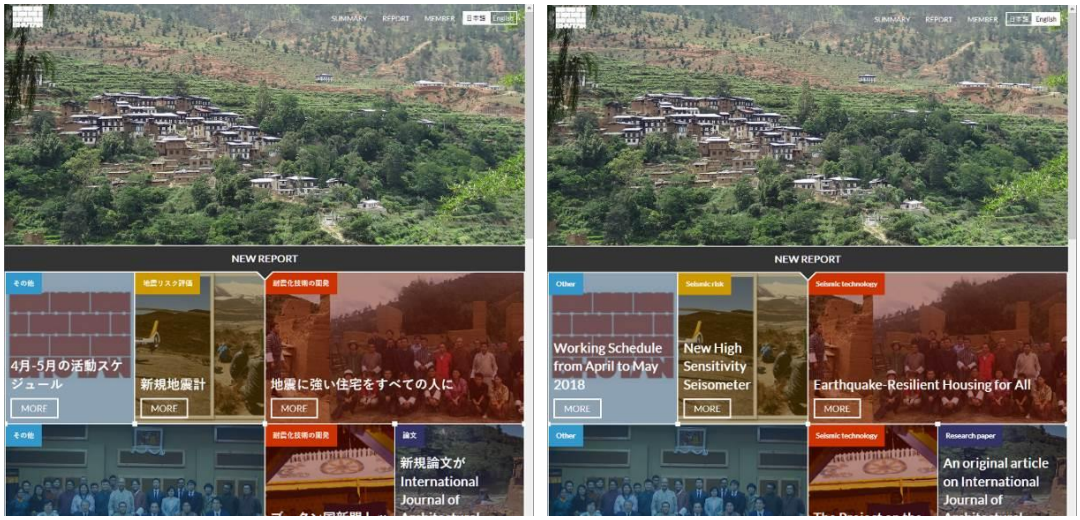
・プロジェクト全体の現状と課題、相手国側研究機関の状況と問題点、プロジェクト関連分野の現状と課題。

国内およびブータンの関係する機関が多く、その調整に時間がかかるため、より効率的な連絡方法、調整方法の必要性を感じている。また、ブータン側の研究者の人事異動により能力強化の効果が損なわれている。DDM では、相手国研究代表者が定年退職し、次の Karma Tsering 局長が異動になり、副責任者だった Yeshey Lotey も異動になった。現在も、DDM の局長が空席のままである。DGM では、副責任者であり、地震ハザードマップ作成担当の Jamyang Chopel が他部署に異動となった。DoC ではワーキングメンバーの Jigme が退職した。プロジェクト開始から 2 年間で 6 名がいなくなっている。今後予測される同様の人事異動に対応するために、技術移転は必ず複数に対して行うこと、および複数に対しての実施が経済効率の悪い本邦研修を減らすことを検討する。一方、ブータン政府の、特に技術系職員は、例えば日本であれば民間企業や研究機関に外注するような事業、調査、研究等を自前で実施しているが、これまで技術系の教育を受けた優秀な人材が、政府機関に集中してきたためである。昨今では、公務員を辞して起業する技術系職員も多くみられるようになり、このことは個別のプロジェクトの効率のみを考えれば大きな損失である。しかし、他方で、こうした人材が民間に移り、技術の裾野を広げていくことは、長い目で見たブータンの国づくりにとって大変重要なことである。そうであれば、本プロジェクトに参加した技術者たちが、もしも将来退職して起業したとしても、このプロジェクトで得た技術を生かせるよう訓練すること、そしてこれにより、政府が監督機関としての本務に傾注し、個別の事業、調査、研究等を起業者に外注できるような環境づくりを支援することを、大きな目標として考えるべきである。

ブータンの機関内での情報共有が上手く行われていないため、情報共有を徹底させる必要性を感じている。

・各種課題を踏まえ、研究プロジェクトの妥当性・有効性・効率性・インパクト・持続性を高めるために実際に行った工夫。

研究プロジェクトのインパクト、持続性を高めるため、日本側では 2016 年度に作成したホームページの情報更新に努めた（図 6-1）。ホームページの URL は、http://www.satreps-bhutan.jp/である。一方、ブータン側では COVID-19 蔓延によりハンズオン研修が中止となり実施の見通しもつかない状況となったため、県エンジニアを対象としたオンライン研修ができるように、イラストや動画で耐震化工法の施工を説明するホームページ（図 5-12）の作成を進めている。これらのサーバに、本 SATREPS の成果を入れておくことで、担当者が異動になった際にも関係機関内での情報共有が徹底されると考えている。



(a) ホームページ（日本語）　　(b) ホームページ（英語）

図 6-1：ホームページ

提案する耐震化手法が地域社会や文化に与えうる影響を CP とともに検討した。また、地方におけるインフラ整備や行政執行能力の現状、流通、関連法整備状況など、実際の社会状況に鑑みて、実効性のあるガイドラインの内容や構成を CP とともに検討している。研究成果を社会実装につなげるために必要な多角的な視点と課題解決力を CP 機関に育むため、ガイドラインや研修コンテンツの作成プロセスを活用している。当初からのプロジェクト参加者であるエンジニアだけでなく、CP 機関所属のアーキテクトにも参加してもらっている。

・プロジェクトの自立発展性向上のために、今後相手国（研究機関・研究者）が取り組む必要のある事項。

相手機関で専門性は異なるが、例えば経済省地質鉱山局（GDM）のスタッフは地質学には詳しいが地震観測に不可欠な情報通信の知識・経験がないため、IT 担当者の採用もしくは経済省の IT 部門による支援の強化が不可欠であると考える。内務文化省文化局(DoC)のスタッフは版築造とマッドモルタルを使用した石積の構造には詳しく、一方、公共事業省技術支援局（DES）のスタッフはセメントモルタルを使用した石積の構造には詳しいが、両局とも既存組積造の耐震補強や新築組積造の耐震化に対するアイディアの提案に消極的で、材料実験や試験機器の取り扱いの知識・経験が乏しい。そのため、目的意識を高め、自発的なアイディアの提案を促すとともに、実験担当者の採用や機器メンテナンス担当者の採用が不可欠であると考える。ブータン側は毎年、RGoB 予算により、実験および機器メンテナンスを担当する人員の確保を行っているが、継続的に予算確保できるような支援を行う。

・諸手続の遅延や実施に関する交渉の難航など、進捗の遅れた事例があれば、その内容、解決プロセス、結果。

実験用地の変更に伴い、試験体数が 2018 年度と 2019 年度の 2 年間で計 8 体から計 6 体に変更となり、ブータン側と協議をして試験体の仕様を決定した。日本側予算に加え、予算措置が認められたブータン側 RGoB 予算により、さらに 2 試験体の実大実験ができるようになった。新型コロナウィルス感染症の影響で日本側研究者が渡航できなかったため、また、ブータンで度重なるロックダウンがあったため、実験や社会実装に向けての取り組みに遅れが出た。リモートでカバーしきれない部分ができたため、a)まず、耐震化工法の要所をすべて含んだモックアップを建設し、その過程を写真や動画で記録し、解説やイラストを付して Web サイトを作成し、b)この Web サイトを活用して、オンライ

ンや状況が許せば対面での研修を実施し、c)Web サイトを本事業終了後の継続的な研修実施に役立ててもらい、また、一般の閲覧を可能にして、ガイドラインの解説の用にも供することとした。

(2)研究題目１：「地震リスク評価」

研究グループ A：地震ハザード予測（リーダー：井上公、担当：1-1～1-5）

・ 相手国側研究機関との共同研究実施状況と問題点、その問題点を克服するための工夫、今後への活用。

震源観測網強化による地震活動の把握は、通信回線（当初ブータンテレコム、その後は政府による GWAN）の品質の低さと、DGM の計算機ネットワークのセキュリティ対策の不備に起因する受信サーバのダウンによって、十分なデータの収集ができず、当初の目標に達することができなかった。ITC 知識の乏しい DGM スタッフによる解決が望めないため上部組織である経済省(MoEA)の ICT 担当者の支援を得たが、解決することはできなかった。通信およびセキュリティ環境が整っていることは地震観測の前提条件であり、上部組織の ICT 担当者に対する ICT 教育は本課題のスコープ外であるため問題の解決に至らなかった。事態改善の最後の試みとして 2023 年 3 月に一般携帯回線を利用して停止していた５か所のうち３か所を復活することができた。

震度観測は、震源観測に比べてデータ量が少ないこと、最悪の通信環境を前提としてデータ量を最小限にしていること、各種原因による稼働率の悪さを前提としてローコスト多点観設計を設計理念としたこと、一般の ICT 環境（Windows とインターネット）を用いていることで、ブータン全土の震度情報の収集・発信は実現できている。

