

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）

研究課題別終了時評価報告書

1. 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（2017年4月～2023年4月）

2. 研究代表者

2.1. 日本側研究代表者：青木 孝義

（名古屋市立大学 大学院芸術工学研究科 教授）

2.2. 相手国側研究代表者：Nagtsho Dorji（ナクツォ ドルジ）

（内務省文化・ゾンカ語局 (Department of Culture and Dzongkha Development, Ministry of Home Affairs) 局長）

3. 研究概要

本プロジェクトでは、ブータンにおける伝統的な工法による版築・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取り纏める。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。このプロジェクトで開発される技術は、従来の土や石を建築材料とした脆弱な構造の住宅が崩壊することによって発生する災害を克服するモデルとして、他の国々にも普及を目指す。本プロジェクトは以下の3つの研究題目で構成されている。

- ・研究題目1：地震リスク評価（地震観測強化、震度観測強化、活断層調査、地震増幅度推定、地震ハザード評価、地震リスク評価）
- ・研究題目2：耐震化技術の開発（常時微動計測、材料実験、実大試験体静的・動的実験、構造解析、耐震診断法、耐震補強キットの開発、耐震化指針、建築構造基準の提案）
- ・研究題目3：耐震化技術の普及（実施体制の確立、教材・普及プログラムの開発、指導者教育、技術者・施工者教育、住民教育）

4. 評価結果

総合評価：S

（所期の計画を超えた取組みが行われている）

本プロジェクトは、理学、工学、社会科学が上手く融合された、学際的なプロジェクト体制で防災分野の模範的な優れた成果をあげた。特に、耐震化技術の開発における工学的な成果については特筆に値するものであり、その社会実装面においても高く評価されることから、総合的に所期の計画を超えた取り組みが行われたものと評価する。

本プロジェクトでは、3つの研究題目それぞれにおいて、実施すべき事項が着実に遂行された。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が作成され、実務で活用すべく研究成果が取り纏められている。また、技術者・施工者講習によって耐震化技術を普及させる取り組みもなされた。

本プロジェクトにおける研究成果は、震度モニタリング、活断層マップや地震ハザードマップ、リスクマップの作成、耐震化マニュアル、施工マニュアル、耐震化工法の施工を説明する動画教材等による技術移転がなされている。技術の普及が進む実効性のある取り組みであり、研究成果の社会実装の進展が期待される。また、プロジェクト終了後、耐震技術開発の持続・継続のため、伝統建築研究所（RITS, Research Institute for Traditional Structures）を設立する構想を実現した。日本研究者との交流継続、研究機関との連携を構築する試みを高く評価したい。

4-1. 地球規模課題解決への貢献

世界中の地震による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、地域社会レジリエンスを高めていくため、その対策は地球規模課題といえる。本プロジェクトは、版築・石積建築の耐震性能評価法、新築および既存建物の耐震化手法を確立するもので、現地の建築物の現状に沿った形で行われ、課題解決に向けた科学的・技術的な成果をあげた。本プロジェクトで開発された耐震化マニュアル、施工マニュアル、耐震化工法の施工を説明する動画教材等については、実践に向けた技術指導及び講習が行われており、今後十分利用され、社会実装が進展するものと考えられることから、そのインパクトは極めて大きい。また、ここで開発した研究成果は、ブータンと同様に地震被害が想定されるヒマラヤ造山帯の各国及び地域への活用、波及効果が見込めるものとする。

地震リスク評価（研究題目1）において、地震対策、建物被害軽減にむけた技術開発として、安価で多くの地点に設置可能な震度計を開発し、ブータン国全域にわたって221点の震度観測点を設置した。日本が誇るMOWLASやAMeDASをも上回る空間密度の観測ネットワークが構築されたことは特筆に値する。地震観測網、震度観測網の構築、活断層マップ、地震ハザードマップの作成は大きな社会的インパクトがあり、今後の研究への展開も期待できる。

本プロジェクトは、①地震ハザード解明、②工学的に現地建物を強化する実験・評価（要

素実験、実物大実験、振動台実験)、③耐震化技術・手法の確立、④法律への適用と、研究成果の出口を強く意識した研究が行われており、科学的根拠に基づく防災対策の好事例といえる。得られた成果は、建築物の地震脆弱性の課題を抱える発展途上国において社会実装の可能性が高く、科学的根拠に基づく防災対策のアプローチとして国際社会の中で認知・活用されることが期待される。

4-2. 相手国ニーズの充足

ブータンが必要としている地震災害の軽減に向けた伝統的な建築手法について、新規並びに既設の建築物の強度を高めるための耐震化技術・手法を開発し、社会実装を進めた。相手国の文化的・伝統的建築物の価値を損なうことのない配慮もあり、本プロジェクトは、相手国のニーズに沿った研究成果をあげた。版築造、石積造建築物の補強、新築建築物に対する施工方法を確立し、建築基準法への適用による政策反映も進められ、持続的に発展していくものと期待できる。