微動観測は今後ブータンの各都市で実施する必要があるが、より簡易で安価な計測システムの実用性を確認したことで、その実現性が高まった。

地震ハザードマップは、当初計画では取得した新たなデータ（震源分布、距離減衰式、地盤増幅度、活断層）を入力データとし、GEM による OpenQuake を用いて作成して同時にその技術移転を行う予定であった。震源分布と距離減衰はもともと３～４年と言う短期間で十分なデータが蓄積するものではないため成果への影響は大きくはなく、微動による地盤増幅と活断層モデルは予定通り実施できた。しかし OpenQuake による地震ハザードマップは、DGM の担当者の交代と新型コロナによる期間延長に伴う日本側担当者の活動の制限により十分に実施することができず、最悪シナリオの M7.8 地震の強震動計算のみおこなった。確率的地震動予測に関しては代替策として既往研究の欧米研究者の協力を得て、最悪シナリオ地震よりも高頻度小振幅の、伝統住宅の住民教育により有効な、ハザードマップが作成できた。

・ 類似プロジェクト、類似分野への今後の協力実施にあたっての教訓、提言等。

ブータンに限らず開発途上国の電源や通信の環境は日本に比べて数段悪い。最悪の環境でも最低限のデータが得られるシステム設計が必要である。カウンターパートの人的資源や予算についても同様のことが言える。事前調査当時からの状況変化に対応するための二の手・三の手を繰り出すことを可能にする柔軟なプロジェクト実施体制が求められる。

研究グループ B：地震リスク評価（リーダー：高橋典之、担当：1-6）

・ 相手国側研究機関との共同研究実施状況と問題点、その問題点を克服するための工夫、今後への活用。

当研究を進めるためには、研究グループ A および研究グループ C の進捗が欠かせないものである。その意味で、研究グループ A および研究グループ C の問題点克服がそのまま研究グループ B の推進に直結する。研究期間の前半では、研究グループ A のハザード評価に適した地域と、研究グループ C の耐震性能評価に適した建物群エリアと

の、両条件を満たす地域の選択に苦労をした。候補地の選択までは進むものの、実際の視察の結果、どちらかの条件を満たせないことが判明するなどの問題があったが、最終的にEssunaおよびUraをパイロットサイトとすることで先に進めることが可能となった。

研究期間後半では、新型コロナウィルスのパンデミックによる行動制限が大きく影響したが、研究グループ A のハザード評価結果をリスク評価に展開する際の技術運用容易性について検討するとともに、現地担当者（ブータン技術者）が将来的にリスク評価を容易にできることを目的として、現地担当者が使いやすい I/O デバイスとして、Microsoft Excel を用いたフラジリティ計算シートおよびこれをリスクマップ描画する手法を検討してインストラクション資料を作成するとともに、現地の要望を踏まえて MATLAB（のスタンドアロンプログラム版）を用いた詳細リスクマップ描画プログラムも作成した。

・ 類似プロジェクト、類似分野への今後の協力実施にあたっての教訓、提言等。

上述したように、当研究と類似のプロジェクトにおいても、まずはハザードの解明（研究グループ A)、対象構造物の基本的な構造特性の把握と施工コスト情報の集約(研究グループ C）が前段にあって、これをもって脆弱性評価ならびにリスク評価へと展開できることから、まずはその基本情報を入手できるように、先方との調査協力実施体制（特に、現地情報の確度を高めるため、現地担当者（ブータン技術者）が理解度を深めた状態で参画できる体制になっているか）を確認しながら調整しろをもってプロジェクトを進めることが肝要である。特に新型コロナウィルスのパンデミックによる行動制限に代表されるような不測の事態が生じたときの打開策検討においても、調整しろを持っておくことの重要性が強く認識された。

また、現地担当者が使いやすいデバイスの選定とそれに見合う観測データ形式の生成が重要なプロジェクトにおいて、移転技術の合意形成に慎重な判断が必要になる場合がある。当初、高度な技術提供を相手方が希望していても、実際に手を動かす段階で、それを（技術的・経済的に）将来に渡り運用し続けられない可能性がある場合は、適用可能性を踏まえた技術提供形式への変更を柔軟に対応できるようにする必要がある。

(3) 研究題目 2：「耐震化技術の開発」

研究グループ C：耐震化技術の開発（リーダー：宮本慎宏）

・ 相手国側研究機関との共同研究実施状況と問題点、その問題点を克服するための工夫、今後への活用。

研究代表者の青木と共同研究者の宮本は、2011 年度文化庁委託文化遺産保護国際貢献事業（専門家交流）で版築建築の地震被害調査を実施するとともに、2012～2014 年度文化庁委託文化遺産国際協力拠点交流事業でブータン王国の版築造建造物保存に関する調査研究を実施した。さらに、世界銀行 PHRD プロジェクト（2015 年 6 月～2016 年 8 月）で、版築建築の耐震化のためのガイドラインの作成に取り組み、5 年以上に渡ってカウンターパートである内務文化省文化局(DoC)との協力体制を築いてきた。しかし、実大実験を行うための用地確保に向けた交渉が滞り、プロジェクトの進行に影響が出てしまった。結果的に実大実験の試験体数が変更となり、全体スケジュールの変更を余儀なくされた。今後はカウンターパートとの密な連絡体制を築く必要がある。

実大実験を行うための用地確保に向けた交渉が滞り、プロジェクトの進行に影響が出てしまった。実大実験の試験体数が変更となり、全体スケジュールの変更を余儀なくされた。今後はカウンターパートとの密な連絡体制を築く必要がある。日本側予算とブータン側 RGoB 予算により、最終的には、当初計画通りの試験体数の実験が可能となる見通しである。

・ 類似プロジェクト、類似分野への今後の協力実施にあたっての教訓、提言等。

ブータン王国の内務文化省文化局(DoC)の技術者は、日本の国家公務員とは異なり、現場に出向いて施工管理や技術支援を行うため、政策的なアドバイスよりも実践的な技術移転を求める傾向にある。研究成果を継続的に蓄積し、長い年月をかけて確立する建物耐震化の技術開発などを行う際には、将来展望を含めた長いスパンの計画を提示し、それに対する理解を促進させることが重要である。ブータン王国で入手可能な建設材料は非常に限られ、また、都市部と地方で手に入る材料も異なるため、補強工法を考える際は、比較的簡単に手に入る建設材料を用い、かつ低コストの工法を開発する必要がある。

(4) 研究題目 3:「耐震化技術の普及」

研究グループ D:耐震化技術の普及 (リーダー:向井純子)

・ 相手国側研究機関との共同研究実施状況と問題点、その問題点を克服するための工夫、今後への活用。

現地での資料収集とヒアリングに基づき、新築版築造と新築石積造の施工マニュアルと VR による減災教育教材のドラフトを作成した。内務文化省災害管理局(DDM)、内務文化省文化局(DoC)、公共事業省技術支援局(DES)の建築家や技術者、施工者からの意見を反映させ、10 月に現地で再度ヒアリングを行う予定で、今後は内務文化省災害管理局(DDM)と教育方法について打合せを行う予定である。

渡航ができない状況にあって打合せや研修はオンラインで実施したが、意思疎通レベルの低下は否めない。それをカバーするため、SNS も活用して、CP と頻繁にコミュニケーションを図っている。ロックダウン中、そしてロックダウン明けの繁忙により、CP 間でもコミュニケーションが滞りがちのように見受けられるため、定期的にオンライン会議をするようにしている。

・ 類似プロジェクト、類似分野への今後の協力実施にあたっての教訓、提言等。

2019 年 5 月にネパールの NSET で研究成果発表と意見交換を行ったが、開発途上国における Non engineered 向けの建設マニュアルなどを参考にしつつ、他プロジェクトや外国人研究者との協同できる体制作りが重要である。

Ⅲ．社会実装（研究成果の社会還元）（公開）

(1)成果展開事例

- 全国２２５カ所（既設 20 県庁舎＋205 新設市町村庁舎）の震度観測網が稼働し、有感地震の情報が防災局に共有されている。
- 微動観測による地震動の地盤増幅度測定技術が移転されたことにより、DGM がパイロット地域以外の地域で測定を実施できるようになった。
- 活断層マップとハザードマップを DDM が RiskPortal 上で公開し一般の利用に供している。
- 伝統的民家の常時微動計測による構造特性評価技術が移転されたことにより、DoC と DES がパイロットサイト地域以外の地域でも測定できるようになった。
- 地震リスク評価技術が移転されたことにより、DoC と DES がパイロットサイト地域以外でも地震リスク評価ができるようになった。
- 現地で版築造の含水量の計測ができるように、また採取コアの圧縮強度とヤング係数が測定できるように装置の改良を行い、現場での作業効率を図った。
- 静的実験、振動台実験の加力・計測・分析技術が移転されたことにより、相手国で継続的に実験が可能となった。
- イラストや動画で耐震化工法の施工を説明するホームページを作成し、県エンジニアを対象としたオンライン研修を行っている。
- 本研究で提案する耐震工法の現行法規への反映を行った。

(2)社会実装に向けた取り組み

- ブータン各地における住民とのリスクコミュニケーションに活用できるブータン全土の地震ハザードマップを 2022 年 12 月に作成した。
- 本研究で提案する耐震工法の現行法規への反映を行った。
- 本研究成果をインターネット（URL は、http://www.satreps-bhutan.jp/）で公開し、一般に情報提供している。

Ⅳ．日本のプレゼンスの向上（公開）

ブータン国初の地震観測網と震度観測網の運用・高度化は日本のプレゼンスの向上に貢献している。

2017 年 9 月 21 日には、ブータン国営放送 BBS テレビの全国放送ニュースで、同日に実施した版築造の引き倒し実験の様子が放送されるとともに、研究代表者とカウンターパートがインタビューに答え、プロジェクトの意義について発信している。2017 年 12 月 26 日には、ブータン国営放送 BBS テレビのトップニュースで、ブータン国皇太后様がご臨席なさった本プロジェクト実験施設建設地鎮祭の様子が放送され、研究代表者とカウンターパートがニュースに生出演し、プロジェクトの意義について発信している。翌 12 月 27 日には、ブータン国皇太后様がご臨席なさった本プロジェクト実験施設建設地鎮祭の様子が、ブータン国新聞 Kuensel 紙のトップに掲載された。

2018 年 10 月 1 日～11 月 9 日まで、文部科学省「情報ひろば」にて、「～暮らしを守る～歴史的建造物の保存再生技術とモニタリング」で SATREPS プロジェクトの内容をパネルで発信し、2018 年 10 月 25 日には、毎日新聞で「大学倶楽部・名古屋市立大学 歴史的建造物の保存再生技術とモニタリング展　文部科学省で 11 月 9 日まで」で取り上げられた。2018 年 12 月 28 日には、ブータン国営放送 BBS テレビの全国放送ニュースで、版築造の実大実験の様子が放送されるとともに、2019 年 1 月 1 日には、実大実験の様子がブータン国新聞 Kuensel 紙の全国紙 3 面に掲載された。2019 年 2 月 28 日には、日本の防災に対する取り組みの例として Euronews の Global Japan の 5 分番組で本プロジェクトが取り上げられ、欧州で放送、Web で公開中である。2019 年 3 月 22 日には、ブータン国営放送 BBS テレビの全国放送ニュースで、振動台の様子が放送されるとともに、2019 年 3 月 23 日には、ブータン国新聞 Kuensel 紙の全国紙 18 面に掲載された。2019 年 12 月 19 日に BBS テレビの全国放送ニュースで、石積造の振動台実験の様子が放送されるとともに、翌 20 日に Kuensel 紙の全国紙 5 面に掲載された。2020 年 2 月 6 日に BBS テレビの全国放送教育テレビで２回、地震を知る、が放送された。2021 年 11 月 6 日に BBS テレビの全国放送ニュースで、技術者教育の様子が放送されるとともに、12 月 29 日に蛇籠を用いた土モルタル石積造の静的実験の様子が放送された。

Ⅴ．成果発表等【研究開始～現在の全期間】（公開）

Ⅵ．投入実績【研究開始～現在の全期間】（非公開）

Ⅶ．その他（非公開）

以上

Ⅴ. 成果発表等

（1）論文発表等【研究開始～現在の全期間】（公開）

①原著論文（相手国側研究チームとの共著）

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ－おわりのページ	DOIコード	国内誌/国際誌の別	発表済/in press/acceptedの別	特記事項（分野トップレベル雑誌への掲載など、特筆すべき論文の場合、ここに明記ください。）
2016	小西孝明、宮本慎宏、青木孝義、江原夏季、ペマ、プンツォ・ワングモ、ブータン王国における伝統的民家の耐震補強工法に関する実験的研究、構造工学論文集、2017.3、Vol.63B、359-367		国内誌	発表済	
2017	Phuntsho Wangmo, Kshitij C. Shrestha, Mitsuhiro Miyamoto, and Takayoshi Aoki, Assessment of out-of-plane behavior of rammed earth walls by pull-down tests, International Journal of Architectural Heritage, 2018, 13 Feb 2018 published online	10.1080/15583058.2018.1433903	国際誌	発表済	
2018	K.C. Shrestha, T. Aoki, T. Konishi, M. Miyamoto, J. Zhang, N. Takahashi, P. Wangmo, T. Aramaki, N. Yuasa, Full-scale pull-down tests on a two-storied rammed earth building with possible strengthening interventions, R. Aguilar et al. (Eds.): Structural Analysis of Historical Constructions, RILEM Bookseries 18, pp.1557-1565	10.1007/978-3-319-99441-3_167	国際誌	発表済	Scoupusで版築造分野被引用数 Top 15%
2019	K.C. Shrestha, T. Aoki, M. Miyamoto, P. Wangmo, Pema, In-plane shear resistance between the rammed earth blocks with simple interventions: experimentation and finite element study, Buildings, 2020, Vol.10, Issue 3, 13 Mar 2020 published online	10.3390/buildings10030057	国際誌	発表済	
2020	K.C. Shrestha, T. Aoki, M. Miyamoto, P. Wangmo, Pema, J.Y. Zhang, N. Takahashi, Strengthening of rammed earth structures with simple interventions, Journal of Building Engineering, Vol.29, pp.1-10, 2020.05	https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101179	国際誌	発表済	掲載誌 Journal of Building Engineering Top10 % Journal
2020	Pennacchio Roberto, F. De Filippi, M. Bosetti, T. Aoki, P. Wangmo, Influence of Traditional Building Practices in Seismic Vulnerability of Bhutanese Vernacular Rammed Earth Architecture, International Journal of Architectural Heritage, pp.1-20, 2020.07	https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1785044	国際誌	発表済	
2020	P. Wangmo, K. C. Shrestha, T. Aoki, M. Miyamoto, Pema, Strengthening strategies for existing rammed earth walls subjected to out-of-plane loading, CivilEng, Vol.1, Issue 3, pp.229-242, 2020.10	https://doi.org/10.3390/civileng1030014	国際誌	発表済	
2020	P. Wangmo, K. C. Shrestha, T. Aoki, Exploratory study of rammed earth walls under static element test, Construction and Building Materials, Vol.266, Part A, pp.1-23, 2021.01	https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121035	国際誌	発表済	
2023	Roberto Pennacchio, Francesca De Filippi, Takayoshi Aoki, Phuntsho Wangmo, Appropriate Strengthening Technologies for the Mitigation of Seismic Vulnerability of Bhutanese Vernacular Stone Masonry Architecture, International Journal of Architectural Heritage, pp.1-26	https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2199010	国際誌	発表済	

論文数 9 件
うち国内誌 1 件
うち国際誌 8 件
公開すべきでない論文 件

②原著論文（上記①以外）

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ－おわりのページ	DOIコード	国内誌/国際誌の別	発表済/in press/acceptedの別	特記事項（分野トップレベル雑誌への掲載など、特筆すべき論文の場合、ここに明記ください。）
2022	向井純子，ブータンにおける建築許可制度 法整備と制度運用の現状，芸術工学への誘い，名古屋市立大学大学院芸術工学研究科紀要，Vol.27，2023，pp.57-68		国内誌	発表済	

論文数 1 件
うち国内誌 1 件
うち国際誌 0 件
公開すべきでない論文 件

③その他の著作物（相手国側研究チームとの共著）（総説、書籍など）

年度	著者名,タイトル,掲載誌名,巻数,号数,頁,年		出版物の種類	発表済/in press/acceptedの別	特記事項

著作物数 0 件
公開すべきでない著作物 件

④その他の著作物（上記③以外）（総説、書籍など）

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ－おわりのページ		出版物の種類	発表済/in press/acceptedの別	特記事項
2023	青木孝義，ブータンにおける伝統建築物耐震化の取り組み－ブータンにおける組積造建築の地震リスク評価と減災技術の開発－，建築防災，2023.4，pp.10-15		総説	発表済	