また、本プロジェクトを遂行することによって得られた研究成果、技術体系、マニュアル、指導者・技術者・施工者への教育、研修プログラムなどは、相手国における研究機関のみならず、防災を担う行政の技術者、建築家、施工者でも利用可能なものになっている。成果を継続的にweb公開できる仕組みも構築している。さらに、耐震化の普及実施体制について、今後の推進における計画を相手国研究者が作成しており、継続的発展が大いに期待できる。

相手国側の人材育成の面では、日本の研究者がブータンの若手研究者へ教育・技術指導を行い、研究手法などの知識並びに技術の移転がなされている。また、文部科学省の奨学金を受給する博士後期課程の留学生、JICA 長期研修生（政策研究大学院大学から修士号を取得）も日本側で受け入れ、ブータンの若手人材の育成が活発になされたことは、継続的発展の見地からも高く評価される。本プロジェクトに参加した両国の大学院生が活躍し、関連学会の賞を受けるなど、学術的な成果も得られている。

4-3. 付随的成果

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向上に大きく貢献したものとする。地震観測網の構築により、活断層マップやハザードマップが作成されるなどの成果があり、加えて実際の地震動発生データの蓄積されれば、波及効果は大きなものとなる。日本はブータンの地震防災へ貢献する数少ない国の1つであり、本プロジェクトは、地震災害の軽減に向けた日本政府の科学技術外交に十分に貢献している。海外展開をめざす日本の研究者や企業にとって、ブータンにおいて地震リスクを明らかにし、伝統的建物の耐震技術が成果として提示される本プロジェクトの進め方が大いに参考になることで、間接的に日本社会への波及効果が期待できるものとする。

災害脆弱性を改善する上で重要な伝統建築の耐震化という、相手国社会が受け入れやすい方策を科学的に担保するという方法論とその実装実現は、SATREPS 本来の目的に合致した非常に質の高いプロジェクトといえる。本プロジェクトにおける伝統建築の耐震化技術・手法の確立とその社会実装は、当該周辺地域の国際的標準化に寄与できるものと期待される。

具体的成果物として、耐震化マニュアル、施工マニュアル・動画教材、耐震化工法の施工を説明するホームページ作成、エンジニアを対象としたオンライン研修プログラムは、基礎科学的背景からの確にまとめられ作成されている。これらは相手国のニーズに沿った研究成果であり、社会実装へ活用、展開が開始されていることから、卓越した成果物といえる。

本プロジェクトを通して日本の若手研究者が第一線で活躍し、ブータン研究者を指導し、プロジェクトを牽引しているところから、リーダーとしてグローバルに活動できる人材育成についても十分に機能したと考えられる。また、ブータン若手研究者・技術者を日本に受け入れ、現場や実験室での研修による能力開発を実施し、複数のブータン人留学生在が学位（博士、修士）を取得した。これらの学位取得者と研修を受けた若手研究者・技術者は帰国後、ブータン側研究チームの中心的な役割を果たし、本プロジェクト推進に大きく貢献した。日本側とブータン側の密な関係が構築された。SATREPS 終了後もブータン人研究者との継続的な連携が見込まれ、我が国との強固な技術及び人的ネットワークの形成、維持が期待できる。

4-4. プロジェクトの運営

プロジェクト推進・管理について、COVID-19 の影響により、ブータンにおける現地での調査・実験活動が予定通り進まない状況にあったものの、3つの研究題目それぞれにおいて、実施すべき事項が着実に遂行された。現地で行う調査・実験については、オンラインによる実験指導、リモート支援を行うなどして研究を進めた。また、本研究の成果である耐震化マニュアルのコンテンツは現行の組積造耐震工法ガイドラインへ反映される（2023年3月予定）。また、2023年6月に予定されているインフラ交通省の省令である Building Code of Bhutan の改正において、組積造建築に関しては当該ガイドラインを遵守すべきことが明記される計画である。社会実装面でも工夫を凝らして、所期の計画を上回る成果を上げたことは、研究代表者のリーダーシップによるものと高く評価する。

プロジェクト推進体制について、適材適所にカウンターパート機関が参画した体制がとられていた。研究題目毎の各部署の役割・責任が明確であり、各研究題目の連携・成果の共有が適切になされていた。また、理学、工学、社会科学が上手く融合された、学際的なプロジェクトとして防災分野の優れた運営体制を実現したものと評価する。

情報発信については、研究題目1の研究成果である、地震観測網の構築による震度モニタリング、活断層マップ、地震ハザードマップが、ブータン内務文化省災害管理局、経済省地質鉱山局のホームページで公開がなされている。また、研究題目2・3の成果である、耐震化マニュアル、施工マニュアル・動画教材、耐震化工法の施工を説明するホームページ作成、