著作物数 1 件
公開すべきでない著作物 件

⑤研修コースや開発されたマニュアル等

年度	研修コース概要(コース目的、対象、参加資格等)、研修実施数と修了者数	開発したテキスト・マニュアル類	特記事項
2017	供与機材3Dレーザースキャナ実機訓練 2017/9/26-9/28 目的:3Dレーザースキャナーの使い方習得 対象:DOCエンジニア7名 講師:シュレスタ特任助教(名古屋市大)		現地研修
2017	供与機材 振動台・ジャッキシステム研修 2018/1/26-2/1 目的:供与機材取扱いや維持管理方法の実機訓練を供与側の実務者へ対して行い、供与後も適切な機材運用と維持ができるよう持続発展性を担保するため。対象:DOC2名 講師:供与機材メーカー		本邦研修
2017	Microtremor Survey Training 2018/2/26 目的:微動測定の方法論理解と実技習得 対象:DGM3名 講師:大見士朗准教授(京大)・林田拓己主任研究員(建築研究所)	Microtremor Survey Basics Data Processing	本邦研修
2017	Active fault and earthquake disaster mitigation 2018/3/9 目的:To understand the mechanism of active fault likely to cause earthquakes. 対象:DGM, DOC, DDM, DES他 20名 講師:中田高 名誉教授(広島大)		現地セミナー
2018	供与機材静的ジャッキオペレーション訓練 2018/1 対象:DOC2名 講師:供与機材メーカー	Simplified Operation Manual for Loading Experiment with Force Application and Operation Manual of Manual Pump	本邦研修
2018	Drones for Disaster Management 2018/5/7 目的:ブータン防災関係者がドローン防災可能性を理解するため 対象:DGM、DDM、DES 32名 講師:井上公主任研究員(防災科研)		現地セミナー
2018	ICT lecture -UNIX and TCP/IP Network Introductions 2018/9/12-9/13 目的:DGMが地震観測網を運営維持するためのICT関連基礎知識を理解するため 対象:DGM 7名 講師:大見士朗准教授(京大)	1 Introduction to TCP/IP Network -Configure and Manage Network, and Application - 2 UNIX 101 -Basic Introduction to UNIX OS-	現地研修
2018	微動アレイ探査実習 2018/11/27-11/30 目的:微動測定の実技 対象:DGM6名 講師:大見士朗准教授(京大)・林田拓己主任研究員(建築研究所)	Microtremor Survey Basics	現地研修
2018	活断層マッピング研修 2019/2/9-2/23 目的:DGMが活断層マップを作れるよう能力強化研修 対象:DGM1名 講師:中田高 名誉教授(広島大)		本邦研修
2019	供与機材振動台オペレーション訓練 2019/10/14-15, 12/10-11 対象:DOC3名 講師:青木孝義(名市大)、Kshitij C. Shrestha(名市大)	Operation Manual/Shaking Table Manual	現地研修
2022	供与機材振動台オペレーション訓練 2022/8/11-12 対象:DOC3名、DES1名 講師:青木孝義(名市大)	Shaking Table Manual and data making program	現地研修
2022	Risk map研修 2022/9/19-20 対象:DOC3名、DES1名 講師:高橋典之(東北大)	Program	現地研修
2022	The Manual for Construction of Rammed Earth 対象:DOC3名 作成者:森旬子(名市大)	Construction Manual of Rammed Earth	現地研修
2022	The Manual for Construction of Stone Masonry 対象:DOC3名、DES1名 作成者:森旬子(名市大)	Construction Manual of Stone Masonry	現地研修
2022	SVR-1 対象:DDM2名 講師:中川隆(名市大)	Standalone disaster mitigation education material for residents in schools and rural areas	現地研修
2022	SVR-2 対象:DDM2名 講師:中川隆(名市大)	Standalone disaster mitigation education material using Metaverse	現地研修
2022	SVR-3 対象:DDM2名 講師:中川隆(名市大)	Disaster mitigation education material in cooperation with shaking table	現地研修
2023	SVR-4 対象:DDM2名 講師:中川隆(名市大)	Instructional materials for hands-on construction procedures	現地研修
2022	3D graphic video of construction procedures 対象:DOC3名、DES2名 講師:向井純子(名市大)	Instructional 3D graphic video for hands-on construction procedures	現地研修
2022	Construction procedure video 対象:DOC3名、DES2名 講師:向井純子(名市大)	Construction videos of Rammed Earth, Stone Masonry and Retrofit	現地研修
2023	Manual for Seismic Resilient Construction and Retrofitting of	Manual for Seismic Resilient Construction and Retrofitting of Rammed earth and Stone masonry Houses	現地研修
2023	Rammed earth and Stone masonry Houses	Experimental results and data from SATREPS	現地研修

Ⅴ. 成果発表等

（2）学会発表【研究開始～現在の全期間】（公開）

①学会発表（相手国側研究チームと連名）（国際会議発表及び主要な国内学会発表）

年度	国内/国際の別	発表者（所属）、タイトル、学会名、場所、月日等	招待講演/口頭発表/ポスター発表の別
2017	国際学会	Shiro OHMI [(1)], Hiroshi INOUE[(2)], Jamyang CHOPHEL[(3)], Phuntso PELGAY[(3)] and Dowchu DRUKPA[(3)]. (1) Kyoto Uni. , (2) National Institute for Earth Science and Disaster Resilience, (3) The Department of Geology and Mines. **Design and Implementation of the National Seismic Monitoring Network in the Kingdom of Bhutan**. The Joint Scientific Assembly of the International Association of Geodesy (IAG) and the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI) 2017, Kyoto, Japan. 1-2 Aug. 2017.	ポスター発表
2017	国際学会	Shiro OHMI [(1)], Hiroshi INOUE[(2)], Jamyang CHOPHEL[(3)], Phuntso PELGAY[(3)], Nityam NEPAL[(3)] and Dowchu DRUKPA[(3)]. (1) Kyoto Uni. , (2) National Institute for Earth Science and Disaster Resilience, (3) The Department of Geology and Mines. **Design and Implementation of the National Seismic Monitoring Network in the Kingdom of Bhutan.** The American Geophysics Union (AGU), Fall Meeting 2017, New Orleans, USA. 11 Dec. 2017.	ポスター発表
2018	国際学会	Shiro OHMI [(1)], Hiroshi INOUE [(2)], Jamyang CHOPHEL [(3)], Phuntso PELGAY [(3)], Nytiam NEPAL[(3)] and Dowchu DRUKPA[(3)]. (1) Kyoto Univ., (2) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience.,(3) Department of Geology and Mines, Ministry of Economic Affairs、 **Design, Implementation, and Preliminary Outcome of the National Seismic Monitoring Network in the Kingdom of Bhutan,** European Geoscience Union General Assembly 2018, Wien, Austria, 8-13 April 2018	ポスター発表
2018	国際学会	K. Shrestha[(1)], T. Aoki[(1)], T. Konishi[(2)], M. Miyamoto[(2)], J. Zhang[(1)], N. Takahashi[(3)], N. Yuasa[(4)], T. Aramaki[(4)] and P. Wangmo[(5)]. (1)Nagoya City Univ., (2)Kagawa Univ., (3) Tohoku Univ., (4) Nihon Univ., (5) The Department of Culture, Ministory of Home and Cultural Affairs **Full-scale pull-down tests on a two-storied rammed earth building with possible strengthening interventions**, 11th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Cusco, Peru. 11-13 Sep. 2018	口頭発表
2018	国際学会	Shiro Ohmi[(1)], Hiroshi Inoue[(2)], Jamyang Chophel[(3)], Phuntsho Pelgay[(3)] and Dowchu Drukpa[(3)]. (1)Kyoto University, Kyoto, Japan, (2)NIED, Tsukuba, Japan, (3)Department of Geology and Mines, Ministry of Economic Affairs, Thimphu, Bhutan **Preliminary Seismicity Observed by the Seismic Monitoring Network in the Kingdom of Bhutan** American Geophysics Union Fall Meeting 2018, D.C., USA, 10-14 Dec. 2018	口頭発表
2019	国内学会	PEMA[(1)], Kunzang TENZIN[(1)], Kshitij C. SHRESTHA[(2)] and Takayoshi AOKI[(2)]. (1) The Department of Culture, Ministory of Home and Cultural Affairs, (2)Nagoya City Univ. **Construction management of Test facility in Bhutan** Construction Seminar 2019, Thimphu, Bhutan, 29-30 Aug. 2019	口頭発表
2019	国際学会	Dowchu Drukpa[(1)], Karma Namgay[(1)], Yasuhiro Kumahara[(2)] and Takashi Nakata[(2)]. (1)The Department of Geology and Mines, Ministry of Economic Affairs, (2)Hiroshia University **Active fault survey in southwest Bhutan** International Symposium on Active Faulting, Hokudan 2020, Awaji, Japan 13-17 Jan.2020	ポスター発表
2020	国際学会	P. Wangmo[(1)], K.C. Shrestha[(2)], T. Aoki[(2)], M. Miyamoto[(3)], N. Takahashi[(4)], J.Y. Zhang[(5)], N. Yuasa[(6)], S. Shin[(6)], Pema[(1)], F. De Filippi[(7)] and R. Pennacchio[(7)]. (1) The Department of Culture, Ministory of Home and Cultural Affairs, (2) Nagoya City Univ., (3) Kagawa Univ., (4) Tohoku Univ., (5) Kyoto Univ., (6) Nihon Univ., (7) Politecnico di Torino **Mesh-wrap Retrofitting for Rammed Earth Buildings – Test Results of Full-Scale Static Tests** 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan 13-18 Sep. 2020	口頭発表
2020	国際学会	Pema[(1)], K.C. Shrestha[(2)], T. Aoki[(2)], K. Tenzin[(1)], N. Takahashi[(3)], M. Miyamoto[(4)], J.Y. Zhang[(5)]. (1) The Department of Culture, Ministory of Home and Cultural Affairs, (2) Nagoya City Univ., (3) Tohoku Univ., (4) Kagawa Univ., (5) Kyoto Univ. **Test Facility to Study Traditional Composite Masonry Structures in Bhutan – An Outcome of SATREPS** 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan 13-18 Sep. 2020	口頭発表
2020	国際学会	K.C. Shrestha[(1)], T. Aoki[(1)], M. Miyamoto[(2)], N. Takahashi[(3)], J.Y. Zhang[(4)], P. Wangmo(5), N. Yuasa[(6)], S. Shin[(6)], Pema[(5)] and K. Tenzin[(5)]. (1) Nagoya City Univ., (2) Kagawa Univ., (3) Tohoku Univ., (4) Kyoto Univ., (5) The Department of Culture, Ministory of Home and Cultural Affairs, (6) Nihon Univ. **Static Test on Full Scale Rammed Earth Building with Mesh-wrap Retrofitting Strategy** 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC2020, Balcerona, Spain Sep. 2020	口頭発表

2021	国内学会	湯浅昇(1), 寶野有希子(1), 青木孝義(2), Wangmo Phuntsho(3). (1) 日本大学, (2) 名古屋市立大学, (3) The Department of Culture, Ministory of Home and Cultural Affairs **電極を用いた版築の含水率分布の測定** 日本非破壊検査協会令和3年秋季大会講演概要集, 北海道, 日本, pp.119-122 10-11 Nov. 2021	口頭発表
2022	国際学会	P. Wangmo(1), K.C. Shrestha(2), T. Aoki(2), Pema(1), K. Tenzin(1), U. Dorji(1). (1) The Department of Culture, Ministory of Home and Cultural Affairs, (2) Tribhuvan Univ., (3) Nagoya City Univ. **Strengthening techniques for rammed earth buildings: Test results of full-scale static test** International Conference on Science, Engineering and Technology, ICSciEnTec-2022, Thimphu, Bhutan 2 May 2022	口頭発表
2023	国際学会	Miyamoto Mitsuhiro(1), Aoki Takayoshi(2), Hamaoka Miku(1), Hayashi Riho(1), Kunzang Tenzin(3), Shrestha Kshitij C.(4), Takahashi Noriyuki(5) and Zhang Jingyao(6) (1) Kagawa Univ. (2) Nagoya City Univ. (3) The Department of Culture, Ministory of Home and Cultural Affairs (4) Tribhuvan Univ. (5) Tohoku Univ. (6) Kyoto Univ. **Vibration Characteristics of Traditional Masonry Buildings in the Kingdom of Bhutan** International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC) 2023, Kyoto, 12-15 Sept. 2023	口頭発表

招待講演	0 件
口頭発表	9 件
ポスター発表	4 件

②学会発表(上記①以外)(国際会議発表及び主要な国内学会発表)

年度	国内/ 国際の別	発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日等	招待講演 /口頭発表 /ポスター発表の別
2017	国内学会	江原夏季(名古屋大学)、**ブータン王国における民家等の伝統的建造物保存修復に関する研究 その7 木材による版築ブロックの水平方向補強方法の一提案**、日本建築学会、広島工業大学、2017年8月31日	口頭発表
2017	国内学会	荒巻卓見・湯浅昇(日本大学)、**固化材の添加が版築の圧縮強度に及ぼす影響**、日本大学生産工学部第50回学術講演会、pp. 423-426、日本大学生産工学部、2017年12月2日	口頭発表
2017	国内学会	大橋さゆり(名古屋市立大学) et al、**ブータンにおける減災教育用VRコンテンツ**、 映像表現・芸術科学フォーラム 2018 (Expressive Japan 2018)、東京工科大学、2018年3月16日	ポスター発表
2018	国内学会	湯浅昇・荒巻卓見(日本大学)、青木孝義・プンツォワングモ(名古屋市立大学)、**セメントの添加による版築の強度向上に関する検討**、第72回セメント技術大会, 東京ホテルメトロポリタン、2018年5月9日	口頭発表
2018	国内学会	青木孝義(名古屋市立大学)、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究 その1 プロジェクトの概要と伝統的版築造住宅のモニタリング**、日本建築学会、東北大学、2018年9月6日	口頭発表
2018	国内学会	湯浅昇(日本大学)、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究 その2 版築の材料強度の検討**、日本建築学会、東北大学、2018年9月6日	口頭発表
2018	国内学会	Phuntsho Wangmo(名古屋市立大学)、**Study on earthquake resistance technology of composite masonry buildings in Bhutan Part 3 : Element tests on reduce scaled rammed earth walls**、日本建築学会、東北大学、2018年9月6日	口頭発表
2018	国内学会	小西孝明(香川大学)、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究 その4 引き倒し実験の概要と材料実験結果**、日本建築学会、東北大学、2018年9月6日	口頭発表
2018	国内学会	Kshitij C. Shrestha(名古屋市立大学)、**STUDY ON EARTHQUAKE RESISTANCE TECHNOLOGY OF COMPOSITE MASONRY BUILDINGS IN BHUTAN Part 5 Pull down tests on real scale rammed earth house: Test results and discussions**、日本建築学会、東北大学、2018年9月6日	口頭発表
2018	国内学会	宮本慎宏(香川大学)、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究 その6 伝統的版築造建物の常時微動計測**、日本建築学会、東北大学、2018年9月6日	口頭発表
2018	国内学会	張景耀(名古屋市立大学)、**不連続変形法による組積造建造物の静的解析**、日本建築学会、東北大学、2018年9月6日	口頭発表
2018	国内学会	申相澈・湯浅昇(日本大学)、青木孝義(名古屋市立大学)、**加水量および乾燥温度が版築の圧縮強度に及ぼす影響**、日本大学生産工学部第51回学術講演会、pp. 361-364、日本大学生産工学部、2018年12月1日	口頭発表
2018	国内学会	大橋さゆり(名古屋市立大学)、**A Mobile VR Museum of SATREPS BHUTAN Project ～ ブータン国民に向けたSATREPS(ブータン)プロジェクトの広報用VRコンテンツ ～**、映像表現・芸術科学フォーラム 2019 (Expressive Japan 2019)、早稲田大学、2019年3月12日	ポスター発表
2019	国内学会	申相澈(日本大学)、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究 その7 版築の圧縮強度に及ぼす加水率および乾燥温度の影響**、日本建築学会、金沢工業大学、2019年9月3日	口頭発表
2019	国内学会	湯浅昇(日本大学)、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究 その8 石積み裏込モルタルの品質確保に関する検討**、日本建築学会、金沢工業大学、2019年9月3日	口頭発表
2019	国内学会	金井新(名古屋市立大学)、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究 その9 既存および新築版築壁の引き倒し実験による耐震補強効果の検証**、日本建築学会、金沢工業大学、2019年9月3日	口頭発表
2019	国内学会	村井颯希(香川大学)、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究 その10 既存石造壁の要素試験と引き倒し試験による耐震補強効果の検証**、日本建築学会、金沢工業大学、2019年9月3日	口頭発表
2019	国内学会	青木秀敬(名古屋市立大学)、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究 その11 新築石積造の引き倒し実験による補強効果の検証**、日本建築学会、金沢工業大学、2019年9月3日	口頭発表
2019	国内学会	青木孝義(名古屋市立大学)、**Study on Earthquake Resistance Technology of Composite Masonry Buildings in Bhutan Part 12: Full scale tests on composite masonry buildings: Test set-up, Instrumentation, Specimen details**、日本建築学会、金沢工業大学、2019年9月3日	口頭発表