エンジニアを対象としたオンライン研修プログラム等により、確実に情報が発信されており、実効性のある普及が可能となる技術移転がなされている。また、国内外の学術論文執筆、学会・国際シンポジウムでの発表などが行われ、両国の若手研究者が表彰も受賞している（2018年度セメント技術大会優秀講演者賞、第17回世界地震工学会議（17WCEE）等）。地震防災教育について、住民啓発活動も実施されており、社会全体に浸透させていくことが期待される。

5. 今後の研究に向けての要改善点及び要望事項

本プロジェクトにより、ブータン国内の多くの伝統建築（版築・石積建築）の耐震性能向上が図られ、災害脆弱性の低減が進展していくために、以下のような事項について引き続き尽力されたい。

- (1) 本プロジェクトにおいて、実施されたパイロット地域を中心にハザード評価、リスク評価の取り組みをブータン全国に展開することを期待する。ブータンの地形特性に基づく災害リスクを踏まえた地理空間リスクについても検討されたい。また、全国展開された地震観測網や震度計観測網については、ブータンの基盤情報として整備されたことは大きな成果と考えるが、地震発生前の評価として、微動観測による地盤応答の特性を少なくとも重要な地域においては明らかにしておく等、地震観測網や震度計観測網が災害の軽減に結び付くような研究活動への展開が強く望まれる。
- (2) 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、民間建築物への普及、新築及び既存建築物の耐震化が進展するよう、①建築許可申請の強化、②インセンティブスキームの実装、③公共建築物への適応など、社会実装がさらに進むよう、引き続き、地道で粘り強い活動を期待する。災害脆弱性を克服する上で、建築物の耐震化は極めて重要であると考えられる。
- (3) プロジェクト終了後、耐震技術開発の持続・継続のため、伝統建築研究所（RITS, Research Institute for Traditional Structures）を設立する計画が示された。日本研究者との交流継続、ブータン大学との連携、遺産建築物の補強などの活動を想定されている。減災に向けた人材育成の継続においても、伝統建築研究所の構想実現、積極的な活動を期待する。

以上

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0月1日～令和3年3月3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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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マテクトニクス解明
知財の獲得、国際標準化の推進、生物資源へのアクセス等	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> 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)	<ul style="list-style-type: none"> 耐震診断法マニュアル 版築・石積建築の耐震化指針 技術者講習・住民教育マニュアル 地震動予測地図

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

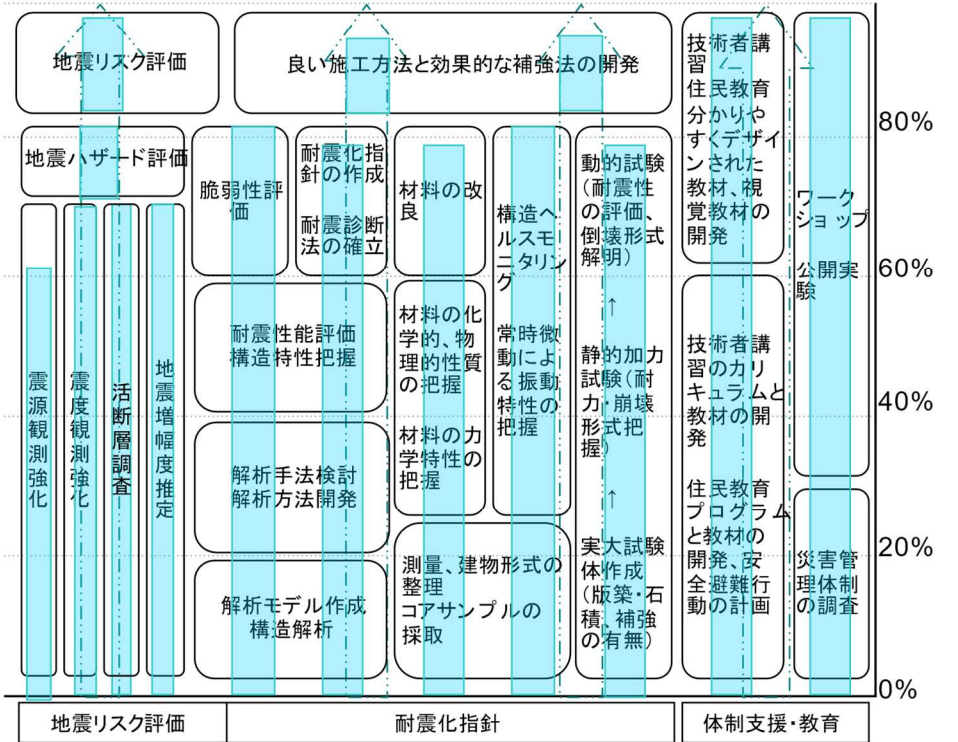


図1 成果目標シートと達成状況 (2023年2月時点)