2019	国内学会	Phuntsho WANGMO（名古屋市立大学）、**Study on Earthquake Resistance Technology of Composite Masonry Buildings in Bhutan Part 12: Full scale tests on composite masonry buildings: Test set-up, Instrumentation, Specimen details**、日本建築学会、金沢工業大学、2019年9月3日	口頭発表
2019	国内学会	Kshitij C. SHRESTHA（名古屋市立大学）、**Study on Earthquake Resistance Technology of Composite Masonry Buildings in Bhutan Part 14: Full scale tests on composite masonry buildings: Mesh wrapped stone masonry with mud mortar construction**、日本建築学会、金沢工業大学、2019年9月3日	口頭発表
2019	国内学会	宮本慎宏（香川大学）、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究　その15　伝統的石造建物の常時微動計測**、日本建築学会、金沢工業大学、2019年9月3日	口頭発表
2019	国内学会	奥野雄貴（名古屋市立大学）・森旬子、**「ブータンにおける組積造建築の地震リスクと評価の現在技術の開発」施工マニュアルデザイン**、芸術科学会2019 NICOGRAPH2019、名古屋市立大学北千種キャンパス、2019年11月2日～4日	ポスター発表
2019	国際学会	Sayuri Ohashi, Akari Kamiya, Soji Mochizuki, Ken Sonobe, Ryu Nakagawa and Takayoshi Aoki, SVR-1 (Beta Version): **An Educational VR Experience for Earthquake Disaster Mitigation in Bhutan**, International Conference of Asia Digital Art and Design (ADADA2019), Malaysia, 26-28 Nov. 2019	ポスター発表
2019	国内学会	申相澈・湯浅昇（日本大学）、青木孝義（名古屋市立大学）、**ブータンの版築造を再現したブロックの材料特性に関する研究**、日本大学生産工学部第52回学術講演会、pp.351-354、日本大学生産工学部、2019年12月7日	口頭発表
2020	国内学会	Phuntsho WANGMO（名古屋市立大学）, **Study on Earthquake Resistance Technology of Composite Masonry Buildings in Bhutan Part 16: Full scale tests on composite masonry buildings: Strengthening techniques on rammed earth building**、日本建築学会、関東、2020年9月	口頭発表
2020	国内学会	Kshitij C. SHRESTHA（名古屋市立大学）、**Study on Earthquake Resistance Technology of Composite Masonry Buildings in Bhutan Part 17: Full scale tests on composite masonry buildings: Mesh-wrapped stone masonry with cement mortar construction**、日本建築学会、関東、2020年9月	口頭発表
2020	国内学会	青木孝義（名古屋市立大学）、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究　その18　実大試験体の常時微動測定結果**、日本建築学会、関東、2020年9月	口頭発表
2020	国内学会	宮本慎宏（香川大学）、ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究　その19　縮小試験体の振動台実験結果、日本建築学会、関東、2020年9月	口頭発表
2020	国内学会	金井新（名古屋市立大学）、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究　その20　ブータン王国西部の伝統建築集落の悉皆調査**、日本建築学会、関東、2020年9月	口頭発表
2020	国内学会	村井颯希（香川大学）、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究　その21　ブータン王国中部の伝統建築集落の悉皆調査**、日本建築学会、関東、2020年9月	口頭発表
2021	国内学会	折戸俊介（大林組）、**不連続変形法による無補強煉瓦造壁体の面内せん断解析**、日本建築学会、東海、2021年9月	口頭発表
2021	国内学会	宮本慎宏（香川大学）、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究　その22　伝統的版築造民家の耐震診断法**、日本建築学会、東海、2021年9月	口頭発表
2021	国内学会	村井颯希（香川大学）、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究　その23　伝統的版築造民家の耐震補強工法**、日本建築学会、東海、2021年9月	口頭発表
2022	国内学会	折戸俊介（大林組）、**不連続変形法を用いた無補強煉瓦造壁体の面内載荷実験の再現解析**、日本建築学会、北海道、2022年9月	口頭発表
2022	国内学会	宮本慎宏（香川大学）、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究　その24　新築セメントモルタル石積造民家の実大静的加力実験と耐震性能評価**、日本建築学会、北海道、2022年9月	口頭発表
2022	国内学会	朱シン鵬（名古屋市立大学）、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究　その25　新築蛇籠補強土モルタル石積造民家の実大静的加力実験**、日本建築学会、北海道、2022年9月	口頭発表
2023	国内学会	宮本慎宏（香川大学）、**ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究　その26　振動台実験に基づく損傷状況と固有振動数の関係**、日本建築学会、近畿、2023年9月	口頭発表

招待講演	0 件
口頭発表	34 件
ポスター発表	6 件

Ⅴ. 成果発表等

（3）特許出願【研究開始～現在の全期間】（公開）

①国内出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国側研究メンバーの共同発明者への参加の有無	登録番号（未登録は空欄）	登録日（未登録は空欄）	出願特許の状況	関連する論文のDOI	発明者	発明者所属機関	関連する外国出願※
No.1													
No.2													
No.3													

国内特許出願数 0 件

公開すべきでない特許出願数 0 件

②外国出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国側研究メンバーの共同発明者への参加の有無	登録番号（未登録は空欄）	登録日（未登録は空欄）	出願特許の状況	関連する論文のDOI	発明者	発明者所属機関	関連する国内出願※
No.1													
No.2													
No.3													

外国特許出願数 0 件

公開すべきでない特許出願数 0 件

Ⅴ. 成果発表等
（4）受賞等【研究開始～現在の全期間】（公開）

①受賞

年度	受賞日	賞の名称	業績名等 （「○○の開発」など）	受賞者	主催団体	プロジェクトとの関係 （選択）	特記事項
2016	2017/3/24	名古屋市立大学芸術工学部建築都市デザイン学科論文賞	ブータン王国版築造建築物の耐震性能向上に関する研究	江原夏季	名古屋市立大学芸術工学部	1.当課題研究の成果である	
2017	2018/3/26	名古屋市立大学芸術工学部産業イノベーション学科作品賞	ブータンの版築造における施工工程のマニュアル	奥野雄喜	名古屋市立大学芸術工学部	1.当課題研究の成果である	
2018	2018/8/1	セメント技術大会優秀講演者賞	セメントの添加による版築の強度向上に関する検討	荒巻卓見	セメント協会	1.当課題研究の成果である	
2018	2018/10/26	国際共著論文プラス1運動表彰	Assessment of out-of-plane behavior of rammed earth walls by pull-down tests	青木孝義	名古屋市立大学	1.当課題研究の成果である	
2019	2019/10/25	2019年度日本建築学会大会（北陸）学術講演会　構造委員会　壁式構造運営委員会　若手優秀発表賞	ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究　その10　既存石造壁の要素試験と引き倒し試験による耐震補強効果の検証	村井颯希	日本建築学会	1.当課題研究の成果である	
2020	2020/10/28	国際共著論文プラス1運動表彰	Full-scale pull-down tests on a two-storied rammed earth building with possible strengthening interventions	青木孝義	名古屋市立大学	1.当課題研究の成果である	
2021	2021/10/2	17WCEE Early Career & Student Award	Mesh-wrap Retrofitting for Rammed Earth Buildings – Test Results of Full-Scale Static Tests	Phuntsho Wangmo	17th World Conference on Earthquake Engineering	1.当課題研究の成果である	
2021	2021/10/22	2021年度日本建築学会大会（東海）学術講演会　構造委員会　壁式構造運営委員会　若手優秀発表賞	ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究　その23　伝統的版築造民家の耐震補強工法	村井颯希	日本建築学会	1.当課題研究の成果である	
2021	2021/10/28	国際共著論文プラス1運動表彰	Influence of Traditional Building Practices in Seismic Vulnerability of Bhutanese Vernacular Rammed Earth Architecture	青木孝義	名古屋市立大学	1.当課題研究の成果である	
2021	2021/12/15	RIBA (Royal Institute of British Architects) President's Medals	THE SECULAR HOUSE Bhutan: a manual for resilient stone houses	Manuela Reitsma	Royal Institute of British Architects	3.一部当課題研究の成果が含まれる	

10 件

②マスコミ（新聞・TV等）報道

年度	掲載日	掲載媒体名	タイトル／見出し等	掲載面	プロジェクトとの関係 （選択）	特記事項
2016	2016/11/13	ブータン国新聞Kuensel紙	Studying seismic risks to masonry buildings		1.当課題研究の成果である	
2017	2017/9/21	ブータン国営放送BBSテレビ	Japanese experts conduct successful pull-down test of rammed earth structures	ニュース全国放送	1.当課題研究の成果である	
2017	2017/12/26	ブータン国営放送BBSテレビ	Ground breaking ceremony held for construction of examination facility	トップニュース、研究代表者とCPがニュースに生出演	1.当課題研究の成果である	
2017	2017/12/27	ブータン国新聞Kuensel紙	Examination facility to study Bhutanese traditional structures	トップ記事	1.当課題研究の成果である	
2018	2018/10/25	毎日新聞	大学倶楽部・名古屋市立大学 歴史的建造物の保存再生技術とモニタリング展 文部科学省で11月9日まで	デジタル毎日	3.一部当課題研究の成果が含まれる	
2018	2018/12/28	ブータン国営放送BBSテレビ		ニュース全国放送	1.当課題研究の成果である	
2018	2019/1/1	ブータン国新聞Kuensel紙	Towards making Bhutanese houses earthquake resilient	全国紙3面	1.当課題研究の成果である	
2018	2019/2/28	Euronews	From Japan to Bhutan: improving resilience against earthquakes	Global Japan5分番組欧州で放送、Web公開中	1.当課題研究の成果である	
2018	2019/3/22	ブータン国営放送BBSテレビ	'Shaking table' to test earthquake resilience in buildings	ニュース全国放送	1.当課題研究の成果である	
2018	2019/3/23	ブータン国新聞Kuensel紙	Shaking table to test traditional structures	全国紙18面	1.当課題研究の成果である	
2019	2019/12/19	ブータン国営放送BBSテレビ	Shaking table test of traditional structures	ニュース全国放送	1.当課題研究の成果である	
2019	2019/12/20	ブータン国新聞Kuensel紙	Knowing the strengthen of traditional homes	全国紙5面	1.当課題研究の成果である	
2019	2020/2/6	ブータン国営放送BBSテレビ	Understanding earthquakes-Royal Tutorial Project	教育テレビ　全国放送　2回放送	1.当課題研究の成果である	
2021	2021/11/6	ブータン国営放送BBSテレビ	Carpenters and masons trained in building earthquake resilient structure	ニュース全国放送	1.当課題研究の成果である	http://www.bbs.bt/news/?p=160299&fbclid=IwAR3Gmb9LfOL65ziHKGu-mGXYToz8mFEMqZEqBb6HE6udGVlnX9HyqJYw0Xo
2021	2021/12/29	ブータン国営放送BBSテレビ	Full-scale test of Bhutanese structure to earthquake	ニュース全国放送	1.当課題研究の成果である	http://www.bbs.bt/news/?p=163896
2022	2023/3/20	ブータン国営放送BBSテレビ	Live interview about the SATREPS project	ニュース全国放送	1.当課題研究の成果である	https://www.youtube.com/live/iTnOstE5V2E?feature=share

16 件

Ⅴ. 成果発表等

(5)ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等の活動【研究開始～現在の全期間】(公開)

①ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等

年度	開催日	名称	場所 (開催国)	参加人数 (相手国からの招聘者数)	公開/ 非公開の別	概要
2016	2016/6/30	第1回勉強会	JICA本部 (日本)	10(0)	非公開	JICAとの情報共有
2016	2016/8/18	第2回勉強会	JICA本部 (日本)	10(0)	非公開	詳細計画策定調査に向けた打合せ
2016	2016/9/2	対処方針会議	JICA本部 (日本)	10(0)	非公開	詳細計画策定調査の対処方針に関する打合せ
2016	2016/9/20	JICA詳細計画策定調査全体会議	ティンプー市 (ブータン)	20(9)	非公開	ブータン側との詳細計画　全体会議
2016	2016/11/17	耐震化技術の開発・普及グループ第1回勉強会	名古屋市立大 (日本)	15(0)	非公開	詳細計画策定調査の結果を共有するとともに、大学院および学部学生に対する説明会開催
2016	2016/12/19	ネパール復興支援の経験共有	JICA本部 (日本)	8(0)	非公開	ネパール復興支援の経験共有と今後の研究推進に関する打合せ
2016	2017/1/7	耐震化技術の開発・普及グループ第2回勉強会	東工大蔵前会館 (日本)	8(0)	非公開	R/D、MOU締結を受けたH29年度の研究計画に関する打合せ
2016	2017/2/14	耐震化技術の開発・普及グループ第3回勉強会	日本大学 (日本)	7(0)	非公開	H29年度の研究実施に関する打合せ
2016	2017/3/28	次年度活動計画会議	JICA本部 (日本)	10(0)	非公開	次年度活動計画に関する打合せ
2017	2017/5/15	Commencement Meeting	ティンプー市 (ブータン)	20(12)	非公開	2017年度活動計画承認、プロジェクト運営上の課題と対策を協議。JICA運営指導調査団が出席。
2017	2017/6/12	Working Group Meeting	ティンプー市 (ブータン)	5(4)	非公開	ブータン側作業部会、活動レビューと次活動計画、課題と対策を共有
2017	2017/7/14	Working Group Meeting	ティンプー市 (ブータン)	7(6)	非公開	活動レビューと次活動計画、課題と対策を共有
2017	2017/9/1	Working Group Meeting	ティンプー市 (ブータン)	9(6)	非公開	活動レビューと次活動計画、課題と対策を共有
2017	2017/11/30	Training Report and Working Group Meeting	ティンプー市 (ブータン)	8(6)	非公開	帰国研修員報告会　兼　活動レビューと次活動計画
2017	2018/1/29	耐震化技術開発グループ会議	日本大学 (日本)	10(2)	非公開	DOC2名を日本へ招へいし供与機材の利用法、活動レビューと次年度計画策定
2017	2018/2/12	Project Management Unit and Working Group Meeting	ティンプー市 (ブータン)	5(4)	非公開	プロジェクトマネージャー会議、JCCの事前協議
2017	2018/2/23	地震評価グループ会議	JICA筑波 (日本)	5(2)	非公開	DGM2名を日本へ招へいし供与機材の利用法、活動レビューと次年度計画策定
2017	2018/3/9	Active Fault and Earthquake Disaster Mitigation in Bhutan	ティンプー市 (ブータン)	20(15)	非公開	DGMでブータンの人々が活断層を正しく恐れるためのセミナーを開催
2018	2018/5/7	Drones for Disaster Management	ティンプー市 (ブータン)	32(30)	非公開	DGM他防災関係者向けドローンの特徴、利用実例、実機サンプルを紹介
2018	2018/5/10	地震評価グループ会議	ティンプー市 (ブータン)	9(6)	非公開	専門家2名とDGMの活動内容打合せ
2018	2018/7/21	SATREPS全体会議	JST東京本部別館 (日本)	10(0)	非公開	活動レビューと次活動計画、課題と対策を共有
2018	2018/8/8	耐震化技術開発グループ会議	ティンプー市 (ブータン)	10(6)	非公開	専門家3名とDOC/DESの活動内容打合せ
2018	2018/8/8	人材育成タスク会議	ティンプー市 (ブータン)	10(6)	非公開	専門家3名とDDM/DGM/DOC/DESによる研修計画策定
2018	2018/9/10	Working Group Meeting	ティンプー市 (ブータン)	8	非公開	ブータン側作業部会、JCCの準備
2018	2018/10/1- 2018/11/9	文部科学省「情報ひろば」企画展示『～暮らしを守る～　歴史的建造物の保存再生技術とモニタリング』	東京都 (日本)		公開	企画展示テーマのパネルと「地震直後における即時建造物健全性診断システム」の実物展示、映像による研究内容紹介、講演
2018	2018/11/6	耐震化技術開発・普及グループ会議	名古屋市立大学 (日本)	40(3)	非公開	DDM、DOC、DESから各1名を日本へ招聘し、災害管理、防災教育とセミナー開催
2018	2018/11/8	耐震化技術開発・普及グループ会議	日本大学生産工学部 (日本)	10(3)	非公開	日本へ招聘したDDM、DOC、DESからの各1名に対し、課題に対する日本での取り組みを紹介し議論した。
2018	2018/9/12-13	地震評価グループ　ICT lectures	ティンプー市 (ブータン)	9(7)	非公開	専門家によるDGM向け勉強会
2018	2019/3/5	研究グループ会議	ティンプー市 (ブータン)	4(0)	非公開	地震評価グループ、耐震化グループ、普及グループリーダー会議
2019	2019/4/4	Working Group Meeting	ティンプー市 (ブータン)	8(7)	非公開	ブータン側作業部会
2019	2019/4/9	SATREPS全体会議	JST東京本部別館 (日本)	12(0)	非公開	活動レビューと次活動計画、課題と対策を共有
2019	2019/4/30	Project Management Unit and Working Group Meeting	ティンプー市 (ブータン)	8(7)	非公開	プロジェクトマネージャー会議、JCCの事前協議
2019	2019/5/8	NSETでプロジェクトの成果発表と意見交換会議	カトマンズ (ネパール)	11(0)	非公開	プロジェクトの成果発表を行うとともに、NSETの取組を紹介してもらい、意見交換会議を実施した。
2019	2019/7/16	地震災害評価パイロットサイトタスク会議	ティンプー市 (ブータン)	11(9)	非公開	専門家2名との作業部会
2019	2019/8/28	地震評価グループ会議	ティンプー市 (ブータン)	6(4)	非公開	専門家とネットワーク移行作業に伴う障害について対処方針会議

2019	2019/12/6	NCUアジア拠点校シンポジウム 2019	名古屋市立大学（日本）	50(0)	公開	アジアにおける社会衛生環境・生物多様性保全のSDGsと都市問題で、プロジェクトの研究成果を発表
2019	2019/12/20	セミナー『Building Seismic Resilience in Bhutan using Science and Technology』	ティンプー市（ブータン）	45(30)	公開	プロジェクトの成果発表と意見交換セミナー、防災に携わる現地大学、省庁、他のドナー国際機関が参加
2019	2020/1/20	研究グループ会議	東北大学東京分室（日本）	5(0)	非公開	地震評価グループ、耐震化グループ、普及グループ会議
2020	2020/7/27	SATREPS全体会議	Zoom（日本）	12(0)	非公開	活動レビューと次活動計画、課題と対策を共有
2020	2020/7/30	研究グループ会議	Zoom（日本）	10(3)	非公開	DOCとRGoB予算による研究活動打合せを含む耐震化グループ、普及グループ会議
2021	2021/1/14	研究グループ会議	Zoom（日本）	3(1)	非公開	VR開発の進捗共有、および計画
2020	2021/2/28	研究グループ会議	名古屋市立大学（日本）	4(0)	非公開	耐震化グループ、普及グループ会議
2021	2021/7/6	OpenQuake Lecture	Zoom（Bhutan）	6(11)	非公開	ソフトOpenQuakeの講習会
2021	2021/10/12	Training of Trainers(12-14 Oct)	Zoom（Bhutan）	3(12)	非公開	既存建物の耐震診断講習会
2021	2021/11/3	Hands on Training rammed earth retrofitting (3, 4 Nov)	Zoom（Bhutan）	2(24)	非公開	版築造既存建物の耐震化施工実地研修
2021	2021/11/18	SATREPS国内ミーティング	Zoom（日本）	5(0)	非公開	各研究グループの進捗共有、および計画
2021	2021/11/30	研究グループ会議	Google meet（Bhutan）	2(1)	非公開	VR開発の進捗共有、および計画
2021	2021/12/2	研究グループ会議	Zoom（日本）	6(4)	非公開	VR開発の進捗共有

48 件

②合同調整委員会(JCC)開催記録（開催日、議題、出席人数、協議概要等）

年度	開催日	議題	出席人数	概要
2017	2018/3/8	2017年度成果報告、2018年度計画承認、現状課題と対策の協議	27	協議議事録についてJICAブータン事務所長、DDMプロジェクトダイレクタが署名合意、研究代表者が証人として署名。JICA本部、DDM、名市大が議事録原本を保存。
2018	2018/10/3	プロジェクトの進捗状況、次期計画、供与機材の譲渡式	30	活動進捗と計画発表、供与機材の譲渡書に署名
2019	2019/5/10	新メンバー紹介、進捗状況、次期計画を承認、現状課題と対策の協議	24	協議議事録についてJICAブータン事務所長、DDMプロジェクトダイレクタが署名合意、研究代表者が証人として署名。JICA本部、DDM、名市大が議事録原本を保存。
2019	2019/12/20	進捗状況、次期計画を承認、現状課題と対策の協議、供与機材の譲渡式	24	活動進捗と計画発表、供与機材の譲渡書に署名
2022	2022/5/19	終了時評価に向けて現進捗と今後の予定を確認、評価指標の確認と更新、メンバーリストの更新	33	終了時評価の開催日程を共有（12月下旬）、中間評価の議事録の内容に対する現進捗を共有し今後の活動を確認、連動する活動の期日設定、今後のWorkshopとJCCの予定設定、評価指標の確認と更新、メンバーリストの更新
2022	2022/9/29	終了時評価に向けて現進捗と今後の予定を確認、評価指標の確認と更新、メンバーリストの更新	32	終了時評価の開催日程を共有（12月下旬）、中間評価の議事録の内容に対する現進捗を共有し今後の活動を確認、連動する活動の期日設定、今後のWorkshopとJCCの予定設定、評価指標の確認と更新、メンバーリストの更新
2022	2022/12/26	終了時評価、メンバーリストの更新	34	終了時評価の開催、今後の活動の確認、評価指標の確認と更新、メンバーリストの更新

7 件

成果目標シート

研究課題名	ブータンにおける組積造建築の地震リスク評価と減災技術の開発プロジェクト
研究代表者名（所属機関）	青木　孝義 （名古屋市立大学・大学院芸術工学研究科）
研究期間	H28採択（平成28年10月1日～令和5年3月31日）
相手国名／主要相手国研究機関	ブータン王国／内務文化省災害管理局、内務文化省文化局、経済省地質鉱山局、公共事業省技術支援局

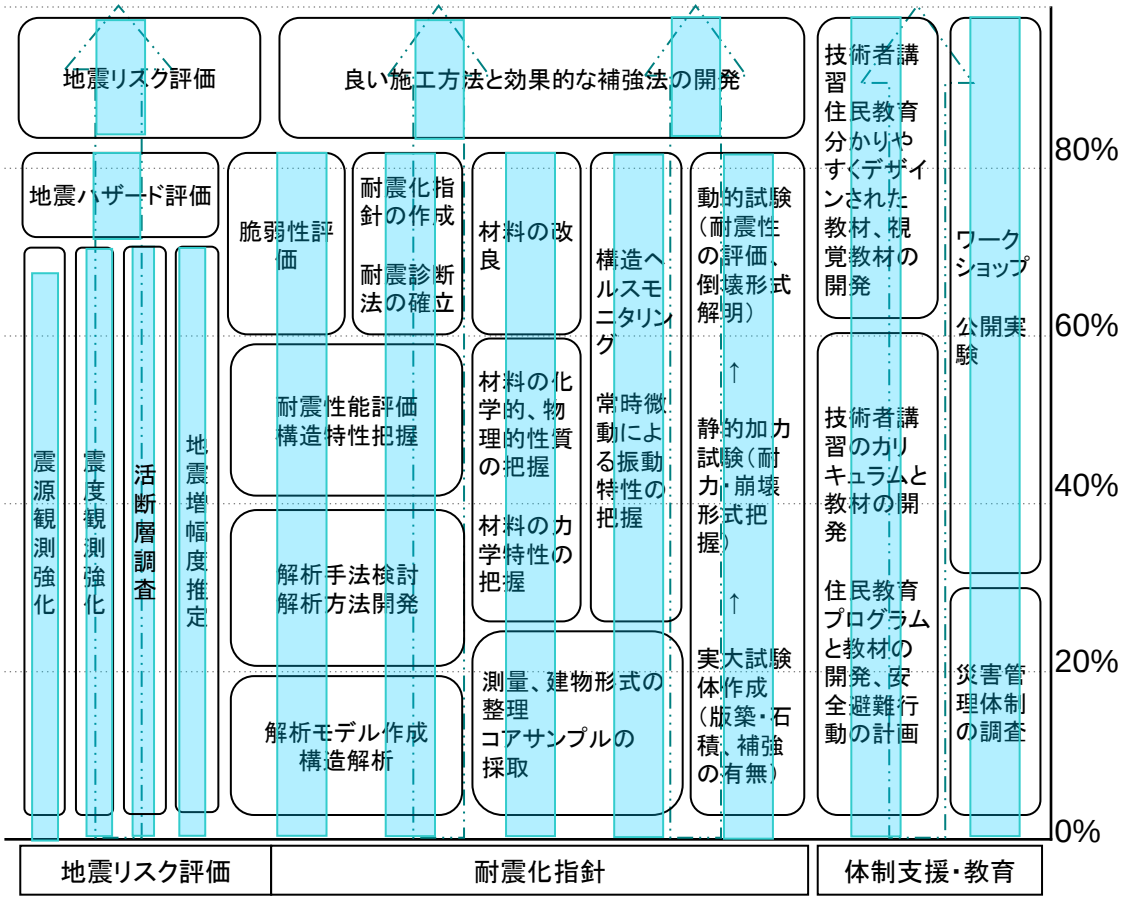
付随的成果

日本政府、社会、産業への貢献	・開発途上国における脆弱住宅の減災への活用 ・日本企業による成果の事業化
科学技術の発展	・版築・石積建築の構造特性・耐震性能の解明と耐震診断、補強技術の開発 ・ブータンヒマラヤのサイスモテクトニクス解明
知財の獲得、国際標準化の推進、生物資源へのアクセス等	・版築・石積建築の実験データ ・版築・石積建築の構造解析手法と耐震診断法 ・版築・石積建築の補強技術 ・震度観測システム
世界で活躍できる日本人人材の育成	・国際的に活躍可能な日本側の若手研究者の育成（国際会議への指導力、レビュー付雑誌への論文掲載など）
技術及び人的ネットワークの構築	・ブータン及び日本におけるワークショップ開催 ・修士課程、博士課程留学生の受け入れと短期研修生の受け入れ
成果物（提言書、論文、プログラム、マニュアル、データなど）	・版築・石積建築の耐震化マニュアル ・技術者講習・住民教育教材（施工マニュアル、パワポスライド、3Dグラフィック、施工動画、SVRなど）

上位目標

地震災害脆弱性改善を柱に、国民幸福度を向上させる持続可能な開発モデルとして
周辺諸国へ展開し、地域の人々の安全で安心できる暮らしの実現に貢献

災害管理行政の枠組みにおける耐震化指針の全国規模での運用
上位目標の達成に必要な、研究課題抽出と具体的取り組み方策の構築

プロジェクト目標

ブータンの減災施策の科学的根拠となる地震、地盤、組積造に関する知見の取得と
耐震化指針、減災教育マニュアルの作成及び災害管理行政の枠組みにおける運用